



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**DRASTIC-Sg: Propuesta metodológica
para la caracterización espacial de la
vulnerabilidad en acuíferos con
subsistencia aplicada a la Ciudad de
México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

PRESENTA

BERENICE ZAPATA NORBERTO

TUTOR:
DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

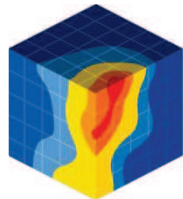


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la **doceava** tesis del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación de acuíferos.

Los datos de este trabajo derivan del proyecto denominado *“Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y de las fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos”*, clave 121128. Bajo coordinación técnica del Dr. José Antonio Hernández Espriú del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Financiado por CONACYT-GDF (ICyTDF) y el Fondo Mixto-CONACYT-GDF.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Geología y al CONACYT por el apoyo recibido durante y para la culminación de mis estudios de maestría.

A mi asesor José Antonio Hernández Espriú por su apoyo incondicional, confianza y paciencia.

Al comité de evaluación integrado por Blanca Lucía Prado Pano y Luis Marín Stillmann por todos sus consejos y comentarios.

Al jurado evaluador integrado por Blanca Lucía Prado Pano, Enrique Cabral Cano, Jaime Carrera Hernández y Ramiro Rodríguez.

A Óscar Escolero Fuentes por brindarme todo su apoyo, consejos y ser un guía incondicional.

Al Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, especialmente a Sergio Macías, Darío Solano y al Ing. Héctor Macías por todos sus conocimientos y aportaciones al presente trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos y alcances	3
1.2 Localización del área de estudio	3
1.3 Estudios previos.....	7
1.3.1 Hidrogeología	7
1.3.2 Vulnerabilidad	11
1.3.3 Subsistencia en la Ciudad de México	15
2 MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA: VULNERABILIDAD Y SUBSIDENCIA	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Definición de vulnerabilidad.....	27
2.3 Metodologías para evaluar la vulnerabilidad acuífera	28
2.3.1 Métodos matriciales (MS)	29
2.3.2 Sistemas de clasificación (RS)	30
2.3.3 Modelos de Superposición y Conteo de Puntos (PCSM)	31
2.3.4 Modelos matemáticos y análisis estadísticos	33
2.3.5 Modificaciones de la metodología DRASTIC	33
2.4 Subsistencia por extracción de agua subterránea.....	35
2.4.1 Subsistencia en depósitos granulares	36
2.5 Técnicas de medición de subsistencia.....	39
3 GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	43
3.1 Introducción.....	43
3.2 Geología.....	44
3.2.1 Fisiografía	44
3.2.2 Estratigrafía	45
3.3 Unidades hidroestratigráficas	51
3.4 Parámetros hidráulicos	54
3.5 Profundidad del nivel estático.....	56

4. METODOLOGÍA DRASTIC-Sg	59
4.1 Introducción.....	59
4.2 Materiales y métodos.....	60
4.3 Obtención de los parámetros hidrogeológicos.....	63
4.3.1 Profundidad del agua subterránea Dr	63
4.3.2 Recarga potencial Rr	65
4.3.3 Litología del acuífero Ar.....	70
4.3.4 Tipo de suelo Sr.....	73
4.3.5 Topografía Tr	77
4.3.6 Impacto a la zona vadosa Ir.....	79
4.3.7 Conductividad hidráulica Cr.....	82
4.3.8 Gradiente de subsidencia Sgr	85
4.4 Índices DRASTIC y DRASTIC-Sg	89
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	91
5.1 Introducción.....	91
5.2 Parámetros de vulnerabilidad relativa	91
5.2.1 Profundidad del agua subterránea Dr	91
5.2.2 Recarga potencial Rr	94
5.2.3 Litología del acuífero Ar.....	97
5.2.4 Tipo de suelo Sr.....	101
5.2.5 Topografía Tr	103
5.2.6 Impacto a la zona vadosa Ir.....	105
5.2.7 Conductividad hidráulica Cr.....	109
5.2.7.1 Parámetros hidráulicos.....	110
5.2.8 Gradiente de subsidencia Sgr	116
5.3 Índices DRASTIC y DRASTIC-Sg	120
5.4 Comparación entre los índices DRASTIC y DRASTIC-Sg	122
5.5 Zonas de vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México	125
5.6 Comparación entre DRASTIC-Sg y otros mapas de vulnerabilidad	130
5.7 Procesamiento adicional	133
5.7.1 Tipo de suelo Sr.....	133
5.7.1 Impacto a la zona vadosa Ir.....	136

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	139
6.1 Conclusiones	139
6.1.1 Hidrogeología.....	139
6.1.2 Parámetros de vulnerabilidad relativa	140
6.1.3 Mapa del índice DRASTIC-Sg.....	142
6.1.4 Zonas de vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México	142
6.1.5 Comparación entre los modelos DRASTIC y DRASTIC-Sg.....	143
6.2 Futuras líneas de investigación	144
REFERENCIAS	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización y límites de la zona de estudio	4
Figura 1.2 Límites político-administrativos del Distrito Federal.....	5
Figura 1.3 Vías de acceso al Distrito Federal.....	5
Figura 1.4 Mapa de vulnerabilidad para el área metropolitana de la Ciudad de México (Mazari-Hirart <i>et al.</i> , 2006)	12
Figura 1.5 Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal (López-Martínez, 2007).....	13
Figura 1.6 Mapa de vulnerabilidad para la Cuenca de México (Ramos-Leal <i>et al.</i> , 2010). 14	
Figura 1.7 Tasa de subsidencia anual para la Ciudad de México (Cabral-Cano <i>et al.</i> , 2008) . 19	
Figura 1.8 Tasa promedio de subsidencia vertical para el área metropolitana de la Ciudad de México (López-Quiroz <i>et al.</i> , 2008).....	20
Figura 1.9 Tasa de subsidencia anual para la Ciudad de México (Osmanoglu <i>et al.</i> , 2010)	21
Figura 1.10 Mapas de gradiente horizontal de subsidencia para periodos comprendidos entre abril de 2005 y junio de 2006 (Cabral-Cano <i>et al.</i> , 2010b).	22
Figura 2.1 Respuesta de los depósitos granulares durante la consolidación. Modificada de Yuill (2009).....	37
Figura 2.2 Respuesta de los esqueletos de roca ante la disminución de la presión de fluido. Modificada de Marsden y Davis (1967).....	38
Figura 3.1 Localización de la Faja Volcánica Transmexicana y sus tres fragmentos (Gómez-Tuena <i>et al.</i> , 2005)	45
Figura 3.2 Mapa de la Cuenca de México. (Mooser, 1996; Ramos-Leal <i>et al.</i> , 2010).	47
Figura 3.3 Mapa Geológico del Distrito Federal	48
Figura 3.4 Distribución de las unidades hidrogeológicas del acuífero de la Ciudad de México. Modificada de Vargas y Ortega (2004)	52
Figura 3.5 Secciones A-A' y B-B' que muestran la distribución en el subsuelo de las cuatro unidades hidrogeológicas del acuífero de la Ciudad de México. Modificado de Vargas y Ortega (2004)	53
Figura 3.6 Configuración de profundidad del nivel estático para los años 2000 y 2003 (Herrera-Zamarrón <i>et al.</i> , 2005)	57
Figura 4.1 Diagrama que muestra la metodología general de trabajo.....	62
Figura 4.2 Localización de la red piezométrica del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.....	64

Figura 4.3 Mapa que muestra la delimitación de las subcuencas y la localización de las estaciones hidrométricas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Cmisión Nacional del Agua, 2008)	66
Figura 4.4 Mapa que muestra la localización de las estaciones climatológicas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) y la configuración de la precipitación total anual en la zona de estudio	67
Figura 4.5 Localización de los cortes litológicos (DGCOH, 1994)	70
Figura 4.6 Fracción del corte litológico 142 (DGCOH, 1994).....	71
Figura 4.7 Mapa Edafológico de la Ciudad de México (INIFAP-CONABIO, 1995)	74
Figura 4.8 Modelo Digital de Elevación para el Distrito Federal (NASA, 2011).....	77
Figura 4.9 Fracción del corte litológico 142 (DGCOH, 1994).....	80
Figura 4.10 Ubicación de las pruebas de bombeo proporcionadas por el SACM (DGCOH, 1983, 1992 y 1993).....	83
Figura 5.1 (Izquierda) Mapa de profundidad del nivel estático 2010 y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa de profundidad del agua subterránea Rr.....	93
Figura 5.2 (Izquierda) Mapa de recarga potencial para el Distrito Federal y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa de recarga Rr	96
Figura 5.3 Histograma de valoración numérica de litología del acuífero Ar	97
Figura 5.4 (Izquierda) Variograma isotrópico para la valoración numérica de litología del acuífero Ar y (Derecha) el número de pares que conforma cada punto	98
Figura 5.5 (Izquierda) Mapa de distribución de cortes litológicos (DGCOH, 1994) con su valoración numérica correspondiente y puntos adicionales utilizados para la interpolación, y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa de litología del acuífero Ar.....	100
Figura 5.6 (Izquierda) Mapa Edafológico para el Distrito Federal (INIFAP-CONABIO, 1995) y (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de suelos Sr	102
Figura 5.7 (Izquierda) Mapa de pendiente del terreno para el Distrito Federal y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa de la topografía Tr	104
Figura 5.8 Histograma de valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir	105
Figura 5.9 (Izquierda) Variograma isotrópico para la valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir y (Derecha) el número de pares que conforma cada punto.....	106
Figura 5.10 (Izquierda) Mapa de distribución de cortes litológicos (DGCOH, 1994) con su valoración numérica correspondiente y puntos adicionales utilizados para la interpolación, y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa Ir	108
Figura 5.11 Gráficos de interpretación mediante el método de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991).....	111
Figura 5.12 Histograma de conductividad hidráulica.....	112
Figura 5.13 Histograma del logaritmo de conductividad hidráulica.....	113

Figura 5.14 (Izquierda) Variograma en dirección 0° para el logaritmo de la conductividad hidráulica y (Derecha) el número de pares que conforma cada punto	113
Figura 5.15 (Izquierda) Mapa de conductividad hidráulica que muestra la localización de pruebas de bombeo y puntos adicionales utilizados para la interpolación y (Derecha) mapa de vulnerabilidad relativa para la conductividad hidráulica Cr	115
Figura 5.16 Mapa de tasa de subsidencia en [mm/año] (Solano et al., 2012)	116
Figura 5.17 (Izquierda) Mapa de gradiente de subsidencia para el Distrito Federal y (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de gradiente de subsidencia	117
Figura 5.18 (Izquierda) Mapa del índice DRASTIC y (Derecha) mapa del índice DRASTIC-Sg.....	121
Figura 5.19 Mapa de diferencias entre los índices DRASTIC Y DRASTIC-Sg.....	122
Figura 5.20 Proceso de propagación de fisuras. Modificado de Zawadsky (1996).....	124
Figura 5.21(Izquierda) Mapa de cinco zonas de vulnerabilidad para el Distrito Federal y (Derecha) mapa de tres zonas de vulnerabilidad para el Distrito Federal	126
Figura 5.22 Distribución de las cinco clases de vulnerabilidad en las 16 delegaciones del Distrito Federal	127
Figura 5.23 Distribución de las tres clases de vulnerabilidad en las 16 delegaciones del Distrito Federal	129
Figura 5.24 (Izquierda y arriba) Mapa de vulnerabilidad para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (Mazari-Hiriart et al., 2006). (Izquierda y abajo) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal (López-Martínez, 2007). (Derecha y arriba) Mapa de vulnerabilidad para la Cuenca de México (Ramos-Leal et al., 2010). (Derecha y abajo) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal obtenido en el trabajo de tesis.	131
Figura 5.25 (Izquierda) Mapa de vulnerabilidad para la delegación Venustiano Carranza (López-Martínez, 2007). (Derecha) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal obtenido en el trabajo de tesis.	132
Figura 5.26 Mapa de vulnerabilidad relativa del tipo de suelo Sr modificado por el procesamiento adicional.....	134
Figura 5.27 (Derecha) Mapa del índice DRASTIC-Sg (presentado en la sección 5.3) y (Derecha) mapa del índice DRASTIC-Sg obtenido por procesamiento adicional de la vulnerabilidad relativa del tipo suelo Sr	135
Figura 5.28 Mapa de vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa Ir modificado por procesamiento adicional.....	137
Figura 5.29 (Derecha) Mapa del índice DRASTIC-Sg (presentado en la sección 5.3) y (Derecha) mapa del índice DRASTIC-Sg obtenido por procesamiento adicional de la vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa Ir	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Nombre, clave, superficie en km ² y número total de habitantes (INEGI, 2010) para cada delegación del Distrito Federal.	6
Tabla 2.1 Localidades con medidas del hundimiento del terreno en m y/o tasa de subsidencia máxima en el periodo indicado y la técnica que los determina.....	26
Tabla 2.2 Clasificación del espesor de la zona subsaturada y su índice correspondiente	29
Tabla 2.3 Clasificación del espesor de la permeabilidad vertical de la zona subsaturada y su índice correspondiente	29
Tabla 2.4 Matriz de vulnerabilidad según el método Ekv	29
Tabla 3.1 Resumen de parámetros hidráulicos determinados para el acuífero de la Ciudad de México	55
Tabla 4.1 Intervalo de profundidad del agua subterránea y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).....	65
Tabla 4.2 Intervalo de profundidad del agua subterránea y su valoración numérica correspondiente.....	65
Tabla 4.3 Intervalo de Recarga neta y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).....	69
Tabla 4.4 Litología del Acuífero y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987)..	72
Tabla 4.5 Geología del Acuífero de la Ciudad de México y su valoración numérica correspondiente	72
Tabla 4.6 Material del suelo y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987)	77
Tabla 4.7 Tipos de suelo en el Distrito Federal y su valoración numérica correspondiente	77
Tabla 4.8 Pendiente en porcentaje y su valoración numérica (Aller, 1987).....	78
Tabla 4.9 Materiales de la zona vadosa y su valoración numérica (Aller, 1987).....	79
Tabla 4.10 Materiales de la zona vadosa en el Distrito Federal y su valoración numérica correspondiente	80
Tabla 4.11 Procedimiento para obtener la valoración numérica del impacto a la zona vadosa	81
Tabla 4.12 Intervalo de la Conductividad hidráulica y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).....	85
Tabla 4.13 Intervalo del Gradiente de Subsidencia y su valoración numérica correspondiente	89
Tabla 5.1 Estadística básica de valoración numérica de litología del acuífero Ar	97
Tabla 5.2 Estadística básica de valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir ...	105

Tabla 5.3 Resultados de la reinterpretación de las pruebas de bombeo mediante el método de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991).....	110
Tabla 5.4 Estadística básica de la conductividad hidráulica (método de Rushton).....	112
Tabla 5.5 Estadística básica del Logaritmo de Conductividad Hidráulica	113

RESUMEN

En este trabajo se modificó la metodología DRASTIC incorporando un octavo parámetro que permite evaluar los efectos de los hundimientos diferenciales. Este modelo se denominó DRASTIC-Sg y se aplicó al acuífero de la Ciudad de México. La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo. Posee un historial de bombeo de más de 50 años que generó la explotación intensiva del acuífero superior y ocasionó el rápido decaimiento del nivel piezométrico que ha afectado al acuitardo superior. Dicho acuitardo disminuyó su espesor por efecto de la consolidación inducida a causa del bombeo excesivo, además, se ha fracturado y fallado afectando a la infraestructura urbana de la Ciudad de México.

Se determinó que el índice DRASTIC-Sg reconoce apropiadamente las zonas que experimentan un gradiente de subsidencia elevado respetando la importancia de las zonas de recarga. A partir del índice DRASTIC-Sg se delimitaron zonas de vulnerabilidad que permitirán otorgar lineamientos para una mejor gestión del acuífero.

ABSTRACT

This paper modified DRASTIC methodology incorporating eighth parameter for evaluating the effects of differential subsidence. This model is called DRASTIC-Sg and applied to the aquifer of Mexico City. Mexico City is one of the largest cities in the world. It has a history of pumping more than 50 years that generated the intensive exploitation of the upper aquifer and caused the rapid decline of groundwater level has affected the upper aquitard. This aquitard thickness decreased by induced compaction effect due to overpumping also has fractured and failed to affect the urban infrastructure of Mexico City.

It was determined that the DRASTIC-Sg index properly recognizes areas that experience a high subsidence gradient importance respecting the charging zone. From DRASTIC-Sg index were delimited areas of vulnerability that grant guidelines allow for better management of the aquifer.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente no existe una metodología para caracterizar la vulnerabilidad acuífera que incluya los efectos de la subsidencia del terreno, la cual es una problemática que se experimenta a nivel mundial (p. ej. Zektser *et al.*, 2004; Casu *et al.*, 2005; Psimoulis *et al.*, 2006; Carruth *et al.*, 2007; Yuill *et al.*, 2009; Bitelli *et al.*, 2010; Chahoud *et al.*, 2010; Chieh-Hung *et al.*, 2010; Osmanoglu *et al.*, 2010; Teatini *et al.*, 2010; Tomás *et al.*, 2010; Ustun *et al.*, 2010). A nivel nacional se ha intentado evaluar los efectos de la subsidencia por medio de la conductividad hidráulica (Rodríguez *et al.*, 2006), sin embargo, esta práctica no se ha formalizado en una nueva metodología. Lo anterior, resalta la importancia de crear una herramienta que incluya los efectos de la subsidencia del terreno, ayude a identificar rápidamente aquellas áreas propensas a la contaminación y que sirva para auxiliar en la gestión de fuentes potenciales y activas de contaminación, proponer el monitoreo de pozos de abastecimiento en zonas altamente vulnerables así como direccionar estudios hidrogeológicos a detalle. De esta forma, el objetivo de este trabajo es desarrollar la metodología que incorpore los efectos de los hundimientos diferenciales y aplicarla al acuífero de la Ciudad de México, en el área del Distrito Federal.

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo. Como tal las necesidades de abastecimiento de agua son imprescindibles ante una población en aumento, con demandas que tratan de cubrirse con la explotación del acuífero de la Ciudad de México y en menor medida a través del Sistema Cutzamala. Sin embargo, ante un historial de bombeo de más de 50 años, se ha generado la explotación intensiva del acuífero superior que trae como consecuencia el rápido decaimiento del nivel piezométrico que ha llevado a la afectación del acuitardo superior, el cual no solo aporta agua al acuífero sino que además funciona como un filtro protector de contaminantes.

Es claro que los daños en obras civiles afectadas por procesos de subsidencia diferencial generan gastos considerables, pero el riesgo puede ser mayor si se

considera la posibilidad de que a través de estas fallas y fracturas viajen contaminantes al acuífero que abastece al Distrito Federal, donde la población supera 8 millones de habitantes (INEGI, 2010).

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES

GENERALES:

Desarrollar una metodología para caracterizar la variación espacial de la vulnerabilidad acuífera, que incluya los efectos de la subsidencia del terreno, denominada DRASTIC-Sg y que será aplicada al acuífero de la Ciudad de México.

PARTICULARES:

Para tal efecto, es necesario esclarecer el marco hidrogeológico del acuífero de la ciudad de México, desarrollar la metodología DRASTIC (Aller, 1987) y obtener el índice DRASTIC (Aller, 1987). Posteriormente se establecerá la caracterización espacial de la subsidencia y se incorporará en la metodología DRASTIC para así proponer la metodología y el índice DRASTIC-Sg. Finalmente se otorgarán lineamientos para una mejor gestión del acuífero.

1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se muestra en la Figura 1.1, comprende la porción sur de la Cuenca del Valle de México que se distingue por ser una cuenca de origen tectónico y volcánico. El área de estudio se delimita al sur por la Sierra Chichinautzin, al norte por las fallas Tenayuca y Chiquihuite con orientación NE-SW (Mooser, 1992) en la Sierra Guadalupe; al oeste por la sierra de Las Cruces y al este por la Sierra de Santa Catarina y los estratovolcanes de la Sierra Nevada (Vázquez-Sánchez, 1995).

La zona de estudio comprende los límites político-administrativos de las 16 delegaciones del Distrito Federal (D.F.): Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac,

Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco (Figura 1.2). Cubre una superficie total de 1493.4 km² donde las delegaciones que ocupan mayor extensión territorial son Tlalpan, Milpa Alta e Iztapalapa (Tabla 1.1).

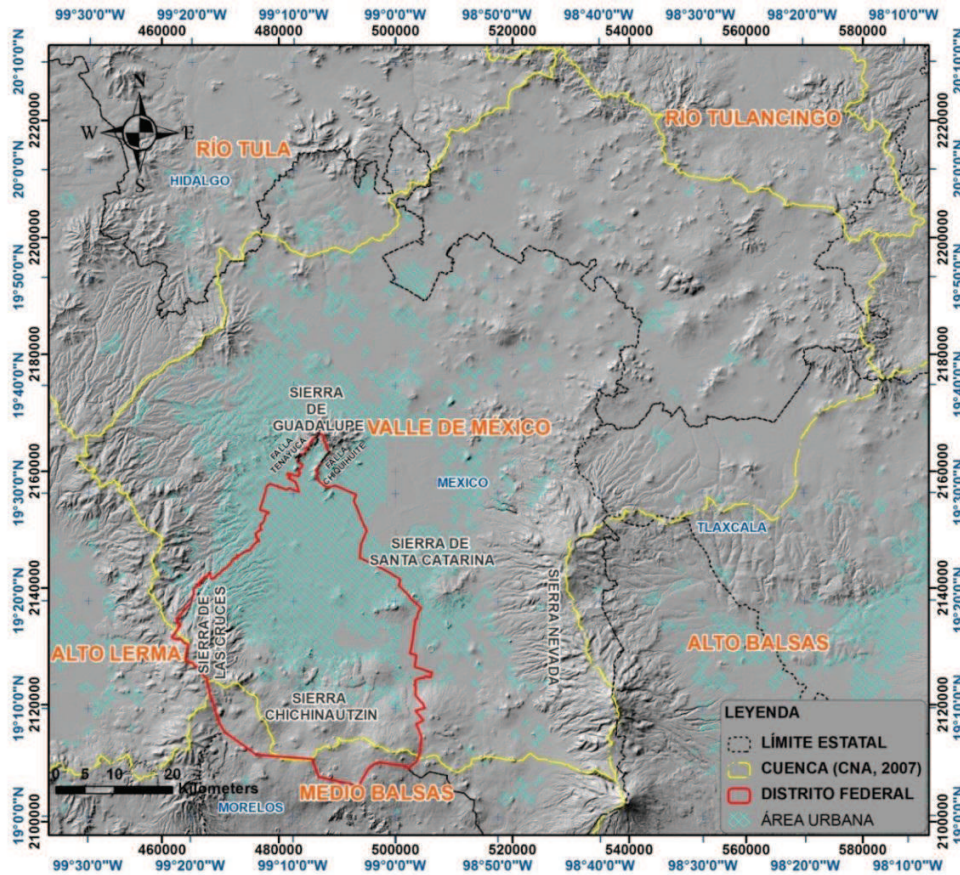


Figura 1.1. Localización y límites del Distrito Federal (zona de estudio en línea roja). La línea negra es el límite estatal, la línea amarilla es el límite de la cuenca (CNA, 2007), la zona azul es el área urbana (INEGI, 2010b) y las líneas negras en la Sierra de Guadalupe son las fallas Tenayuca y Chiquihuite (Mooser, 1962).

Con respecto a las vías de acceso terrestre al Distrito Federal (Figura 1.3) se encuentran al sur las carreteras y autopistas México-Cuernavaca, la carretera a Oaxtepec, Morelos y la salida a Toluca a través del Circuito Ajusco; al este las salidas a Chalco por Av. Tláhuac y la salida a Puebla por la Calzada Ignacio Zaragoza; al norte se tiene la salida a Texcoco por Periférico Oriente así como las salidas a Querétaro y Pachuca; al oeste se tienen las salidas a Naucalpan y Toluca. Por vía aérea se tiene acceso por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad

de México (Figura 1.3) que se localiza entre Av. Oceanía y la Vía Tapo al oriente del Distrito Federal.

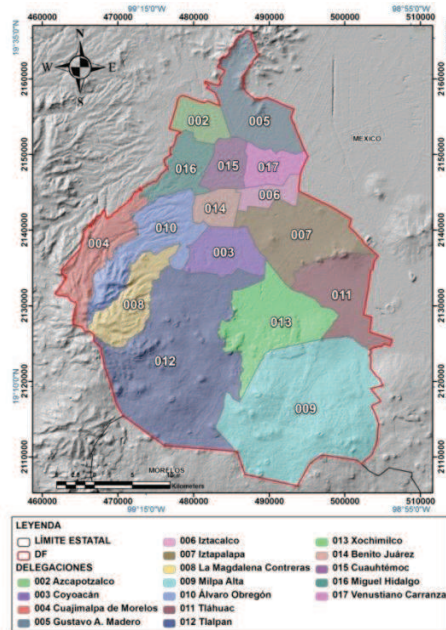


Figura 1.2. Límites político-administrativos del Distrito Federal (área de estudio en línea roja). Los polígonos delegacionales se muestran en diversos colores los polígonos, los números dentro del polígono corresponden a la clave delegacional que se muestra en la Tabla 1.1.

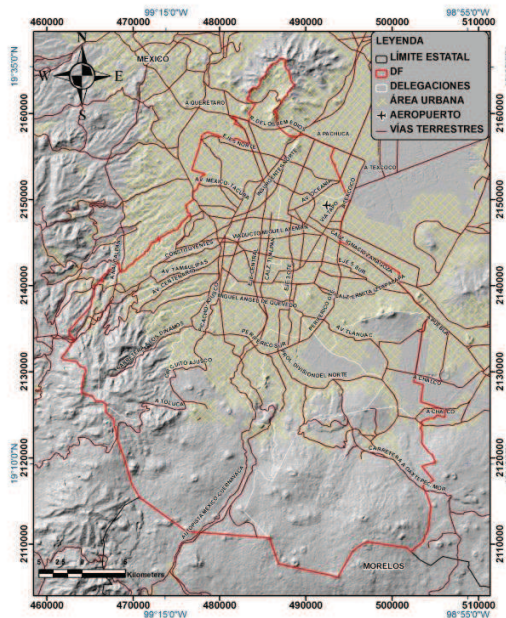


Figura 1.3. Mapa que muestra las principales vías de acceso (líneas café; INEGI, 2010) al Distrito Federal (zona de estudio en línea roja) y la extensión de la zona urbana (achurado amarillo; INEGI, 2010b).

De acuerdo a los datos de los censos de población y vivienda de los años 2005 y 2010, la población en el Distrito Federal ha incrementado más de 130,000 habitantes en cinco años (Gráfico 1.1). Según el censo de población y vivienda realizado durante el 2010 la población que reside en la Ciudad de México, D.F. supera los 8 millones de habitantes (INEGI, 2010). Particularmente, las delegaciones más pobladas son Iztapalapa con 1'815,786 habitantes, Gustavo A. Madero con 1'185,772 habitantes y Álvaro Obregón con 727,034 habitantes (Gráfico 1.2 y Tabla 1.1).

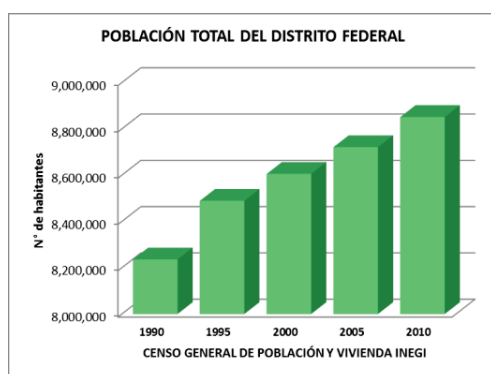


Gráfico 1.1. Población total de los censos de población y vivienda años 1990, 1995, 2000 y 2010. Tomado de INEGI, 2010.



Gráfico 1.2. Número de habitantes por delegación del censo de población y vivienda 2010. Tomado de INEGI, 2010.

Clave	Nombre	Superficie km ²	Nº de habitantes
010	Álvaro Obregón	96.08	727,034
002	Azcapotzalco	33.49	414,711
014	Benito Juárez	26.68	385,439
003	Coyoacán	53.88	620,416
004	Cuajimalpa de Morelos	71.16	186,391
015	Cuauhtémoc	32.49	531,831
005	Gustavo A. Madero	87.83	1,185,772
006	Iztacalco	23.07	384,326
007	Iztapalapa	113.17	1,815,786
008	La Magdalena Contreras	63.37	239,086
016	Miguel Hidalgo	46.35	372,889
009	Milpa Alta	298.01	130,582
011	Tláhuac	85.68	360,265
012	Tlalpan	310.17	650,567
017	Venustiano Carranza	33.84	430,978
013	Xochimilco	118.11	415,007

Tabla 1.1. Nombre, clave, superficie en km² y número total de habitantes (INEGI, 2010) para cada delegación del Distrito Federal. La extensión delegacional y su clave se muestran en la Figura 1.2.

1.3 ESTUDIOS PREVIOS

A continuación se presenta una revisión de aquellas publicaciones que abordan la hidrogeología, vulnerabilidad acuífera y subsidencia en la Ciudad de México.

1.3.1 Hidrogeología

Entre los estudios de *Hidrogeología* destaca el trabajo de Ortega-Guerrero y Farvolden (1988). En este estudio se determinan cinco unidades hidrogeológicas de acuerdo a sus propiedades y comportamiento hidráulico. Los valores de conductividad hidráulica para las unidades lacustres se derivan de los estudios de Marsal y Masari (1959) y de Rudolph *et al.*, (1988). Utilizan el modelo numérico crossflo (McLaren, 1988) para modelar el acuífero.

En el artículo de Ortega-Guerrero (1989), se plantean las fronteras naturales y las condiciones iniciales en el acuífero del Valle de México, específicamente en la parte centro-sur de la Cuenca de México. Presentan dos secciones hidrogeológicas, una de norte a sur desde la Sierra de Guadalupe hasta la Sierra Chichinautzin y otra de oeste a este, a partir de la Sierra de Las Cruces hasta la Sierra Nevada. Para el modelo matemático por elemento finito (Frind y Matanga, 1985; McLaren, 1988) se consideraron los valores de conductividad hidráulica y los caudales reportados en Ortega-Guerrero y Farvolden (1988). Como fronteras laterales del sistema acuífero se identifican las divisorias del agua subterránea en las montañas, la frontera superficial es el nivel freático y la frontera inferior es la profundidad del sistema de flujo, considerada como el nivel del mar. Finalmente se menciona que los depósitos lacustres representan una zona de descarga bajo condiciones naturales, y que actualmente, debido a la explotación intensiva las arcillas representan una zona de recarga.

En el trabajo de Lesser y Asociados (1992) se menciona que el acuífero de la zona sur del valle de México se divide en tres subsistemas que se agrupan de

acuerdo a la ubicación y al tipo de rocas que lo conforman. El primer sistema comprende la zona metropolitana de la Ciudad de México (incluyendo Xochimilco), formado por materiales granulares de permeabilidad baja cuyos sitios de recarga se encuentran en la sierra de las cruces y los alrededores de Tlalpan. En el segundo subsistema, el valle de Chalco, la recarga proviene de las sierras de Santa Catarina, Chichinautzin y la Sierra Nevada; las rocas que lo conforman son basaltos y materiales piroclásticos de alta permeabilidad además de andesitas y materiales piroclásticos de media a baja permeabilidad. El ex-lago de Texcoco es el tercer subsistema, que tiene una recarga que se origina al oriente de la sierra de Chicoloapan de Juárez y sus materiales son de baja permeabilidad. Realizaron la configuración de profundidad y elevación del nivel estático con datos de 1991 para los 300 pozos de la red piezométrica. Además determinan el gradiente hidráulico para el flanco oriental de la sierra de Las Cruces y la de Chichinautzin en el orden de 0.0069 a 0.0166 m/m, al pie de la sierra de Santa Catarina de 0.01 y 0.0091 m/m y en la zona oriente de 0.01 m/m. Por otro lado, se menciona que las pruebas de bombeo realizadas a partir de 1984 a través de DGCOH-DDF se interpretaron mediante los métodos de Theis (1935) y Jacob (1946, 1952).

Posteriormente, en el artículo de Lesser y Asociados (1997) dividen al acuífero de la Ciudad de México en subsistemas tomando en cuenta las redes de flujo que definen un parteaguas subterráneo, que se origina en la sierra de Santa Catarina con dirección hacia el NE llegando al Aeropuerto Internacional y cambiando la dirección hacia el N en la Sierra de Guadalupe. Debido a que el flujo subterráneo reflejó un parteaguas a la altura de San Pedro Tláhuac, se realizó la división entre los acuíferos de la Ciudad de México y el Valle de Chalco. Para el Valle de México la profundidad del nivel estático varía entre 30 y 180 m. Aseguran que la recarga principal se origina en la Sierra de las Cruces al oeste y de la Sierra Chichinautzin al sur. Mencionan que a partir de 1991 se muestra una recuperación en los niveles piezométricos para la zona de Azcapotzalco, según los registros de los hidrógrafos existentes. De igual manera, se indica que los valores de transmisividad en la

Ciudad de México se encuentran entre 259.2 a 950.4 m²/d, y el gradiente hidráulico varía entre 0.0028 a 0.0273 m/m.

El trabajo de Vargas y Ortega-Guerrero (2004) analiza la distribución y variación de la conductividad del acuitardo en las planicies de Chalco, Texcoco y en la Ciudad de México para lo cual realizaron 225 slug tests en piezómetros múltiples con profundidades de 2 a 85 m. Dichas pruebas se interpretaron mediante los métodos de Hvorslev (1951) y de Bouer-Rice (1976). En estas tres áreas los depósitos lacustres contienen tres acuitardos con espesor de 20 a 30 m separados por dos capas duras a profundidades de 20 a 26 m y de 50 a 56 m, respectivamente. En el valle de Chalco, el acuitardo somero muestra valores de conductividad entre 8.64×10^{-7} y 8.64×10^{-3} m/d; el segundo acuitardo posee valores de conductividad entre 8.64×10^{-7} y 8.64×10^{-5} m/d; en el tercer acuitardo se obtuvo solo una lectura de 1.9×10^{-6} m/d a profundidad de 85 m. Para la planicie de Texcoco, se obtuvo un intervalo de conductividad entre 1.99×10^{-4} m/d y 2.16×10^{-2} m/d para una salmuera extraída de las dos capas duras, en un área industrial. Mientras que para la planicie de la Ciudad de México, en el acuitardo somero se obtuvo un intervalo de conductividad entre 8.64×10^{-7} m/d y 8.64×10^{-4} m/d, lo cual indica una reducción en los valores de la conductividad a profundidad. En general, se muestra una variación de la conductividad hidráulica entre 1.9×10^{-6} m/d y 1.73×10^{-2} m/d en los acuitardos superiores, con valores dominantes de 8.64×10^{-5} m/d y 8.64×10^{-4} m/d; lo anterior indica que estos acuitardos no constituyen una barrera impermeable para el movimiento de contaminantes desde la superficie del suelo hacia el acuífero regional.

En la Tesis de Maestría de Vázquez-Sánchez (1995) se proponen dos secciones geológicas que se extienden de norte a sur y de este a oeste, y que se construyeron con la información litológica y geofísica de pozos productores (municipales y privados) y profundos. Se distinguen las unidades hidrogeológicas de acuerdo a su permeabilidad derivada de las características litológicas, estructurales, rasgos geomorfológicos y caudales de producción en pozos. Se

interpretaron pruebas de bombeo a caudal constante, realizadas por DGCOH (1983, 1992 y 1993) y por Huizar (1989), mediante los métodos de Boulton (1954), Walton (1962) y Boulton y Streltsova (1978). De éstas se desprende que para los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario la conductividad hidráulica se encuentra entre 4.23×10^{-1} m/d y 14.7 m/d, cuyos valores más altos se encuentran en el extremo poniente de la planicie de la Ciudad de México y los más bajos hacia el centro de la planicie lacustre. Se expresa que los valores para los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario varían entre 3.2×10^{-1} m/d y 18.1 m/d y que dichos valores no representan una tendencia espacial sino alta heterogeneidad. Por otro lado, las pruebas de bombeo a caudal constante (DGCOH, 1983, 1992 y 1993; Huizar, 1989) y variable (GAVM, 1989; CEAS, 1989) fueron simuladas numéricamente mediante el método de Rushton (Rushton y Redshaw, 1979; Rathod y Rushton, 1984). De la simulación se obtuvo que los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario varían su conductividad hidráulica entre 1.04×10^{-1} m/d y 30.2 m/d y tienden a disminuir desde la parte poniente de la planicie de la Ciudad de México hacia el centro de la planicie de Texcoco. También para ellos el rendimiento específico se encuentra entre 0.1 y 0.21 y el coeficiente de almacenamiento entre 2×10^{-4} y 5×10^{-3} . En las rocas basálticas del Cuaternario los valores de conductividad hidráulica se encontraron entre 1.04 m/d y 251 m/d, su rendimiento específico varía entre 0.06 y 0.1 y su coeficiente de almacenamiento entre 3×10^{-3} y 5×10^{-3} . Para los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario la conductividad hidráulica varía entre 1.04×10^{-1} m/d y 7 m/d, el rendimiento específico entre 0.01 y 0.1 y el coeficiente de almacenamiento entre 7×10^{-4} y 1×10^{-3} . Para las rocas andesíticas del Plioceno superior la conductividad hidráulica arrojó valores entre 2.25×10^{-1} m/d y 7 m/d, su rendimiento específico varía entre 0.05 y 0.08 y su coeficiente de almacenamiento varía entre 1×10^{-4} y 7×10^{-4} . Las pruebas de bombeo en pozos totalmente penetrantes, en depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, desprenden valores de conductividad hidráulica que se encuentra entre 1.47×10^{-1} m/d y 5.01 m/d y el coeficiente de almacenamiento varía entre 1×10^{-4} y 5×10^{-4} .

En los estudios mencionados anteriormente se observa que los parámetros hidráulicos considerados se derivan de los estudios de Marsal y Mazari (1959) y de Rudolph (1988). A partir de 1984 se tomaron los valores derivados de las interpretaciones de las pruebas de bombeo realizadas a través de la DGCOH-DDF. Asimismo se considera que el trabajo más completo corresponde al estudio de Vázquez-Sánchez (1995) ya que además de la coherencia en la descripción geológica aporta numerosos datos de caudales y parámetros hidráulicos con los datos de pruebas de bombeo más recientes (DGCOH, 1983, 1992 y 1993) e interpretadas por diferentes métodos. Cabe destacar, que durante 20 años no se han publicado datos de la realización de pruebas de bombeo en el acuífero de la Ciudad de México.

1.3.2 Vulnerabilidad

En el trabajo de Soto-Galera *et al.* (2000) se analiza la distribución espacial de las diferentes fuentes contaminantes del agua subterránea y se identifican las entidades políticas de la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) propensas a la contaminación de agua subterránea por compuestos orgánicos. Una vez que se situaron las fuentes de contaminación del subsuelo, se sobrepusieron en la carta de la división política de la ZMCM y se estimó la frecuencia de éstas por entidad. Se calculó la independencia de cada variable por medio del coeficiente de correlación para cada variable y el porcentaje ocupado subsuelo arcilloso. Se llegó a una clasificación de las entidades políticas acordes a la importancia de las fuentes de contaminación y al porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso. La variable que resultó correlacionarse en gran medida con las demás es la industria, de manera que las entidades políticas se ordenaron tomando en cuenta, en primer lugar, el número de industrias, el porcentaje de subsuelo arcilloso y la presencia de depósitos de residuos sólidos. Finalmente, se determinan 8 grupos de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación que se relacionan con la importancia de las fuentes contaminantes y el porcentaje de

subsuelo arcilloso que es nulo para la categoría de vulnerabilidad muy alta (Álvaro Obregón) e importante en la categoría de vulnerabilidad baja.

En el artículo de Mazari-Hirart *et al.* (2006) se propone un nuevo enfoque de evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), el cual combina las fuentes potenciales de contaminación con la permeabilidad de los materiales. Las fuentes potenciales de contaminación se clasifican a través del proceso de jerarquía analítica. El mapa se obtuvo a través de un método de ponderación simple, con una multiplicación escalar de los pesos de los criterios y un mapa binario que muestra la ubicación de cada fuente. El mapa de permeabilidad se obtuvo con la reclasificación de un mapa geológico mediante los valores de conductividad hidráulica y una normalización lineal de los valores. Se obtuvieron cinco clases de vulnerabilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta; las áreas con muy alta y alta vulnerabilidad cubren un área relativamente pequeña del 1.5 % del área total. Se piensa que los resultados proveen mayor coherencia con las prioridades de formulación política consideradas.

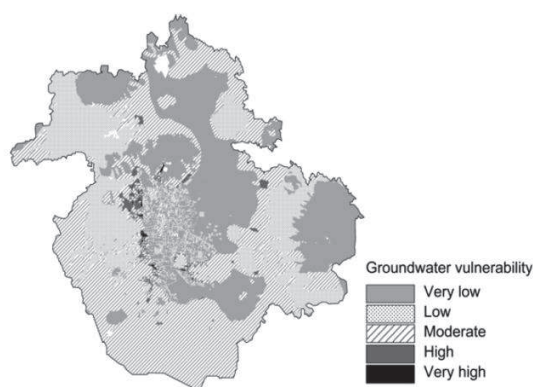


Figura 1.4. Mapa de Vulnerabilidad para el área metropolitana de la Ciudad de México. Tomado de Mazari-Hirart *et al.*, 2006.

En la Tesis de Maestría de López-Martínez (2007) se identifican las zonas de mayor riesgo del acuífero del Distrito Federal mediante la aplicación de una metodología propia para la valoración de la vulnerabilidad y riesgo de suelos por actividades no industriales. Utiliza el método GOD (Foster, 1987) para evaluar la

vulnerabilidad en el Distrito Federal, también se obtuvo el índice de carga contaminante donde se considera la clase contaminante, intensidad de contaminación, modo de disposición al suelo y el tiempo de aplicación. El método DRASTIC (Aller, 1987) se desarrolla en la delegación Venustiano Carranza en 23 estaciones de servicios. Se comparan las clasificaciones de vulnerabilidad mediante un mapa de riesgo determinado con el índice de carga contaminante estimado con el método GOD (Foster, 1987) y con el generado con DRASTIC (Aller, 1987). Se concluye que hay riesgo potencial alto de contaminación en las delegaciones de Gustavo A. Madero, Coyoacán, Iztapalapa e Iztacalco; riesgo medio a la contaminación en estas mismas delegaciones y en Azcapotzalco y Miguel Hidalgo; riesgo bajo de contaminación en Xochimilco, Tláhuac y Cuajimalpa. La vulnerabilidad muy alta se restringe en la zona Noreste del Distrito Federal, al sur de Gustavo A. Madero, este de Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán y en Venustiano Carranza, Iztacalco e Iztapalapa. La vulnerabilidad alta se localiza al noreste de Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo; en Azcapotzalco, Tlalpan y Xochimilco. La vulnerabilidad media en Xochimilco, Benito Juárez, Tlalpan y Chalco. Con el método DRASTIC (Aller, 1987) aplicado a Venustiano Carranza se localizó vulnerabilidad baja al suroeste, vulnerabilidad alta al norte, noroeste y suroeste y la vulnerabilidad media en la mayor parte de la delegación.

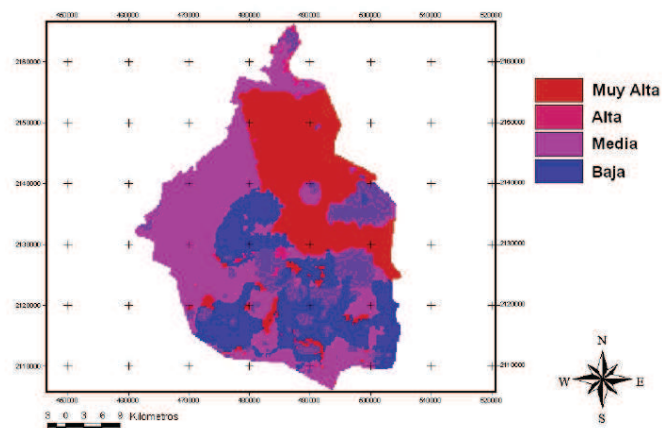


Figura 1.5. Mapa de Vulnerabilidad para el Distrito Federal. Tomado de López-Martínez, 2007.

En el trabajo de Ramos-Leal *et al.* (2010) se evalúa la vulnerabilidad por medio de la metodología SINTACS (Civita y De Maio, 1997), el índice de la calidad del agua, el índice de contaminación y el índice de fuentes contaminantes aplicados a la Zona Metropolitana de la Cuenca de México. Los valores de alta vulnerabilidad se localizan en las partes altas donde las rocas están expuestas, los valores intermedios de vulnerabilidad se localizan en los límites de la planicie, en la zona de transición y los valores de baja vulnerabilidad se distribuyen al interior de la cuenca, en la zona Metropolitana. Con respecto al índice de la calidad del agua los valores obtenidos varían de 35 a 100, los mayores a 75 unidades se observaron en los límites del valle y en las zonas de recarga; los de valor menor de calidad del agua se localizaron en Tláhuac con sólo 35 unidades. Para el índice de contaminación se tiene un intervalo de -10 a +10, los valores negativos se asocian a zonas con poca o nula contaminación, observados principalmente en las zonas de recarga, y los positivos que indican contaminación se observan en la zona de Tláhuac. Para el mapa de riesgo, se localizaron las fuentes potencialmente contaminantes como las redes primarias y profundas del drenaje, depósitos de combustible, zonas industriales y basureros. En la parte sur de la zona metropolitana de la cuenca de México se distribuye la red primaria de drenaje a través de la las zonas de media, alta y muy alta vulnerabilidad. Hacia el norte el drenaje cruza solo las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad. De los 12 basureros, 8 se localizan en la zona de alta vulnerabilidad y los restantes en zonas de baja y muy baja vulnerabilidad.

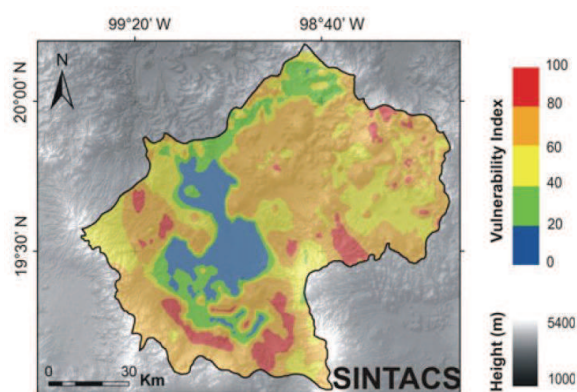


Figura 1.6. Mapa de Vulnerabilidad para la Cuenca de México. Tomado de Ramos-Leal *et al.*, 2010.

En los trabajos expuestos se observan diferentes metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en la Cuenca de México y en el Distrito Federal las que difieren considerablemente en sus resultados, por ejemplo el mapa de vulnerabilidad de López-Martínez (2007) se contradice con los resultados de Ramos-Leal *et al.* (2010) como se aprecia en las Figuras 1.5 y 1.6. Mientras que el mapa de vulnerabilidad de Ramos-Leal *et al.* (2010) concuerda parcialmente con el mapa de vulnerabilidad de Mazari-Hiriart *et al.* (2006) como se observa en la planicie lacustre (Figuras 1.4 y 1.6).

1.3.3 Subsistencia en la Ciudad de México

Con respecto a los documentos recientes que tratan el problema de la *Subsistencia en la Ciudad de México* se encuentra el informe técnico de Gayol (1925) donde observa mediante dos nivelaciones de precisión realizadas en 1877 y 1924 en un monumento cercano a la catedral, que el problema del hundimiento en las puertas de San Lázaro, al inicio del canal principal de aguas residuales de la ciudad, es parte del hundimiento general que se presenta en el Valle de México. Lo anterior, lo concibe como consecuencia del efecto del sistema de drenaje recién construido.

En su estudio, Carrillo (1948) demuestra que la causa principal de subsidencia en la ciudad de México se debe a la extracción del agua subterránea por medio de los pozos municipales. Para ello utiliza un perfil que consiste en un acuífero cubierto por estratos arcillosos y asumiendo una distribución lineal dentro de las arcillas para las presiones neutras al principio y al final del proceso de consolidación, encuentra la evolución de las presiones neutras en el acuífero, que corresponden a una constante velocidad de subsidencia de la superficie de la arcilla.

En el trabajo de Marsal (1952) se realizó una recopilación de información disponible de nivelación de precisión y las propiedades mecánicas de las arcillas con las que se reconstruyó la historia de subsidencia y se realizó una predicción de su magnitud. En la predicción mencionada, se distingue un máximo de 20 m

entre Av. Reforma y B. California, mientras que el cambio es nulo en las faldas del cerro Santa Isabel, en la colonia Guerrero, y en el cerro de la Estrella.

En el estudio de Marsal y Mazari (1959), retomaron las características geotécnicas definidas para la secuencia estratigráfica del subsuelo de la Ciudad de México (1957) y elaboraron la primera zonificación para los suelos de la zona urbana de la Ciudad de México. Esta zonificación obedece a los espesores de los estratos y su capacidad de compresibilidad aparente. Definen tres zonas: (1) la zona de Lomas que agrupa a las elevaciones rocosas cuya composición es basáltica y andesítica. Su capacidad de carga y el esfuerzo efectivo son altos; esta zona no contiene limo y contiene capas de material compresible con espesor máximo de 3 m. (2) La zona de Transición separa a las rocas de la zona de Lomas de los depósitos lacustres. Se constituye de grava, arena y piroclastos altamente compresibles que se disponen en capas de 3 a 20 m de espesor. (3) La zona del Lago se distribuye en la parte baja del Lago de Texcoco y se constituye por estratos limosos saturados muy compresibles que se encuentran interconectados hasta una profundidad media de 33 m. Su capacidad de carga es muy baja y tiene más de 20 m de espesor de material compresible. Bajo esta zona hay depósitos profundos constituidos de arena, grava y limo.

En los artículos de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1953; 1958; 1961; 1965; 1967; 1970; 1975) se publicaron los datos de las medidas de subsidencia realizadas en el Valle de México. Durante este periodo se instalaron nuevas estaciones piezométricas y se realizaron nivelaciones de precisión.

En el artículo de Lesser y Asociados-DGCOH-DDF (1998), mencionan que el acuífero en explotación para el abastecimiento de la Ciudad de México se constituye de materiales aluviales, gravas y arenas, intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Sobre éste descansa un acuitardo, constituido por materiales arcillosos, que se encuentran saturados y presentan permeabilidad muy baja. Indican que tiene un espesor de entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle y se acuña hacia los altos topográficos y tiene un nivel

freático a los 2 y 3 m de profundidad. También mencionan que posee un coeficiente de compresibilidad de 0.11 a 0.6 cm²/kg, relación de vacíos de 2 a 15 (Cruickshank *et al.*, 1979) y conductividad hidráulica entre 8.64x10⁻³ m/d y 8.64x10⁻⁵ m/d. Con respecto al hundimiento, se asimilan tres etapas: la primera de 1898 a 1937 donde el hundimiento es prácticamente lineal con 4 cm/año; la segunda de 1937 a 1947, también lineal con hundimiento medio de hasta 14 cm/año; y la tercera de 1947 a 1996, con velocidades de hundimiento mayores a 40 cm/año al comienzo de la etapa que disminuyen progresivamente al final de la etapa con valores de 10 cm/año. Por otro lado, con las mediciones realizadas por el DDF cada dos años de 1978 a 1994, se determinó que el mejor control y mayor distribución de datos se presentó para el periodo de 1983 a 1992, con ellos se obtuvo el hundimiento medio anual. En los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcóyotl se presentan los valores máximos de hundimiento de 30 cm/año, en el Aeropuerto Internacional se tiene entre 20 y 25 cm/año, al centro de la Cuenca de México hasta 10 cm/año, en Azcapotzalco entre 2 y 5 cm/año y en el área de Xochimilco y el Canal de Chalco alrededor de 15 cm/año. Se obtuvo la predicción de los hundimientos para los principales drenes mediante regresión logarítmica y la aplicación de un modelo matemático (Cruickshank *et al.*, 1979).

El libro de Santoyo-Villa *et al.* (2005) proporciona una de las revisiones más detalladas de la Cuenca del Valle de México. Entre los aspectos más sobresalientes menciona la estratigrafía del subsuelo apoyándose de los resultados de pruebas de resistencia al corte. Retoma la zonificación geotécnica (zona del Lago, Zona de transición y zona de Lomas) realizada por Marsal y Mazari (1959) y que ha servido de base para estudios posteriores hasta la actual zonificación geotécnica publicada por el GDF (2004). Señala que el centro histórico de la Ciudad de México, ha experimentado un hundimiento de 8 m durante 70 años (periodo de 1930 a 2000) y lo relaciona con un gasto medio de extracción de agua subterránea de 51900 L/s. Compara el nivel de referencia de la Catedral Metropolitana con respecto a la Tangente Inferior de Calendario Azteca TICA, encontrando una tasa de subsidencia de 109 mm/año para octubre de 2000 y una tasa de 73 mm/año para julio de 2004.

El estudio de Aguilar-Pérez *et al.* (2006) se llevó a cabo al NE de la Ciudad de México, en la región comprendida por el cono volcánico del Pleistoceno, conocido como el Peñón del Marqués, y sus alrededores, donde se encuentra el acuitardo lacustre sobre el cual se ubica la Ciudad de México. Se propone un análisis numérico acoplado de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánica, para evaluar la deformación vertical del terreno asociada a la extracción de agua subterránea en escenarios de acuífero libre y acuífero confinado, donde se analizan adicionalmente las condiciones de formación de fracturas hidrodinámicas. Se obtuvo la solución analítica de una integral que permite obtener los esfuerzos y desplazamientos que se generarían por la extracción de agua subterránea. Tanto en el acuífero volcánico como en el acuitardo, se identificaron la distribución y características de diferentes fracturas que empezaron a formarse aproximadamente 15 a 20 años después de iniciarse la operación de un sistema de nueve pozos (Sistema Peñón). Los resultados muestran que la extracción del Sistema Peñón, con un promedio de 527 L/s, ha causado una disminución de la carga hidráulica hasta de 35 m en casi 40 años, dando lugar a una variación (negativa) en la elevación del terreno superior a los -6 m para el acuífero confinado y de -8 m para el no confinado. Los caudales críticos de extracción en el acuífero, de 420 L/s a 470 L/s, se sobrepasaron desde el inicio de la operación del Sistema Peñón, causando la falla mecánica de los materiales del subsuelo para condiciones de confinamiento. Las simulaciones sugieren que, de continuarse con los actuales caudales de bombeo, la deformación total vertical del terreno será cercana a los 10 m para el año 2025.

En el artículo de Cabral-Cano *et al.* (2008) a partir de la técnica Interferometría Radar de Apertura Sintética Diferencial DInSAR obtiene mapas de desplazamiento a partir de imágenes ERS-1/2 adquiridas en los periodos (1, 2 de febrero y 16 de mayo) 1996, 1999, (7 de enero y 17 de marzo) 2000, (10 de octubre y 31 de diciembre) 2003 y (15 de abril y 24 de junio) 2005. Para la calibración de la técnica se utilizaron los datos de seis estaciones continuas de GPS. Se observó que la máxima tasa de subsidencia se presenta en Ciudad Nezahualcóyotl (este del área metropolitana de la Ciudad de México) con una tasa promedio de 378 mm/año,

que coincide con el límite del antiguo Lago de Texcoco justo antes de la colonización española. La región donde la tasa de subsidencia excede pocos mm/año se relaciona con la Unidad III (clasificación geotécnica; GDF, 2004) que corresponde a materiales lacustres. La región que experimenta una tasa de subsidencia despreciable corresponde con la Unidad I (clasificación geotécnica; GDF, 2004) que agrupa depósitos aluviales, tefra, tobas y lavas. Asimismo, se encontró una fuerte correlación entre el espesor del acuitardo arcilloso y las máximas tasas de subsidencia anual.

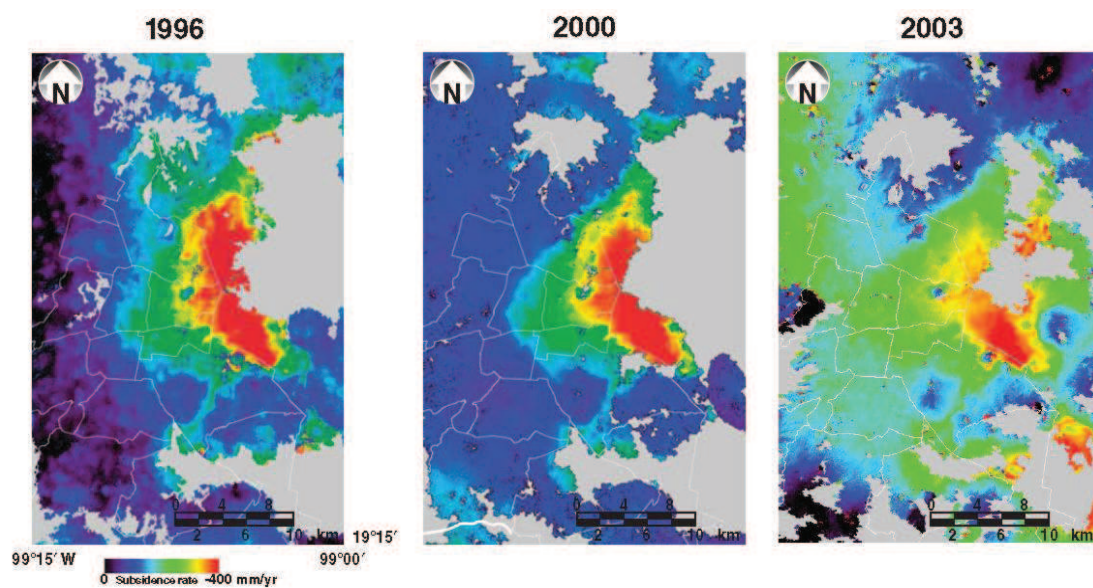


Figura 1.7. Tasa de Subsistencia anual para la Ciudad de México. Tomado de Cabral-Cano *et al.*, 2008.

En el artículo de López-Quiroz (2008) se utiliza la técnica Interferometría Radar de Apertura Sintética InSAR para procesar 39 imágenes ESA adquiridas en el periodo de noviembre de 2002 a marzo de 2007. Se utilizaron seis estaciones continuas de GPS (Cabral-Cano *et al.*, 2006) para comparar los resultados. Se encontró que el mayor desplazamiento se experimenta en Nezahualcóyotl y Chalco con cerca de 380 mm/año.

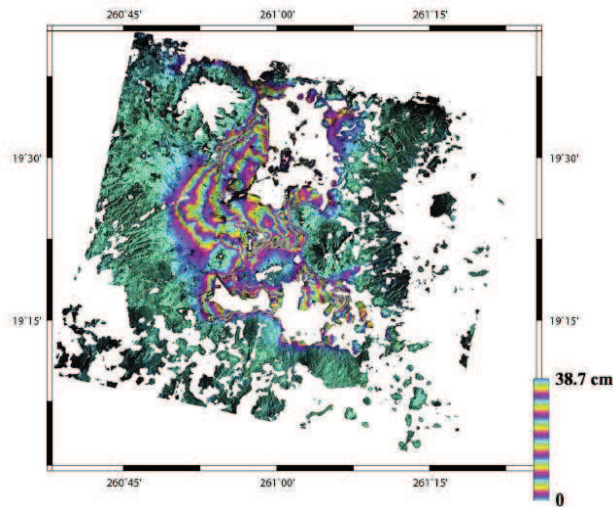


Figura 1.8. Tasa promedio de subsidencia vertical para el área metropolitana de la Ciudad de México. Tomado de López-Quiroz *et al.*, 2008.

En el artículo de Osmanoglu *et al.* (2010) utilizan la técnica de los reflectores permanentes o persistent scatterer InSAR (PSI) que en principio permite investigar la variación temporal en el patrón de subsidencia y un mejor entendimiento del comportamiento y características del sistema acuífero. Para ello se utilizaron 23 imágenes Envisat procesadas con la técnica PSI y 9 estaciones continuas de GPS para investigar la variación temporal y espacial de la subsidencia en la Ciudad de México desde principios del 2004 y mediados de 2006. Se encontró que las componentes horizontales de las series de tiempo de los GPS están afectadas por la tectónica regional pero los movimientos verticales pueden relacionarse directamente con la extracción de agua subterránea. La estación MOCS muestra movimiento horizontal en dirección NNE, que puede deberse a su ubicación, al noreste del Peñón de Los Baños. Se piensa que este movimiento puede reflejar *detachment* del paquete de sedimentos consolidados de la superficie de este patrón topográfico. Por otro lado, la inspección de los datos de GPS indica que las señales anuales y estacionales en la componente vertical es muy pequeña en la mayoría de los sitios, por tanto no se encontraron evidencias significativas de recarga asociada con la época de lluvias o algún otro proceso de recarga artificial. La subsidencia observada con la técnica PSI mostró una máxima tasa de 300

mm/año y en comparación con las medidas de los GPS presenta un error cuadrático medio de ± 6.9 mm/año.

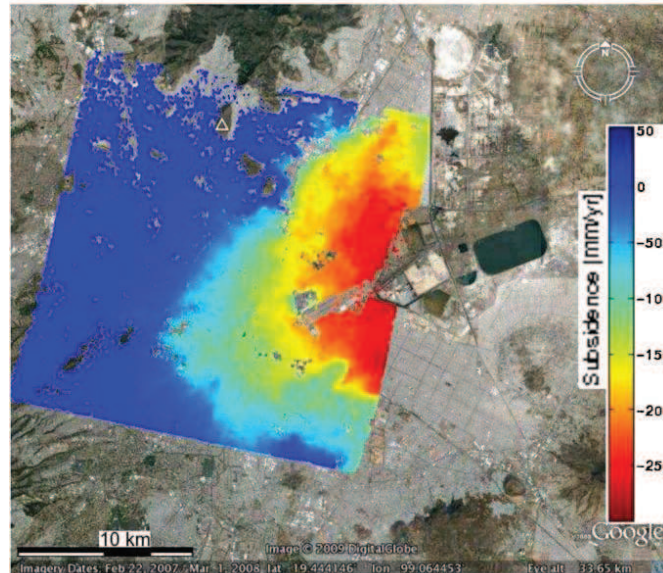


Figura 1.9. Tasa de Subsidencia anual para la Ciudad de México. Tomado de Osmanoglu *et al.*, 2010.

En Cabral-Cano *et al.* (2010b) se expresa que la magnitud de subsidencia no es necesariamente el factor más importante al evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura urbana al desarrollo de fallamiento superficial, sino que la principal condicionante de peligro por fracturamiento se manifiesta en aquellas zonas donde se observa un alto gradiente horizontal de subsidencia. Como muestra se presentan cuatro mapas del área nororiental de la zona metropolitana de la Ciudad de México, que se generaron mediante la técnica DInSAR en los periodos de 15/04/2005-24/06/2005, 21/09/2005-26/10/2005, 20/01/2006-24/02/2006 y 05/05/2006-09/06/2006. Se encontró que las áreas con mayor gradiente horizontal y con mayor vulnerabilidad a experimentar daños en la infraestructura urbana se localizan en: (1) la vertiente sur de la Sierra de Guadalupe, en especial en las laderas noroeste, oeste y sur del cerro Chiquihuite y la ladera este del Puerto el Panal. (2) Las laderas sur y este del parque Tepeyac, al norte de la Av. Martín Carrera y al oeste de la Av. Eduardo Molina. (3) El flanco norte del Peñón de los Baños en el área de la Unidad San Juan de Aragón. (4) La zona al sur del

deportivo Galeana y que incluye al bosque de San Juan de Aragón. (5) El corredor en dirección noreste que se encuentra al noreste del Parque Nacional Tepeyac y delimitado entre el Gran Canal del Desagüe y la Vía Morelos.

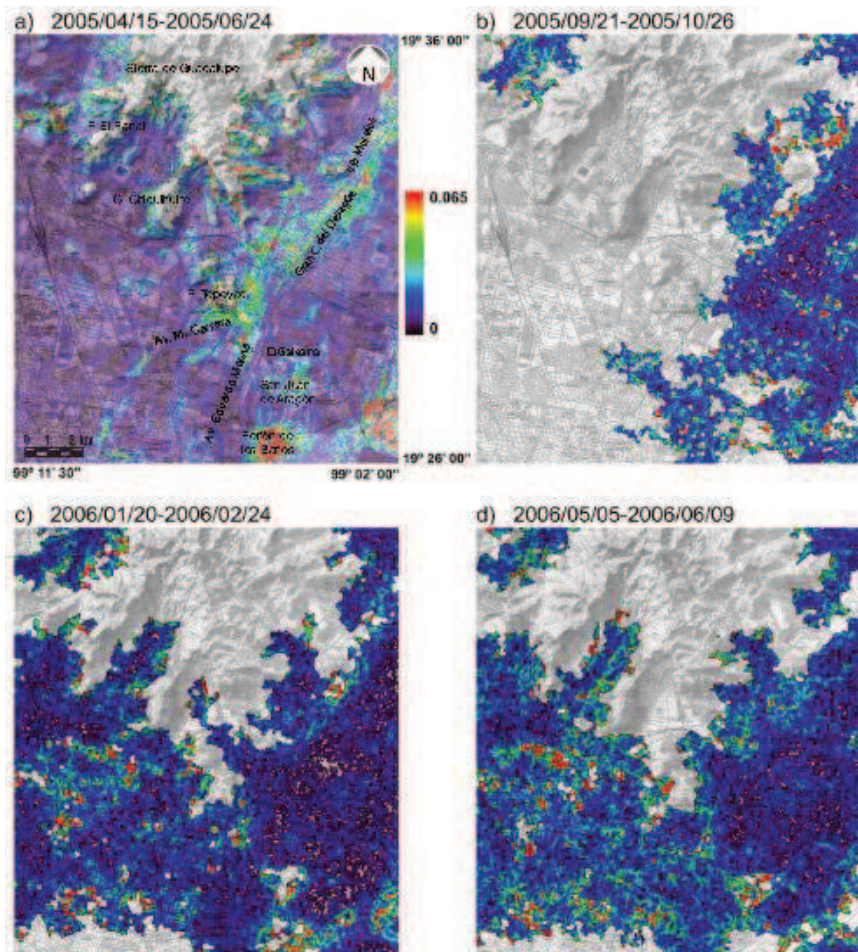


Figura 1.10. Mapas de gradiente horizontal de subsidencia para periodos comprendidos entre abril de 2005 y junio de 2006. Tomado de Cabral-Cano *et al.*, 2010b.

En el estudio de Carreón-Freyre (2011) se señala que el hundimiento de la superficie de la Ciudad de México se presenta de forma irregular y se acompaña por el fracturamiento del subsuelo que conlleva la afectación de la infraestructura urbana. Destaca el hecho de que la infraestructura urbana de la Delegación Iztapalapa (DI) ha sido afectada desde los 60's debido al hundimiento y fracturamiento del subsuelo, debido a la extracción del agua subterránea en esta zona. Se encontraron cuatro sistemas de fracturas, el primer sistema tiene

orientación similar al borde de la Sierra de Santa Catarina cruzando la DI con orientación NE-SW; el segundo sistema se alinea con la Calzada Zaragoza con orientación WNW-ESE, se cruza con el primer sistema en la zona del Peñón del Marqués; el tercer sistema corresponde a fracturas de tensión por deslizamiento gravitacional que rodean el cono volcánico del Peñón del Marqués; y el cuarto sistema se ubica en la Colonia San Lorenzo Tezonco con dirección variable entre NE-SW y N-S. Estas fracturas se forman mediante mecanismos combinados de subsidencia gradual, consolidación diferencial entre estratos arcillosos, rocas y otros medios granulares. Se concluye que el fenómeno de fracturamiento es de carácter continuo y requiere monitoreo y tratamiento constante; de manera que las fallas preexistentes pueden renovar su desplazamiento aunque hayan recibido tratamiento, por lo cual, las medidas de mitigación también deben ser monitoreadas continuamente para asegurar su funcionamiento adecuado.

Los trabajos expuestos anteriormente destacan la importancia que toman los métodos de percepción remota en la investigación de la subsidencia ya que cubren extensas áreas y aportan numerosos datos, además, minimizan esfuerzos y costos en comparación con los laboriosos trabajos de campo que tendrían que realizarse para cubrir la misma área. En la Ciudad de México, los métodos InSAR han precisado tasas de subsidencia de 378 mm/año (Cabral-Cano *et al.*, 2008), 380 mm/año (López-Quiroz, 2008) y 300 mm/año (Osmanoglu *et al.*, 2010). La última medida se deriva de la técnica de los reflectores permanentes PSI que se presume es más precisa y en el caso de la Ciudad de México arroja un error cuadrático medio de 6.9 mm/año (Osmanoglu *et al.*, 2010).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA: VULNERABILIDAD Y SUBSIDENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

El concepto de vulnerabilidad acuífera se refiere a la susceptibilidad que posee el agua subterránea a ser contaminada por medio de alguna fuente natural o antropogénica, que incremente las concentraciones de una sustancia existente, o bien, que incorpore una nueva sustancia en el subsuelo que resulte tóxica para el medio ambiente y, consecuentemente, para la salud humana. De ésta forma, puede hablarse de vulnerabilidad intrínseca o natural y vulnerabilidad específica; la primera, aborda las características hidrogeológicas particulares del medio, mientras que la segunda, se refiere a las características específicas de un tipo de contaminante.

Al caracterizar espacialmente las características hidrogeológicas del medio y superponer la ubicación de las fuentes potenciales de contaminación se crea un mapa de vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad sirven de herramienta para gestionar, regular y ordenar el territorio, de la misma forma, se utilizan en la toma de decisiones para determinar o redefinir el uso de suelo (EVREN, 1998).

A pesar de la controversia alrededor del uso de los mapas de vulnerabilidad debido a su naturaleza cualitativa que se evidencia en las diferencias que se presentan al aplicar diversas metodologías en un mismo sitio (Gogu y Dassargues 2001; Andreo *et al.*, 2006; Goldscheider *et al.*, 2004), en los últimos años se ha tenido un incremento en los artículos científicos referentes al agua subterránea que citan el término 'vulnerabilidad', ya que para el año 2000 tan sólo se tienen 64 artículos y para el año 2012 se registraron 341 artículos (Sciencedirect.com) referentes al tema (p. ej. Ibe *et al.*, 1999; Davis y Long, 2001; Cusimano *et al.*, 2003; Zektzer *et al.*, 2003; Vías *et al.*, 2004; Worrall y Kolpin, 2004; Panagopoulos *et al.*, 2005; El-Naqa *et al.*, 2006; Uddameri y Honnunar, 2006; Assaf y Saadeh, 2007; Raj-Pathak *et al.*, 2007; Boughriba *et al.*, 2009; Ramos-Leal *et al.*, 2010; Shirazi *et al.*, 2012; Anane *et al.*, 2012; entre otros).

Por otro lado, el término subsidencia se refiere al hundimiento diferencial del terreno, es decir, a una pérdida del nivel topográfico del suelo debido a su desplazamiento vertical. Este fenómeno es una problemática detectada a nivel mundial cuyo estudio ha sido impulsado desde 1964 por la UNESCO, que ha organizado ocho simposios internacionales que se llevaron a cabo en las ciudades de Tokio en 1969, Anaheim en 1976, Venecia en 1984, Houston en 1991, El Haya en 1995, Ravenna en 2000, Shanghai en 2005 y Querétaro en 2010 (EISOLS, 2010).

Actualmente, se sabe que el hundimiento del terreno es un fenómeno originado tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas o combinación de ambas (Zektser *et al.*, 2004). Los agentes naturales se derivan del contexto geológico del terreno, en el cual se consideran sus características estructurales, procesos morfotectónicos y de sedimentación, disolución de minerales, lixiviación de materiales, diapirismo (de evaporitas y arcillas) y el descenso del nivel estático en épocas de estiaje (Tomás, 2009). En las actividades antropogénicas se incluyen la extracción de minerales, donde pueden llevarse a cabo construcciones subterráneas como galerías y túneles, y la extracción de fluidos como agua subterránea e hidrocarburos, que generan la liberación de la presión de poro en el terreno.

En el año 2012 se han documentado alrededor de 1,170 artículos científicos (Sciencedirect.com) que tratan de la problemática de la subsidencia, de los cuales se han identificado 339 documentos que tratan de la subsidencia causada por extracción de agua subterránea (p. ej. Waltam, A. C., 1989; Zektser *et al.*, 2004; Casu *et al.*, 2005; Douglas, 2005; Phien-Wej *et al.*, 2005; Psimoulis *et al.*, 2006; Xiao-Qing Shi *et al.*, 2006; Carruth *et al.*, 2007; Chieh-Tung *et al.*, 2007; Marfai y King, 2007; Yuill *et al.*, 2009; Abidin *et al.*, 2010; Ávila-Olivera *et al.*, 2010; Bitelli *et al.*, 2010; Calderhead *et al.*, 2010; Chahoud *et al.*, 2010; Chieh-Hung *et al.*, 2010; López-Quiroz *et al.*, 2010; Osmanoglu *et al.*, 2010; Sarychikhina *et al.*, 2010; Teatini *et al.*, 2010; Tomás *et al.*, 2010; Ustun *et al.*, 2010; Cigna *et al.*, 2011; Cigna *et al.*, 2012; Chaussard *et al.*, 2013).

La Tabla 2.1 resume algunos sitios reportados con subsidencia que fueron extraídos de los artículos consultados, en ella se observa el hundimiento del terreno en m, tasa de subsidencia en mm/año, el periodo de obtención de los datos y la técnica utilizada en su determinación.

LUGAR	SUBSIDENCIA TOTAL ACUMULADA [m]	TASA DE SUBSIDENCIA [mm/año]	PERIODO	TECNICA	REFERENCIA
Aguascalientes, México	-	120	2003 - 2008	InSAR (PSI)	Cigna <i>et al.</i> , 2011.
Bangkok, Tailandia	2.05 ^a	30	1987 - 2002 ^a	Nivelación	Phien-Wej <i>et al.</i> , 2005.
Celaya, Guajajuato, México	-	100	-	InSAR	Ávila-Olivera <i>et al.</i> , 2010.
Chalco, México	-	150	2004 - 2006	InSAR (PSI)	Cigna <i>et al.</i> , 2011.
Choshuichi, Taiwán, China	-	100	1994 - 2006	GPS	Chieh-Hung <i>et al.</i> , 2010.
Ciudad de México, México	9 ^a	109 ^a 380 ^b 300 ^{c,d}	2000 ^a 2002 - 2007 ^b 2004 - 2006 ^c 2007-2011 ^d	Nivelación ^a InSAR ^{b,d} InSAR (PSI) ^c	(a) Santoyo-Villa, 2005. (b) López-Quiroz <i>et al.</i> , 2010. (c) Osmanoglu <i>et al.</i> , 2010. (d) Chaussard <i>et al.</i> , 2013.
Houston, Texas, EUA	4 ^a 2.3 ^c	15 ^b	1975 ^a 1995 - 2000 ^b	InSAR ^b	(a) Zektser <i>et al.</i> , 2004. (b) Casu <i>et al.</i> , 2005. (c) Waltam, A. C., 1989.
Jakarta, Indonesia	-	250-340 ^a 200-250 ^b	1979 - 1991 ^a 1982 - 2008 ^b	Nivelación ^b GPS ^b InSAR ^b	(a) Douglas, 2005. (b) Abidin <i>et al.</i> , 2010.
Kioto-Tokio, Japón	4	-	-	-	Waltam, A. C., 1989.
Konya, Turquía	-	1 - 5	2006 - 2010	GNSS*	Ustun <i>et al.</i> , 2010.
Los Ángeles, California, EUA	-	700	-	-	Zektser <i>et al.</i> , 2004.
Louisiana, EUA	-	23	-	-	Yuill <i>et al.</i> , 2009.
Mexicali, Baja California, México	-	180	2006 - 2007	DInSAR	Sarychikhina <i>et al.</i> , 2010.
Morelia, Michoacán, México	-	35 ^a 50 - 80 ^b	-	InSAR	(a) Ávila-Olivera <i>et al.</i> , 2010. (b) Cigna <i>et al.</i> , 2012.
Phoenix, Arizona, EUA	-	15	1992 - 2000	InSAR	Casu <i>et al.</i> , 2005.
Delta del Río Po, Italia	-	10	1992 - 2000	InSAR (PSI)	Bitelli <i>et al.</i> , 2010.
Queretaro, México	-	68	-	InSAR	Ávila-Olivera <i>et al.</i> , 2010.
Reno, Italia	-	60 - 80	1983 - 1987	Extensómetro	Chahoud <i>et al.</i> , 2010.
Valle de San Joaquin, California, EUA	9	-	1970	-	Zektser <i>et al.</i> , 2004.
Santa Cruz, Arizona, EUA	4.5	-	1948 - 1985	-	Zektser <i>et al.</i> , 2004.
Samarang, Indonesia	-	160	1997 - 2000	Nivelación	Marfai y King, 2007.
Su-Xi-Chang, China	-	30	1995 - 2000	Extensómetro	Xiao-Qing Shi <i>et al.</i> , 2006.
Taipei, China	-	1 - 8	1975 - 2003	Nivelación	Chieh-Tung <i>et al.</i> , 2007.
Thessaloniki, Grecia	-	100	1950 - 2005	GPS	Psimoulis <i>et al.</i> , 2006.
Toluca, Estado de México, México	-	100	2003 - 2008	DInSAR	Calderhead <i>et al.</i> , 2010.
Tucson, Arizona, EUA	1.09	70	1987 - 2005	Extensómetro y GPS	Carruth <i>et al.</i> , 2007.
Vega Media del Río Segura, Murcia, España	0.15	-	1993 - 2007	DInSAR	Tomás <i>et al.</i> , 2010.
Venecia, Italia	0.15 ^a	5 - 10 ^b	1985 - 2004 ^b	InSAR (PSI) ^b	(a) Waltam, A. C., 1989. (b) Teatini <i>et al.</i> , 2010.

Tabla 2.1. Localidades con medidas del hundimiento del terreno en m y/o tasa de subsidencia máxima en el periodo indicado y la técnica que los determina.

2.2 DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD

El concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se introdujo por Margat (1968), sin embargo, el término mejor definido lo asume Foster (1987) como 'aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie'. El concepto se ha discutido ampliamente, por lo que se distingue un grupo de autores que considera en primera instancia las propiedades intrínsecas o hidrológicas particulares del medio constitutivo del subsuelo (vulnerabilidad intrínseca) y otro grupo que se inclina por las características específicas de cierto tipo de contaminantes (vulnerabilidad específica).

En general, se considera que la vulnerabilidad acuífera es una propiedad semi-cuantitativa que mide la susceptibilidad que posee el agua subterránea a ser contaminada, es decir, que por alguna fuente natural o antropogénica se incrementen las concentraciones de una sustancia existente o se incorpore una nueva sustancia que pueda resultar tóxica para el medio ambiente y, consecuentemente, para la salud humana. Sin embargo, esta facilidad de incorporación del contaminante puede verse atenuada por las reacciones desencadenadas en la zona no saturada, por tanto, depende del tipo de material, de las reacciones geoquímicas y de la actividad biológica. Evidentemente, el nivel piezométrico del acuífero también tendrá un papel importante pues en los niveles someros será más factible la llegada del contaminante, no así en niveles profundos ya que la sustancia tendrá tiempo suficiente para incorporarse, transformarse o degradarse, sin embargo, esto también depende del tipo y de la cantidad del contaminante (Ramos-Leal, 2005).

Las fuentes potencialmente contaminantes pueden ser basureros, canales de aguas residuales, granjas, ladrilleras, panteones, terrenos industriales y agrícolas, gasolineras, mineras, ductos, etc. La ubicación de dichas fuentes es imprescindible para prevenir la contaminación del acuífero, pues de esta forma se puede controlar o contener el movimiento de las sustancias contaminantes en

esas zonas antes de proceder a la aplicación de alguna técnica de remediación en el subsuelo.

De lo anterior se desprende la necesidad de elaborar mapas de vulnerabilidad que permitan determinar la distribución de las zonas más (o menos) susceptibles a la contaminación, que puedan servir como herramientas para gestionar, regular y ordenar el territorio, o bien, para auxiliar la toma de decisiones relacionadas al uso de suelo (EVREN, 1998).

2.3 METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA

Con el propósito de implementar técnicas cartográficas para la caracterización espacial de la vulnerabilidad, se han propuesto diversas metodologías que se clasifican de acuerdo a las características hidrogeológicas del sistema (HCS), litología y permeabilidad, o mediante métodos paramétricos. Éstos últimos se subdividen en métodos matriciales (MS), sistemas de clasificación (RS), los modelos de superposición y conteo de puntos (PCSM). Los métodos matriciales (MS) utilizan un número restringido de parámetros cuidadosamente seleccionados, éstos son combinados mediante una serie de estrategias definidas para obtener la cuantificación de un grado de vulnerabilidad. Los sistemas de clasificación (RS) definen un intervalo de valores fijo a partir de la variación de cada parámetro que se considere adecuado, la suma de puntos de calificación da la evaluación requerida en ese sitio, el total de puntos obtenidos y su reclasificación que permite expresar un grado de vulnerabilidad relativa. En los modelos de superposición y conteo de puntos (PCSM) se asigna un multiplicador identificado como un peso asignado a cada parámetro. La calificación de cada parámetro se multiplica por su factor correspondiente y se suma para obtener la puntuación final en esa área; el sitio con mayor puntuación será el de mayor sensibilidad. Asimismo, se han desarrollado metodologías que se basan en simulaciones o modelos matemáticos que engloban procesos físicos, químicos y biológicos, así como aquellas que se basan en análisis estadísticos o geoestadísticos (Gogu y Dassargues, 1998).

2.3.1 Métodos matriciales (MS)

EKv (Auge, 1995) es un método para acuíferos libres que considera a la profundidad de la superficie piezométrica (E) y la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv), estos parámetros se les asigna un valor de 1 para baja vulnerabilidad y 5 para alta vulnerabilidad.

	Espesor de la zona subsaturada (E)				
[m]	> 30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
Índice	1	2	3	4	5

Tabla 2.2. Clasificación del espesor de la zona subsaturada y su índice correspondiente.

	Permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv)				
[m/día]	<1*10 ⁻³	>1*10 ⁻³ a 0.01	>0.001 a 1	>1 a 50	>50 a 500
Índice	1	2	3	4	5

Tabla 2.3. Clasificación del espesor de la permeabilidad vertical de la zona subsaturada y su índice correspondiente.

Kv	1	6	5	4	3	2
	2	7	6	5	4	3
	3	8	7	6	5	4
	4	9	8	7	6	5
	5	10	9	8	7	6
		5	4	3	2	1
	E					

Tabla 2.4. Matriz de vulnerabilidad según el método EKv.

Los valores de cada parámetro se suman resultando un índice final con un intervalo de valores de 2 a 10, asignando vulnerabilidad baja a valores de entre 2 y 4, vulnerabilidad media con valores de entre 5 y 7, y vulnerabilidad alta para los valores de 8 a 10.

2.3.2 Sistemas de Clasificación (RS)

GOD (Foster, 1987) es un método basado en tres parámetros (1) Grado de confinamiento hidráulico, (2) Ocurrencia del sustrato suprayacente y (3) Distancia al nivel del agua subterránea o al techo del acuífero. Los parámetros pueden tomar un valor entre 0 y 1. Deben considerarse a) el grado de consolidación, la presencia o disminución de permeabilidad, b) las características litológicas de porosidad relativa, permeabilidad y contenido de humedad o retención específica en la zona no saturada. También se contempla el grado de fisuración o capacidad de atenuación con un rango de 0.3 a 1.0. c) Determinación de la profundidad de la superficie freática en acuíferos no confinados o la profundidad del techo de acuíferos confinados, en escala de 0.3 a 0.9. Para cada parámetro se obtiene un índice, que se multiplican para obtener el índice total que se utiliza para clasificar la vulnerabilidad de contaminación del acuífero (Ramos-Leal, 2005).

Aquifer Vulnerability Index o AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1995) es una metodología que utiliza la resistencia hidráulica al flujo vertical del agua cuando pasa por diferentes materiales de la zona no saturada. La resistencia hidráulica total indica el tiempo aproximado en que un flujo atravesará la zona no saturada por unidad de gradiente de carga. Esta resistencia hidráulica se calcula por medio de la expresión:

$$c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i}{k_i} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde b_i es el espesor de cada capa de la zona no saturada y k_i es la conductividad hidráulica de cada capa.

Para obtener el mapa de vulnerabilidad se utiliza el $\log c$ en cada punto. Posteriormente se interpolan los valores de $\log c$ para zonificar la resistencia hidráulica en todo el acuífero.

2.3.3 Modelos de Superposición y Conteo de Puntos (PCSM)

DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) cuyo nombre deriva de un acrónimo que considera siete parámetros hidrogeológicos como son la profundidad del agua D, la recarga neta R, la litología del acuífero A, el tipo de suelo S, la pendiente topográfica T, el impacto a la zona vadosa I y la conductividad hidráulica del acuífero C. El índice DRASTIC se obtiene según la ecuación:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \dots \dots \dots (2.2)$$

Donde:

$D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r, C_r$ son los valores de los parámetros considerados

$D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w, C_w$ son los factores de ponderación correspondientes a cada parámetro.

SINTACS (Civita y De Maio, 1997) es una derivación del DRASTIC (Aller, 1987) desarrollada en Italia, el nombre es un acrónimo que deriva de los parámetros considerados: S (Soggiacenza) profundidad del nivel estático, I (Infiltrazione efficace) recarga neta, N (Non-saturo, efecto di autodepurazione del) impacto a la zona vadosa, T (Tipología della copertura) tipo de suelo, A (Acquifero, caratteristiche idrogeologiche del) litología del acuífero, C (Conducibilità idraulica dell' acquifero) conductividad hidráulica del acuífero y S (Superficie topográfica, acclività della) pendiente topográfica.

$$\text{Índice SINTACS} = S_r 1 S_w 1 + I_r I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_r S_w \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde:

$S_r 1, I_r, N_r, T_r, A_r, C_r, S_r$ son los parámetros considerados

$S_w 1, I_w, N_w, T_w, A_w, C_w, S_w$ son los factores de ponderación correspondientes a cada parámetro.

EPIKARST ó EPIK (Doerfliger *et al.*, 1997) es un método diseñado para acuíferos kársticos que considera cuatro parámetros epikarst (E), cubierta protectora (P), condiciones de infiltración (I) y el desarrollo kárstico (K). Se entiende por Epikarst una zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad cercana a la superficie (Tripet *et al.*, 1997). El método asigna tres valores de acuerdo a su morfología: E1 cuando es una red kárstica típica de dolinas, depresiones, cavidades, grutas, etc.; E2 cuando hay superficies de debilidad que generan lineamientos y E3 cuando no se cuenta con morfología epikárstica. La cubierta protectora puede conformarse por suelo, depósitos glaciares, loess o depósitos aluviales a los que se les asignan cuatro valores (P1 a P4) según el espesor de la cobertura. Para la infiltración, se asigna el valor I1 en regiones accesibles para la infiltración directa, I2 e I3 en zonas con topografía de cero hasta 25%. En el desarrollo kárstico se asigna el valor K1 a una red kárstica bien desarrollada, K2 en zonas pobremente kársticas y K3 en acuíferos kársticos con descarga en medios porosos o que presentan fisuración subordinada.

El índice de vulnerabilidad se calcula mediante la ecuación:

$$Vi = (\alpha * E_i) + (\beta * P_i) + (\gamma * I_i) + (\delta * K_i) \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde:

Vi es el índice de vulnerabilidad

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ son los factores de ponderación para cada parámetro EPIK

$$\begin{array}{ll} \alpha = 3 & \gamma = 3 \\ \beta = 1 & \delta = 2 \end{array}$$

Ei, Pi, Ii, Ki son los valores relativos de los parámetros EPIK

El índice de vulnerabilidad de un medio kárstico varía de alta vulnerabilidad con valor de 9 unidades a baja vulnerabilidad con valor de 34 unidades.

2.3.4 Modelos matemáticos y análisis estadísticos

Entre la literatura frecuentemente se encuentran simplificaciones de modelos matemáticos de transporte de contaminantes que generan índices y clasificaciones de vulnerabilidad. Por ejemplo, Meeks y Dean (1991) desarrollaron un modelo unidimensional de transporte advección-dispersión con el propósito de obtener el índice de lixiviación potencial (LPI). Por su parte, Britt *et al.* (1992) combinaron datos de toxicidad crónica para compuestos con simulaciones de un modelo de transporte de agua subterránea e interpretaron los resultados como un índice.

Con respecto a los análisis estadísticos, cabe mencionar que con los trabajos de Worrall *et al.* (1998) se determinó que la probabilidad de detección de un compuesto se relaciona con los parámetros de adsorción y degradación. En Worrall (2002) se desarrolla una metodología bayesiana para calcular la vulnerabilidad de la zona de captación de pozos contaminados por pesticidas. En este caso la vulnerabilidad se basa en observaciones derivadas de muestreos.

2.3.5 Modificaciones de la metodología DRASTIC

Las técnicas descritas anteriormente son las más comunes, sin embargo, la metodología de vulnerabilidad más citada y desarrollada en los artículos científicos encontrados en Elsevier Springer y Taylor & Francis es DRASTIC (Aller, 1987). Esta observación se respalda en una revisión de 91 artículos científicos publicados durante el periodo 2012-2013, con temática de vulnerabilidad acuífera, donde se distinguió que más del 30% de artículos mencionan la metodología DRASTIC (Aller, 1987) y más del 60% de artículos se desarrolla la metodología DRASTIC (Aller, 1987) (p. ej. Sener, E. y Davraz, A., 2012; Huan, H. *et al.*, 2012; Wang, J. *et al.*, 2012; Pacheco y Sánchez Fernández, 2012; Ahn, J. J. *et al.*, 2012; Zhou, J. *et al.*, 2012; Yu, C. *et al.*, 2012; Qian, H. *et al.*, 2012; Alam, A. *et al.*, 2012; Kumar, S. y Thirumalaivasan, D., 2012; Al Hallaq, A. H. y Elaish, B.S.A., 2012; Güler, C. *et al.*, 2012; Mimi, Z. A. *et al.*, 2012; Van, P. E., *et al.*, 2012; Aidy, W. *et al.*, 2012; Shirazi, S. M. *et al.*, 2012; Abbasi, S. *et al.*, 2012; Ramos-Leal, J. A. *et al.*, 2012a;

Marin, A. *et al.*, 2012; Zhao, Y. Y. y Pei, Y. S., 2012; Ramos-Leal, *et al.*, 2012b; Lima, M. L. *et al.*, 2012; Chen, S. K. *et al.*, 2013; Ducci, D. y Sellerino, M., 2013; Li, R. y Merchant, J. W., 2013; Rezaei, F. *et al.*, 2013; Anane, M. *et al.*, 2013; Betancurt, T. *et al.*, 2013; Díaz, Y. *et al.*, 2013; Elewa, H.H. *et al.*, 2103).

Lo anterior, se debe a que considera la mayor cantidad de parámetros hidrogeológicos y a su facilidad para desarrollarse dentro de un Sistema de Información Geográfica como modelo de superposición y conteo de puntos (p.ej. Melloul y Colin, 1997; Al-Zabet, 2002; Murat *et al.*, 2003; Hammouri y El-Naqa, 2006; Assaf y Saadeh, 2007; Raj-Pathak *et al.*, 2007; Kabera y Zhahoui, 2008; Boughriba, et. a., 2009; Srinivasamoorthy *et al.*, 2011, Shirazi *et al.*, 2012; Anane *et al.*, 2012).

Además existen propuestas donde modifican la metodología al rectificar pesos, eliminar o agregar parámetros. Como ejemplos se tienen DRASTIC-Fm (Denny *et al.*, 2006) y DRASTIC-N (Herlinger y Viero, 2006).

DRASTIC-Fm (Denny *et al.*, 2006) es una metodología que se propuso para aquellos acuíferos con fracturamiento regional. En ella se implementa el parámetro Fm para referirse a las fallas y fracturas, a las que se les asignó una escala de valores y un peso de 3 unidades de acuerdo a su influencia en el comportamiento hidráulico y a su facilidad para transportar contaminantes hacia el acuífero. El parámetro Fm toma tres principales características que dictan el impacto de una red discreta de fracturas, relacionadas con la orientación, longitud y densidad (Singhal y Gupta, 1999); éstos mismos rasgos se utilizaron para asignar la escala parométrica.

Por tanto, el índice DRASTIC-Fm se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Índice DRASTIC-Fm} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + F_m F_w \dots \dots \dots (2.5)$$

Donde:

D_r , R_r , A_r , S_r , T_r , I_r , C_r , F_m son los valores de los parámetros considerados

$D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w, C_w, Fm_w$ son los factores de ponderación correspondientes a cada parámetro

DRASTIC-N (Herlinger y Viero, 2006) es una metodología que añade el parámetro N para referirse a la capacidad de adsorción del suelo y que tiene influencia en la movilidad de los contaminantes. Establecen el peso en 5 unidades y la valoración numérica la asignan de acuerdo a cinco clases.

De esta forma, el índice DRASTIC-N se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Índice DRASTIC-N} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + N_r N_w \dots \dots \dots (2.6)$$

Donde:

$D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r, C_r, N_r$ son los valores de los parámetros considerados

$D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w, C_w, N_w$ son los factores de ponderación correspondientes a cada parámetro.

2.4 SUBSIDENCIA POR EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

El término **subsistencia** es empleado para señalar principalmente un desplazamiento vertical del terreno, es decir, la disminución de la elevación topográfica con respecto al nivel original, aunque en menor medida también puede presentarse desplazamiento horizontal. Como parte de este proceso se desarrollan fisuras y fallas superficiales asociadas con áreas de desplazamiento horizontal vertical (Holzer, 1984). La teoría unidimensional de consolidación de suelos de Terzaghi (1925) explica la aparición de la subsistencia por medio de la extracción del agua gravitacional contenida en el espacio poroso del suelo. Posteriormente, Biot desarrolla la teoría tridimensional de consolidación para medios porosos que permite una simulación más real del proceso. Poland, Johnson, Figueroa, Yamamoto y Carbognini formaron el grupo de investigación denominado “Working Group on Land Subsidence Due to Grounwater Withdrawal” organizado por la UNESCO a finales de los 70’s (Poland, 1984) en donde se encontró que la subsistencia debido a la extracción del agua subterránea se

desarrolla en diversos escenarios como en rocas carbonatadas cubiertas por depósitos no consolidados o en sumideros viejos y rellenos de depósitos no consolidados, que se soportan por un cuerpo de agua que contienen, pero cuando este soporte se extrae, el material no consolidado puede caer en las aberturas subyacentes de las rocas carbonatadas y causar colapsos catastróficos. Destacan que con mayor frecuencia se presenta subsidencia en sedimentos clásticos recientes no consolidados o semiconsolidados con alta porosidad depositados en ambientes aluviales, lacustres o marinos someros donde se identifican sistemas acuíferos semiconfinados o confinados que contienen acuíferos de arenas y/o gravas de alta conductividad y baja compresibilidad que se intercalan con acuitardos arcillosos de baja conductividad vertical y alta compresibilidad (Poland, 1984). Se observó que este acuitardo arcilloso está constituido principalmente por Montmorillonita en los sistemas semiconfinados del suroeste de los Estados Unidos (Meade, 1967), Arizona (Poland, 1968), Texas (Corlis y Meade, 1964) y en la Ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959). También mencionan que se desarrolla subsidencia en áreas glaciales donde el basamento de rocas cristalinas es una fosa tectónica rellena por una capa delgada de till o de arena y grava sobre la que se encuentran depósitos de arcillas y limos. Este basamento se considera favorable para la construcción de estructuras subterráneas como túneles. Sin embargo, al atravesar el basamento, los túneles actúan como drenes, es decir, que disminuyen la presión de poro primero en las capas inferiores (acuífero confinado) y gradualmente en la capa arcillosa superior.

Otra de las aportaciones de Poland (1984) se efectuó cuando fundamenta el análisis de la relación cuantitativa entre la subsidencia y el abatimiento piezométrico por medio de la medición de la compresibilidad de los materiales en campo y en laboratorio.

2.4.1 Subsidencia en depósitos granulares

La subsidencia es un fenómeno naturalmente observado en sedimentos granulares mediante dos mecanismos de consolidación física: la expulsión de un fluido contenido en el poro intergranular (consolidación primaria) y, posteriormente,

por la reorientación de los granos que conforman el sedimento (consolidación secundaria). El Proceso se explica en la Figura 2.1.

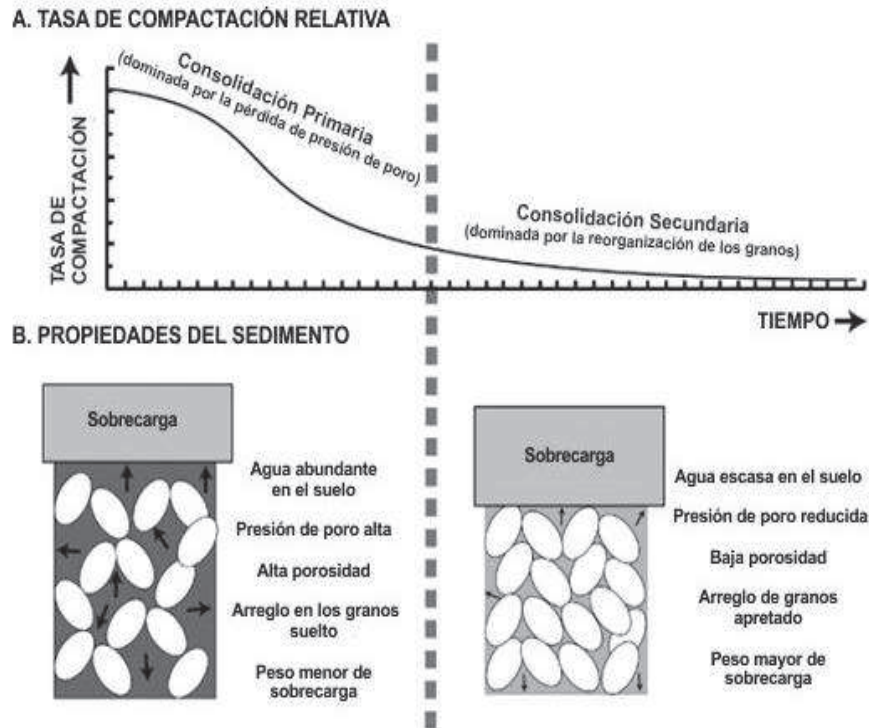


Figura 2.1. Respuesta de los depósitos granulares durante la consolidación. A) Gráfico que muestra la tasa de compactación relativa en la Consolidación Primaria y en la Secundaria. B) Esquema que muestra las propiedades de los sedimentos durante ambos tipos de compactación.

Modificada de Yuill (2009).

La expulsión de un fluido contenido en el poro se produce cuando el peso de los sedimentos es tal que se reduce la presión ejercida dentro del poro, esto provoca que el grano colapse, se reduzca el volumen del poro y con éste el volumen de depósito. Por otro lado, los sedimentos granulares pueden tener un empaquetamiento no orientado, es decir, que el diámetro mayor del grano no describa una orientación preferencial, por lo cual, se produce la reorientación de los granos en donde se modifica la posición relativa entre ellos, produciendo un arreglo más apretado. Cabe señalar, que la tasa de compactación en la consolidación primaria es mayor que la tasa de consolidación secundaria debido a que ésta última es un proceso gradual (Yuill *et al*, 2009).

En la Figura 2.2 se puede apreciar que una capa con alto contenido de arcilla, donde los granos se mantienen separados por la presión de un fluido, provoca una disminución mayor en el volumen inicial en comparación con la capa que posee un esqueleto bien consolidado donde los granos se mantienen fuertemente unidos y, por ende, se genera mínima disminución en el volumen.

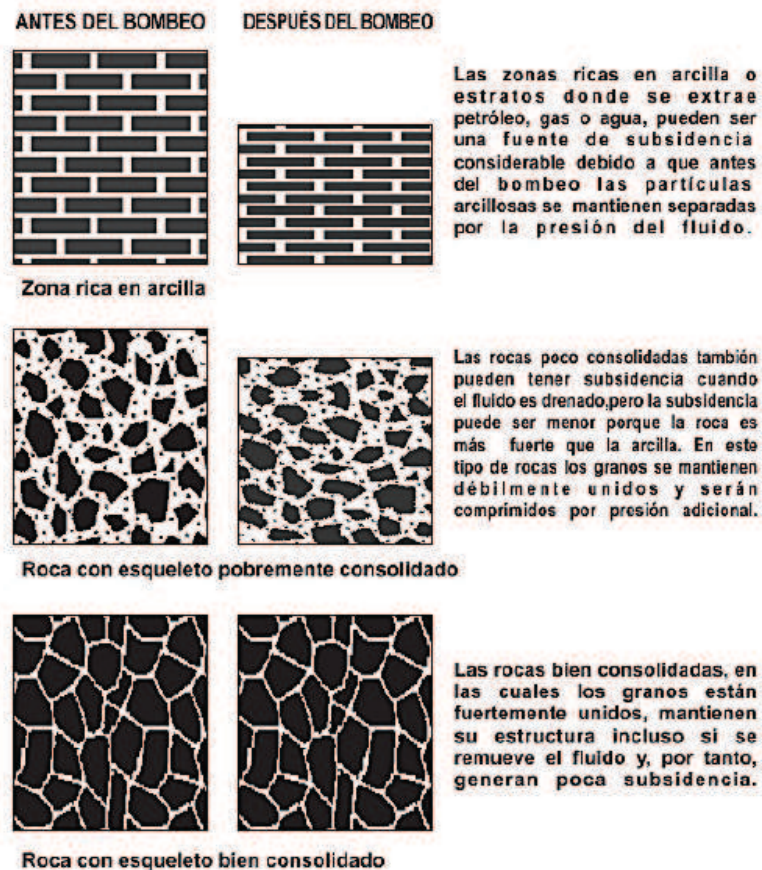


Figura 2.2. Respuesta de los esqueletos de roca ante la disminución en la presión de fluido
Modificada de Marsden y Davis (1967).

En términos generales, la magnitud de subsidencia depende del arreglo que presenten los granos, su composición mineral, el grado de cementación, de la permeabilidad y porosidad, el grado de confinamiento y de la compactación previa. Lo anterior indica que las capas con mayor capacidad de compresibilidad son las confinadas constituidas por materiales no consolidados como los sedimentos del

Terciario-Cuaternario, bien clasificados y dominados por Montmorillonita (Costa y Baker, 1981; Kasenov, 2001).

En el mundo se han reportado más de 40 ciudades con subsidencia entre las que se pueden mencionar ciudades importantes como Venecia ITA, Valle de San Joaquín EUA, Los Ángeles EUA, Shanghai CHN, Bangkok THA, Tokio JPN, Pekín CHN, Taipei TPE, México D.F., entre otras. La tasa de subsidencia más alta se reporta para Los Ángeles con alrededor de 70 cm/año (Zektser *et al.*, 2004), le siguen México D.F. con una tasa de 30 cm/año (Chaussard *et al.*, 2013) hasta 40 cm/año (López-Quiroz *et al.*, 2009) y Jakarta INA con menos de 34 cm/año (Douglas, 2005). A nivel nacional, la subsidencia del terreno se ha diagnosticado en ciudades como Puebla, Ciudad de México, Toluca, Querétaro, San Luis de la Paz, Celaya, San Luis Potosí, Morelia, Salamanca, Irapuato, Silao, León, Aguascalientes, Zamora de Hidalgo, Guadalajara, Ahuacatlán y Tepic (Chaussard *et al.*, 2013). Las tasas de subsidencia más altas, además de la reportada para la capital del país (30-40 cm/año), se encuentran en Mexicali con 18 cm/año (Sarychikhina *et al.*, 2010), en Celaya (Ávila-Olivera *et al.*, 2010) y Toluca (Calderhead *et al.*, 2010), ambas con 10 cm/año.

2.5 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE SUBSIDENCIA

Desde que se detectó el fenómeno de subsidencia no solamente surgió la necesidad de delimitar la extensión que abarca el área afectada sino también el análisis de causas, las velocidades en que subsidencia el terreno, los momentos críticos de aceleración del proceso así como la efectividad de las medidas de corrección y/o mitigación. La subsidencia es identificada desde la superficie del terreno donde se miden las deformaciones comúnmente mediante métodos topográficos o de instrumentación geotécnica, geodésica como el monitoreo de redes de puntos de referencia (benchmarks), estaciones totales, manómetros, inclinómetros y extensómetros. Actualmente, ya se han implementado nuevas técnicas para la medida de los desplazamientos verticales como GPS y los

sensores remotos, particularmente la Interferometría de Radar de Apertura Sintética InSAR.

Las redes de puntos de referencia recientemente se han utilizado en ciudades como Semarang, Indonesia donde se colocó una red de 38 puntos, mediante la que se determinó que la máxima tasa de subsidencia en el periodo de 1997 a 2000 es de 16 cm/año (Marfai, M. A. y King, L., 2007). En la Cuenca metropolitana de Taipei, China se tomaron datos de la nivelación de 406 puntos de referencia para elaborar mapas de contornos correspondientes al periodo de 1975 a 2003 (Chieh-Tung *et al.*, 2007).

Una gran variedad de extensómetros se desarrollaron después de la versión original para profundidades menores de 60 m, donde aparecieron las modificaciones propuestas por el United States Geological Survey (USGS) que se implementaron en ciudades como California, Nevada y Arizona, EUA a profundidades de 700 m. Posteriormente se propuso otro tipo de extensómetros que se colocaron también en California, Arizona, Louisiana y Texas a profundidades mayores de 1000 m (Poland, 1980).

En el abanico aluvial de Choshuichi, en el centro de Taiwán, los datos de desplazamiento vertical del GPS se utilizaron como indicadores de subsidencia, se correlacionaron con las variaciones en los niveles del agua subterránea y se propuso un modelo matemático que describe la relación anterior (Chien-Hung *et al.*, 2010).

En la actualidad se emplean técnicas combinadas para cubrir la totalidad del área de estudio, para respaldar los resultados obtenidos o bien para validar y/o calibrar una nueva técnica. Por ejemplo, en el área de Su-Xi-Chang, China el hundimiento se determinó a través de 5 grupos de extensómetros y más de 100 pozos de observación (Xiao-Qing *et al.*, 2006). Por otro lado, en Tucson y el Valle del Avra, Arizona, además de los 14 extensómetros verticales con que se contaban, en 1987 se colocaron 43 estaciones de control vertical que se estabilizaron mediante GPS con el propósito de mejorar la calidad y distribución de los datos (Carruth *et*

al., 2007). En el Valle de Mexicali, Baja California se añadieron 3 extensómetros, 6 inclinómetros y un testigo 3D a la red de medidores de deformación instalada por el CICESE, todos ellos con el propósito de determinar la distribución espacial y temporal de las deformaciones en la corteza. A su vez, estos datos fueron utilizados para la validación de la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética DInSAR (Sarychikhina *et al.*, 2010).

La percepción remota (remote sensing) define a cualquier medio de observación a distancia en el que no existe contacto físico entre el medio a estudiar y el sistema sensor. Se delimita el término percepción remota como aquellas técnicas que montadas sobre una plataforma espacial, aérea o terrestre, permiten estudiar el medio sin establecer contacto físico con él. Las técnicas geodésicas se pueden dividir en métodos láser, que incluyen el Escáner Láser, montado sobre plataforma terrestre (Terrestrial Laser Scanner) o aérea (LIDAR, ALS o ALTM); y radar que se subdivide según el tipo de plataforma empleada para la adquisición de las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) en: terrestre (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR), aerotransportado (Airborne Radar) y satélite (Spaceborne Radar). También pueden dividirse de acuerdo al algoritmo de procesamiento de las imágenes en técnicas de Interferometría SAR diferencial: convencionales (conventional DInSAR) y avanzadas (Reflectores Permanentes –o Permanent Scatterers– o la Técnica de los Píxeles Coherentes –o Coherent Pixels Technique–) (Hein, 2004; Soergel, 2010; Crosetto, M. y Monserrat, O., 2009; Moreira *et al.*, 2013).

La técnica Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) puede medir desplazamientos milimétricos del terreno a lo largo de la línea de vista del sensor con resoluciones variables en áreas de 10^4 a 10^5 km². Es una técnica que provee una enorme cantidad de información y de cobertura sinóptica, que frecuentemente resulta menos costosa que la realización de nivelaciones de mediciones puntuales y levantamientos de GPS (Galloway y Hoffmann, 2006; Galloway y Burbey, 2011).

Particularmente, la técnica de los reflectores permanentes o persistent scatterer InSAR (PSI) identifica una red de rasgos en el terreno que resultan persistentes,

temporalmente estables, que mantienen su coherencia y que son altamente reflectivos (Ferreti *et al.*, 2000, 2001; Werner *et al.*, 2003). Estos reflectores típicamente pueden ser rasgos culturales del desarrollo del paisaje como edificios, postes de servicio público, carreteras, entre otros (Galloway y Hoffmann, 2006; Galloway y Burbey, 2011) o bien de origen natural. La técnica de PSI y sus diferentes variantes permite obtener una serie de desplazamiento para cada punto reflector que permite investigar la variación temporal en el patrón de subsidencia y un mejor entendimiento del comportamiento y características del sistema acuífero. Además, puede mejorar significativamente la resolución espacial efectiva de los mapas de deformación donde se distinguen detalles que no pueden visualizarse con la técnica SAR convencional (Osmanoglu *et al.*, 2010).

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

3.1 INTRODUCCIÓN

Marsal y Mazari (1957) realizaron estudios detallados sobre la estratigrafía de secuencias superficiales (menores a 100 m de profundidad) en la Ciudad de México, así como numerosos ensayos de laboratorio. En 1959, presentaron una clasificación de suelos que ha servido de base conceptual para las zonificaciones posteriores (Reséndiz *et al.*, 1970; Del Castillo, 1978; Támez *et al.*, 1987; GDF, 2004). La zona del Lago se encuentra representada por secuencias arcillosas, limos y arenas con diferentes grados de cementación y consolidación. La zona llamada "de Transición" en el ámbito geotécnico es una franja que delimita la zona del lago y a su vez se ha dividido en: transición abrupta y transición gradual o estratificada. Finalmente, la zona de Lomas incluye las elevaciones mayores en Iztapalapa que corresponden a edificios volcánicos compuestos por andesitas, basaltos y rocas piroclásticas de edad pliocénica que afloran en la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués. En la secuencia estratigráfica somera predominan los sedimentos de ambiente lacustre y en algunas zonas aledañas a los edificios volcánicos existen depósitos de aluviales y coluviales (de pendiente) a diferentes profundidades. Sin embargo las depresiones topográficas localizadas entre las edificaciones volcánicas no solo presentan relleno sedimentario en el subsuelo, sino también secuencias compuestas por material piroclástico con diferentes grados de consolidación y rocas volcánicas.

El comportamiento hidráulico del acuífero de la Ciudad de México se ha documentado principalmente en los trabajos de Marsal y Mazari (1959), Rudolph (1988), Ortega-Guerrero (1988, 1989, 2004), Lesser y Asociados (1992, 1997, 1998), Vazquez-Sánchez (1995), entre otros. En ellos se reportan diversos valores para cada uno de los parámetros hidráulicos que caracterizan al acuífero, sin embargo, pocos son los documentos que muestran los datos y la técnica o método para determinarlos. Además, existe una problemática en la organización de las bases de datos que resulta de la censura-apertura de los pozos, de la confusión

de la clave de identificación y el nombre del mismo además de que, en algunos casos, provocan que las descripciones de los cortes litológicos no correspondan al pozo al que se les atribuye. Para el presente trabajo se vio la necesidad de reorganizar la base de datos de los pozos existentes en el acuífero de la Ciudad de México, confirmando la ubicación de los pozos, identificando sus claves correctas y asignando el corte litológico correcto, si fuese el caso. De manera que exista la certeza de obtener la correcta configuración espacial de los parámetros hidráulicos y que las asociaciones con otros parámetros sea consistente y válida.

3.2 GEOLOGÍA

3.2.1 FISIOGRAFÍA

La Ciudad de México se encuentra en parte sur de la denominada Cuenca de México que pertenece a la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), la cual se extiende desde las costas del Pacífico, en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978). Esta provincia tiene aproximadamente 1000 km de longitud y una extensión irregular entre los 80 y 230 km, se distribuye con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Figura 3.1).

La FVTM se divide en tres fragmentos con base a su geología y tectónica (Demant, 1978; Pasquaré *et al.*, 1988): un fragmento occidental entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los rifts de Zacoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986), un fragmento central, donde se localiza la zona de estudio, comprendido entre la junta triple, anteriormente mencionada, y el sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002), y un fragmento oriental entre el sistema anterior y la costa del Golfo de México (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Cabe mencionar, que la FVTM inició su actividad en el Mioceno Medio, dando lugar a la formación de rocas volcánicas, principalmente basaltos y andesitas, asociadas con tobas y cenizas volcánicas (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

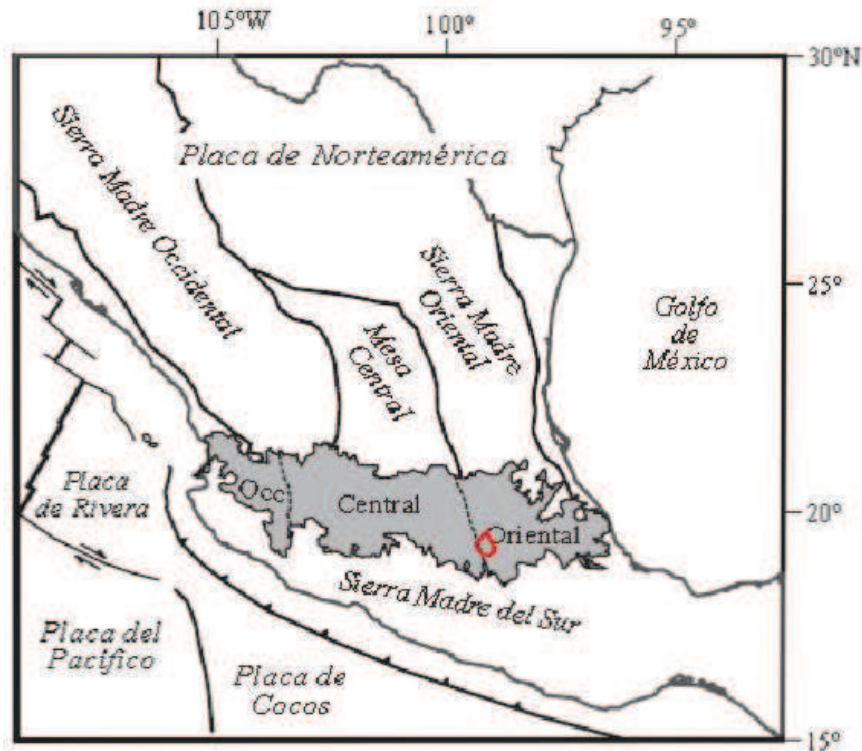


Figura 3.1. Localización de la Faja Volcánica Transmexicana y sus tres fragmentos (Tomado de Gómez-Tuena *et al.*, 2005). La línea roja representa al Distrito Federal (zona de estudio).

3.2.2 ESTRATIGRAFÍA

La estratigrafía de la Ciudad de México se distingue una secuencia cretácica calcárea que se considera como el basamento y está representada por las Formaciones Xochicalco, Morelos, Cuautla y Mexcala. En la **Formación Xochicalco (Kx)** (Fries, 1960) se reconoce una secuencia de calizas que se presentan en estratos medianos con laminación fina, con carbón en cantidades variables, vetillas de calcita y con presencia de pedernal hacia la cima; se desarrolló en una cuenca relativamente profunda en un ambiente marino durante el Aptiano y se le asigna un espesor mínimo de 500 m (Vázquez y Jaimes, 1989). Sobreyaciendo la secuencia anterior se encuentra la **Formación Morelos (Km)** (Fries, 1960) que es una secuencia de calizas y dolomías en estratos gruesos que

sobreyacen concordantemente a anhidritas laminares; el espesor encontrado en los pozos exploratorios Mixihuca-1 y Tulyehualco-1 es de 410 m y 610 m, respectivamente, y al sur de la Sierra Chichunautzin, en Morelos, pozo Ticumán 2 es de 900 m (López-Ramos, 1979). Se depositó en ambiente de plataforma durante Albiano-Cenomaniano Temprano. Se cree que el miembro evaporítico se encuentra a profundidad en el subsuelo de la Cuenca de México (Vázquez y Jaimes, 1989). Sobre ésta descansa la **Formación Cuautla (Kc)** (Fries, 1960) es una secuencia calcárea de facies de cuenca, banco y litoral depositada durante el Cenomaniano Tardío al Turoniano Tardío. Se constituye por calizas, calcarenitas, que presentan estratificación gruesa con presencia de biostromas de rudistas. Los pozos exploratorios Mixihuca-1 y Tulyehualco-1 (Figuras 3.2 y 3.3) encontraron su cima a los 1755 m y 2100 m, respectivamente. Su espesor varía entre 200 y 750 m (Vázquez y Jaimes, 1989). La **Formación Mexcala (Kmx)** fue definida por Fries (1960), constituye una secuencia flysch (De Cserna *et al.*, 1988) que se depositó durante el Coniaciano-Campaniano; presenta una interestratificación gradual rítmica de grauvacas (turbiditas), limolitas y lutitas cuyo espesor máximo es de 1500 m. Aflora al sur de la Sierra Chichinautzin (Vázquez y Jaimes, 1989) y se encontró en el subsuelo de la Ciudad de México por medio del pozo exploratorio Mixihuca-1 (Figuras 3.2 y 3.3), entre los 1720 y 1850 m.

Por otro lado, también se distingue una sucesión continental representada por el **Grupo Balsas (Teob)** (Fries, 1960), el cual es un conglomerado oligomíctico calizo con matriz limo-arcillosa, cementada por calcita y óxido de hierro, se presenta masivo con espesor máximo de 500 m, y es cubierto por una secuencia deleznable de arcilla, limo y arena con espesores de 800 a 2000 m. Contienen interestratificaciones de yeso y caliza lacustre lenticulares, derrames lávicos basálticos y de toba riolítica. Según Schlaepfer (1968) esta unidad aparece en los pozos Texcoco-1 y Roma-1 (Figuras 3.2 y 3.3), a profundidad de 2680 m. Le sobreyace discordantemente la Riolita Tilzapotla y las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Tardío; data del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Vázquez y Jaimes, 1989).

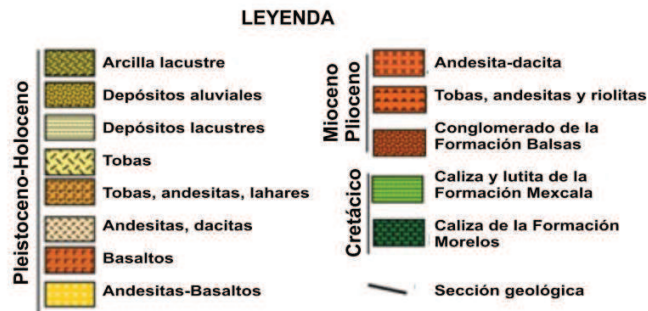
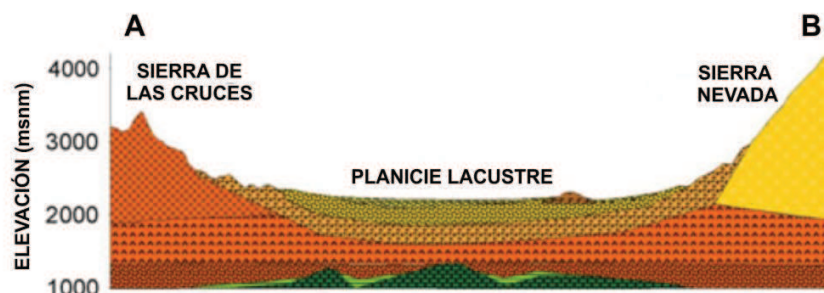
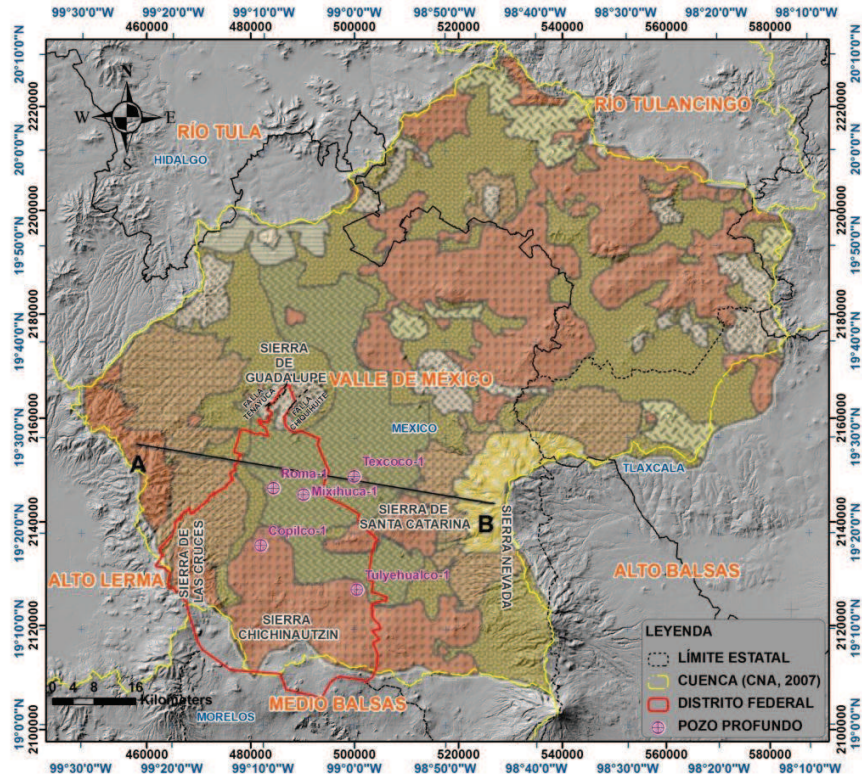
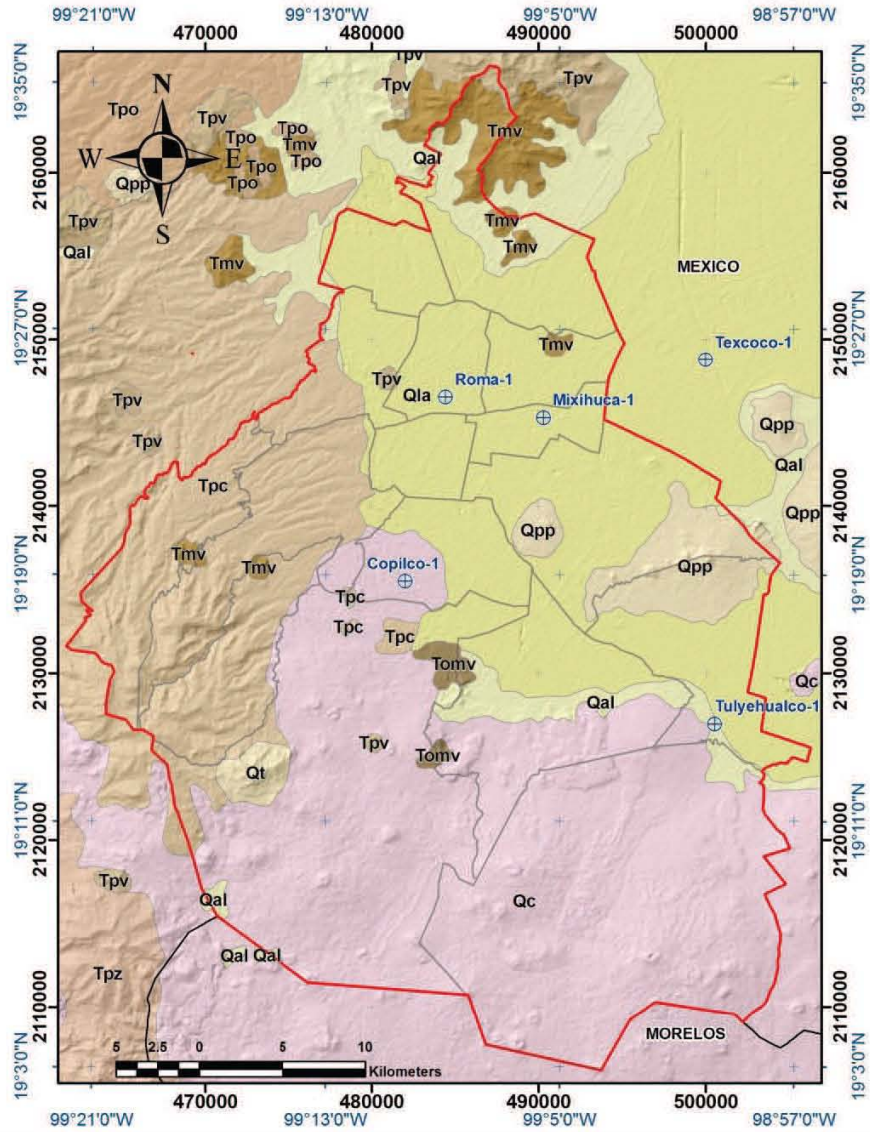


Figura 3.2. Arriba: Mapa de la Cuenca de México. (Mooser, 1996; Ramos-Leal *et al.*, 2010). Abajo: Sección geológica de la Cuenca de México (Vazquez y Jaimes, 1989; Ramos-Leal *et al.*, 2010).



LEYENDA	
	LÍMITE ESTATAL
	DISTRITO FEDERAL
	DELEGACIONES
	POZO PROFUNDO
GEOLOGÍA	
CLAVE: DESCRIPCIÓN	
	Qal Depósitos aluviales: material clástico-fluvial, sedimentos lacustres y depósitos volcánicos.
	Qla Depósitos lacustres: sedimentos clásticos y piroclásticos, arcillas, cenizas y pómez.
	Qc Fm. Chichinautzin: lavas andesítico-basálticas y andesíticas.
	Qt Fm. Tiáloc: coladas de lávicas, pómez y líticos.
	Qpp Fm. El Pino: flujos lávicos, tefra, lapillis y escorias.
	Tpz Fm. Zempoala: derrames de lava, capas volcanoclásticas y lahares.
	Tpc Fm. Las Cruces: depósitos piroclásticos, pómez, cenizas y material aluvial.
	Tpo Fm. Otomí: depósitos piroclásticos.
	Tpv Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano: tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas.
	Tmv Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío: tobas, brechas volcánicas y lavas.
	Tomv Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano: depósitos piroclásticos, tobas líticas, cristalinas y vítreas.

Figura 3.3. Mapa Geológico del Distrito Federal, (Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, 2012)

Más tarde se desarrollaría una serie vulcanosedimentaria en la que se distingue a las **rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv)** cuya composición varía de andesítica a riodacítica, también basáltica según las descripciones de los pozos Copilco-1, Mixihuca-1 y Roma-1. Se constituyen por tobas líticas cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados, que se interestratifican o cubren por derrámes lávicos. Esta unidad contiene capas de clásticos aluviales de espesor aproximado de 6 m (Vázquez y Jaimes, 1989). Las **rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv)** se constituyen por una secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas interestratificadas con brechas volcánicas (Vázquez y Jaimes, 1989). Sus rocas afloran al sur de la Cuenca de México, en el Distrito Federal en El Peñón de Los Baños y la base de la Sierra de Las Cruces. Se encontró en el pozo Texcoco-1 a profundidades desde 814 a 920 m; en el pozo Roma-1 a profundidades de 633 a 60 m; en el pozo Mixihuca-1 a profundidades de 880 a 1190 m; en el pozo Tulyehualco-1 desde 930 a 1740 m; y en el pozo Copilco-1 entre 1180 y 1580 m. Los **Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)** (Sergestrom, 1961) se constituyen de tobas cristalinas vítreas y pumíticas cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos, algunos autobrechados (Vázquez y Jaimes, 1989). Aflora en el Distrito Federal, en los flancos de la Sierra de Las Cruces y en la cima de la Sierra de Guadalupe. Esta unidad se encontró a profundidades de 315 a 648 m en el pozo Roma-1, y a profundidades de 550 a 1150 m en el pozo Copilco-1. Su máximo espesor expuesto es de 650 m. La **Formación Otomí (Tpo)** consiste de secuencias de flujos piroclásticos de cristales, de ceniza cristalina o vítrea, con fragmentos accidentales o juveniles separados por suelos, dentro de los flujos piroclásticos brechas volcánicas. Aflora al noroeste del Distrito Federal, en la Sierra de Monte Alto, en el estado de México, el espesor máximo que se le asigna es de 1300 m y su edad es del Plioceno Tardío (Vázquez y Jaimes, 1989). La **Formación Las Cruces (Tpc)** (Schlaepfer, 1968) es una sucesión de flujos piroclásticos no soldados de cenizas cristalinas, vítreas y pómez con o sin fragmentos y bloques accidentales, que se cubren o interestratifican con material aluvial o paleocanales fluviales. En las partes altas de la Sierra de Las Cruces las lavas se intercalan con

brechas y algunas veces culminan con domos; se encontró en el subsuelo del Distrito Federal por el pozo Copilco-1 (Figuras 3.2 y 3.3) a profundidades de 25 y 510 m; su espesor máximo estimado es 990 m. Su edad es del Plioceno Tardío (Vázquez y Jaimes, 1989). La **Formación Zempoala (Tpz)** (Fries, 1960; Schaefer, 1968) se constituye de lavas, brechas volcánicas, lahares y flujos piroclásticos producto de la actividad de dos centros volcánicos eruptivos alineados N-S. Aflora en el Cerro de Zempoala y sus alrededores, en los límites del estado de México y Morelos, donde el espesor máximo es de 1000 m.

El Cuaternario también se encuentra representado por una unidad vulcanosedimentaria donde se distingue la **Formación El Pino (Qpp)** (Vázquez y Jaimes, 1989), que es una secuencia formada por flujos lávicos con intercalaciones delgadas de trefra no consolidada, de caída, formada por cenizas cristalinas y vítreas, lapillis líticos y escoria tamaño lapilli. Su espesor máximo reconocido en los centros eruptivos es de 750 m y su edad es de 0.9 y 0.7 Ma. La **Formación Tláloc (Qt)** (Schlaepfer, 1968) agrupa coladas de lava con pómez en la base, líticos accidentales angulosos de tamaño lapilli, pómez y líticos accidentales, flujos de cenizas cristalinas vítreas y de pómez, con o sin lapillis y bloques líticos de composición mixta andesítica y dacítica. Su edad corresponde al Pleistoceno (Vázquez y Jaimes, 1989).

Durante el Cuaternario también se presentó un episodio efusivo, representado con la **Formación Chichinautzin (Qc)** (Fries, 1960; Bloomfield, 1975; Martín del Pozzo, 1982) consiste de lavas muy extensas, vesiculares, masivas o lajadas, de composición andesítico-basáltica y andesítica, de grano fino y medio. El espesor máximo asignado es de 1800 m; cubre discordantemente a la mayor parte de las unidades cretácicas y terciarias, cubre en discordancia a la Fm. El Pino y se interdigita con los depósitos lacustres y aluviales (Vázquez y Jaimes, 1989).

Finalmente, se presenta una sucesión sedimentaria que engloba a los depósitos lacustres y aluviales del Cuaternario. Los **Depósitos Lacustres (Qla)** corresponden a sedimentos clásticos y productos piroclásticos asociados a la actividad volcánica del estratovolcán Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin que

se depositaron en ambiente lacustre. Su espesor es variable entre 30 y 300 m; la edad que le corresponde es del Pleistoceno Tardío al Holoceno (SHAR, 1970; Marsal y Mazari, 1969; Vázquez y Jaimes, 1989). Los **Depósitos aluviales (Qal)** consisten de material poco consolidado compuesto de grava, arena, limo y arcilla, localmente contienen marga, tierra diatomácea, turba, loess y travertino (Fries, 1960; Fries, 1962; Vázquez y Jaimes, 1989).

3.3 UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS

En el acuífero de la Ciudad de México pueden distinguirse cuatro unidades hidrogeológicas (Herrera- Revilla y Cortés-Silva, 1989; Vázquez-Sánchez, 1995): un acuitardo en materiales lacustres Cuaternarios; acuífero en rocas volcánicas y materiales piroclásticos Cuaternarios y Plio-Cuaternarios; acuitardo en depósitos vulcanosedimentarios del Plioceno inferior, rocas andesíticas del Mioceno y rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno; y acuífero en rocas carbonatadas Cretácicas (Figura 3.4).

El **Acuitardo Superior** se extiende desde a lo largo de la traza del antiguo Lago de Texcoco (1519) en las planicies de Chalco, Texcoco y de la Ciudad de México (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004). El Acuitardo Superior alcanza sus espesores máximos en las planicies de Chalco con 120 m (Vázquez-Sánchez, 1995) y en el Distrito Federal con 95 m según los cortes litológicos proporcionados por el SACM.

Según Santoyo-Villa *et al.* (2005) el Acuitardo Superior se puede subdividir en:

- 1) Costra Superficial con espesor variable constituida por un relleno artificial heterogéneo.
- 2) Formación Arcillosa Superior con espesor variable entre 25 y 50 m, que se caracteriza por contener pequeños “lentes duros” de arena basáltica o pómez con espesor de algunos cm hasta 2 m.
- 3) Capa Dura constituida de limos arenosos, arcilla y algunas gravas cuyo espesor máximo es de 5 m.

- 4) Formación Arcillosa Inferior con espesor máximo de 15 m al centro del antiguo lago de Texcoco, se constituye por estratos de arcilla separados por “lentes duros” semejantes a los de la Formación Arcillosa Superior.

Bajo condiciones naturales, es decir, sin los efectos del bombeo, el Acuitardo Superior representa una zona de descarga, sin embargo, debido a la explotación intensiva que se lleva a cabo en el Acuífero Superior se indujo la inversión del gradiente hidráulico y actualmente representa una zona de recarga (Ortega-Guerrero, 1989).

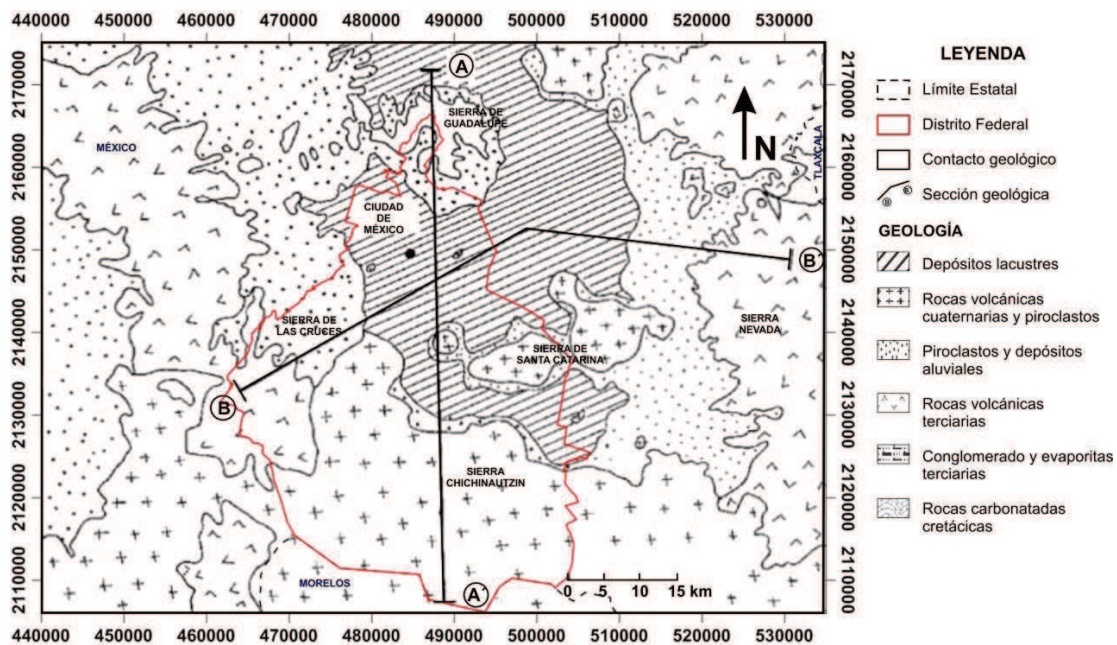


Figura 3.4. Mapa que muestra la distribución de las principales unidades hidrogeológicas del acuífero de la Ciudad de México en el Distrito Federal y la localización de las secciones hidrogeológicas A-A' y B-B'. Modificada de Vargas y Ortega (2004).

El **Acuífero Superior** está constituido por las unidades que se encuentran en contacto hidráulico debido a su posición estratigráfica. Incluye a los depósitos piroclásticos y las rocas andesítico-basálticas y basálticas del Cuaternario, material clástico aluvial (gravas y arenas) del Cuaternario, depósitos volcánicos del Pleistoceno (lapilli, cenizas, brechas), depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (gravas, arenas, limos, arcillas volcánicas interestratificadas con tobas).

Cuenta con una importante permeabilidad debido a la presencia de fracturas, cavernas y fragmentos del tamaño de piroclastos (Ortega y Farvolden, 1988). Se comporta como acuífero libre en las zonas altas, en los abanicos piroclásticos y en las llanuras aluviales y adquiere carácter semiconfinado en la parte central de la cuenca debido a las planicies lacustres del cuaternario, donde se extiende el material arcilloso del Acuitardo Superior (Leyva, 2010). La recarga principal hacia este acuífero se origina en la Sierra Chichinautzin al sur, en la Sierra de las Cruces al oeste y, en menor medida, al este en la Sierra de Santa Catarina (Figura 3.5).

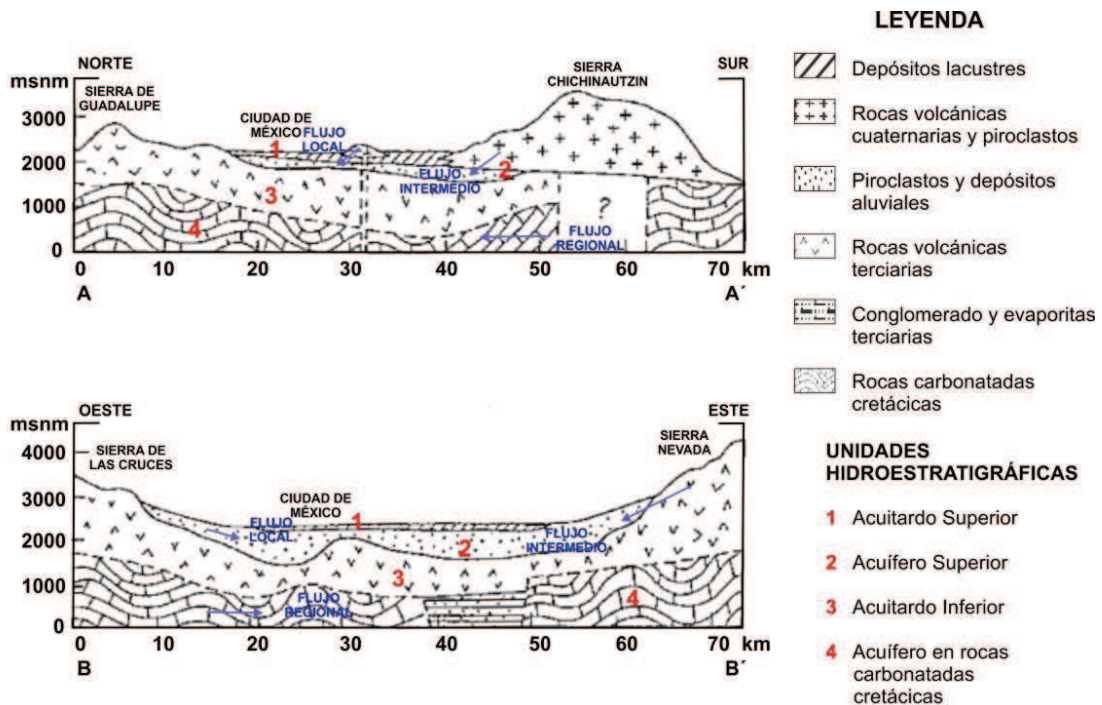


Figura 3.5. Secciones A-A' y B-B' que muestran la distribución en el subsuelo de las cuatro unidades hidrogeológicas del acuífero de la Ciudad de México. Modificado de Vargas y Ortega-Guerrero (2004).

El **Acuitardo Inferior** según Vázquez-Sánchez (1995) se constituye por los depósitos lacustres y piroclásticos del Plioceno inferior, rocas andesíticas del Mioceno, rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, el Grupo Balsas y la Fm. Mexcala. Se considera como un solo acuitardo debido a su baja permeabilidad a pesar de que contiene zonas más permeables debido al fracturamiento de las unidades volcánicas que lo conforman. Mantiene comunicación hidráulica con el

acuífero superior debido a su posición estratigráfica. Se piensa que existe filtración ascendente hacia el Acuífero Superior inducida por el bombeo de las unidades permeables superiores (Vázquez-Sánchez, 1995).

El **Acuífero en Rocas Carbonatadas Cretácicas** se constituye por las unidades calcáreas del Cretácico que presentan permeabilidad por fracturamiento y disolución; se les asigna un espesor estimado de 2000 m (Ortega y Farvolden, 1998).

3.4 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Como se mencionó anteriormente, existen diversos documentos que tratan de la hidrogeología de la Ciudad de México. En este apartado se retoman algunos de ellos que aportan valores para los parámetros hidráulicos del acuífero y se resumen en la Tabla 3.1.

Según Vargas y Ortega-Guerrero (2004), el espesor del acuitardo superior es aproximadamente 85 metros y sus valores de conductividad oscilan entre $1.03 \cdot 10^{-4}$ a $2.25 \cdot 10^{-5}$ m/d. Por otro lado, Lesser y Asociados (2000) mencionan la conductividad hidráulica varía entre $8.64 \cdot 10^{-4}$ y $8.64 \cdot 10^{-2}$ m/d y que su coeficiente de almacenamiento específico es de 0.05 m^{-1} .

Con respecto a los depósitos aluviales, Lesser y Asociados (2000) mencionan que poseen una conductividad hidráulica de 0.5 a 449.28 m/d, su coeficiente de almacenamiento específico presenta valores de $3.1 \cdot 10^{-7}$ a $9.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ y el rendimiento específico oscila entre 0.1 y 0.18 .

Para los depósitos lacustres Marsal y Mazari (1956) determinan una conductividad hidráulica de 0.01 a 0.86 m/d y le asignan un espesor aproximado de 400 metros.

Las rocas volcánicas del Cuaternario poseen diferentes intervalos de conductividad hidráulica. Según las interpretaciones de Vázquez-Sánchez (1995) su conductividad es de 42.34 m/d, Lesser y Asociados (2000) le asignan un intervalo de conductividad de 1.47 a 1987.20 m/d, mientras que Ortega-Guerrero y

Farvolden (1988) la determinan en 0.43 m/d. Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento específico es de $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ y el rendimiento específico de 0.08 (Vázquez-Sánchez, 1995).

UNIDAD/MATERIAL	T [m ² /d]	K [m/d]	Ss [m ⁻¹]	Sy	REFERENCIA
Arcilla lacustre	0.0216	-	-	-	Lesser y Asociados, 1992 y 1997
	-	8.64E-04 a 8.64E-02	0.05	-	Lesser y Asociados, 2000
	-	1.03E-04 a 2.25E-05	-	-	Vargas y Ortega-Guerrero, 2004
Depósitos aluviales	-	-	2.10E-03	0.17	Vazquez-Sánchez, 1995
	-	-	-	1.4 a 3.5	Sánchez-Díaz y Gutiérrez-Ojeda, 1997
	-	0.50 a 449.28	3.1E-7 a 9.4E-5	0.01 a 0.18	Lesser y Asociados, 2000
Depósitos lacustres	-	0.01 a 0.86	-	-	Marsal y Mazari, 1956
Rocas volcánicas basálticas del Cuaternario	-	86.40 a 8640.00	-	-	DDF, 1984
	-	0.43	-	-	Ortega y Farvolden, 1988
	-	-	-	0.1 a 0.27	Lesser y Asociados, 1992 y 1997
	-	42.34	3.20E-03	0.08	Vazquez-Sánchez, 1995
	-	1.47 a 1987.20	-	-	Lesser y Asociados, 2000
Fm. Tarango	-	0.09 a 864.00	-	-	DDF, 1984
	-	4.32	-	-	Ortega y Farvolden, 1988
	-	-	-	0.4 a 0.7	Sánchez-Díaz y Gutiérrez-Ojeda, 1997
	-	0.17 a 8.64	-	0.014 a 0.11	Lesser y Asociados, 2000
Rocas volcánicas basálticas y andesíticas	-	8.64E-04 a 8.64	-	-	DDF, 1984
	-	8.64E-03	-	-	Ortega y Farvolden, 1988
	-	-	-	0.4	Sánchez-Díaz y Gutiérrez-Ojeda, 1997
	-	1.21 a 501.12	-	0.03 a 0.12	Lesser y Asociados, 2000
Rocas carbonatadas cretácicas	-	0.09 a 864.00	-	-	DDF, 1984
	-	0.86	-	-	Ortega y Farvolden, 1988

Tabla 3.1. Resumen de parámetros hidráulicos determinados para el acuífero de la Ciudad de México.

A la Fm. Tarango se le ha asignado un intervalo de conductividad hidráulica de 0.09 a 864 m/d (DDF, 1984) y desde 0.17 a 8.64 m/d (Lesser y Asociados, 2000). El rendimiento específico varía de 0.014 a 0.11 (Lesser y Asociados, 2000).

Para Lesser y Asociados (2000) las rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Terciario poseen una conductividad hidráulica entre 1.21 a 501.12 m/d, el Gobierno del Distrito Federal (1984) la determina de $8.64 \cdot 10^{-4}$ a 8.64 m/d, y Ortega y Farvolden (1988) la proponen de $8.64 \cdot 10^{-3}$ [m/s]. En cuanto al rendimiento específico, Lesser y Asociados (2000) lo infieren de 0.03 a 0.12 .

Finalmente, a las rocas carbonatadas cretácicas se les ha determinado un espesor mayor a 2000 metros y una conductividad hidráulica de 0.09 a 864 m/d (DDF, 1984) y específicamente de 0.86 m/d (Ortega-Guerrero y Farvolden, 1988).

3.5 PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO

La red diseñada para el monitoreo piezométrico en el DF, según los hidrógrafos proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México comienza en 1990. En trabajos hidrogeológicos recientes se pueden encontrar configuraciones de profundidad del nivel estático con base en la red del SACM para los años 1985, 1990, 1995, 2000 y 2003 (Herrera-Zamarrón *et al.*, 2005). En este apartado se retoman las últimas dos configuraciones de profundidad del nivel estático publicadas de manera que se establezca un antecedente en las condiciones actuales de estos niveles.

A partir de la década de los 90's, en cada una de estas configuraciones de profundidad del nivel estático se aprecia que los niveles en la planicie se encuentran entre 30 y 70 m, mientras que para los altos topográficos los niveles aumentan de 70 a más de 100 m de profundidad. Cabe destacar que las menores profundidades se localizan al oriente de la ciudad, en las cercanías del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y en el municipio de Nezahualcóyotl.

Particularmente, en la configuración de los niveles piezométricos para el año 2000 (Herrera-Zamarrón *et al.*, 2005), la profundidad en la zona del aeropuerto internacional varía entre 30 y 40 m, hacia el norte del Cerro de la Estrella las profundidades aumentan a 60 y 70 m. En las faldas de la Sierra de Santa Catarina los niveles piezométricos se encuentran desde 40 m. En la zona sur, en las delegaciones Xochimilco y Tláhuac las profundidades oscilan entre 50 y 40 m. Mientras que en los altos topográficos de la sierra Chichinautzin los niveles varían de 80 a 150 m y en la Sierra de Las Cruces los niveles oscilan entre 80 y 140 m (Figura 3.6 Izquierda).

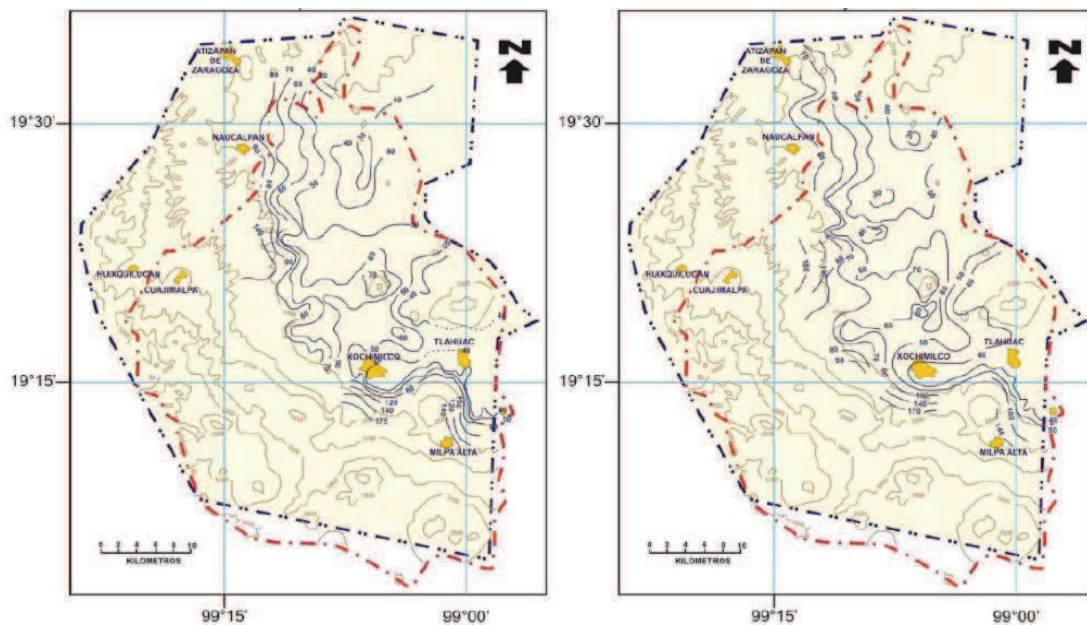


Figura 3.6. (Izquierda) Profundidad del nivel estático para el año 2000. (Derecha) Profundidad del nivel estático para el año 2003. Tomadas de Herrera-Zamarrón *et al.*, 2005. En ambas figuras, la línea discontinua roja representa el límite del Distrito Federal, la línea discontinua negra representa el límite del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la línea café representa la curva de nivel en msnm, la línea negra representa la profundidad del nivel piezométrico y los polígonos amarillos representan los poblados principales.

En la configuración del nivel estático 2003 (Herrera-Zamarrón *et al.*, 2005), se observa que en las cercanías del aeropuerto internacional de la Ciudad de México los niveles oscilan entre 30 y 40 m aumentando hasta 50 m en la delegación Venustiano Carranza. En las faldas del cerro de la Estrella las profundidades varían entre 60 y 70 m, hacia la zona de Xochimilco y Tláhuac disminuyen a 40 y 50 m. En las faldas de la Sierra Chichinautzin varían desde 70 a 170 m y en la Sierra de Las Cruces se tiene profundidades de 80 a 180 m (Figura 3.6 Derecha).

En las configuraciones del nivel estático anteriormente descritas (Figura 3.6), se observa que los niveles piezométricos más someros (30-40 m) se localizan en la parte NE y SE de la planicie así como al E y NW de la Sierra de Santa Catarina (40-60 m) donde existen los mayores espesores del acuitardo arcilloso, es decir, que es la parte que actualmente tiene una respuesta de acuífero confinado. Por otro lado, los niveles estáticos relativamente profundos (60-180 m) se localizan en la parte central, NW y SW de la planicie lacustre así como en las faldas de las

sierras de Guadalupe, Las Cruces y Chichinautzin donde el acuífero responde como libre. Asimismo, ambas configuraciones seguramente carecen de datos en las faldas de la sierra de Santa Catarina ya que los niveles estáticos deben superar los 60 m de profundidad comportándose como acuífero libre al igual que en las sierras anteriormente mencionadas.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DRASTIC-Sg

4.1 INTRODUCCIÓN

Para la configuración espacial de la vulnerabilidad en el acuífero de la Ciudad de México se eligió utilizar el método DRASTIC propuesto por Aller (1987), debido a que se considera la metodología más apropiada ya que incluye los parámetros necesarios para evaluar el movimiento de los contaminantes a través de la superficie del terreno hasta llegar a infiltrarse en el acuífero, por medio de siete parámetros hidrogeológicos: la profundidad del agua subterránea D, la recarga neta R, la litología del acuífero A, el tipo de suelo S, la topografía T, el impacto a la zona vadosa I y la conductividad hidráulica C del acuífero.

Sin embargo, DRASTIC (Aller, 1987) se ha criticado ampliamente ya que muchos autores consideran que al utilizar diversos parámetros, que no necesariamente se vinculan con la vulnerabilidad de un sitio en particular, se puede enmascarar el efecto de aquellos parámetros que tienen verdadera influencia en la vulnerabilidad (Vbra and Zaporozec 1994; Merchant 1994). Asimismo, argumentan que la selección de estos parámetros se basa en juicios cualitativos y no en estudios cuantitativos (Garrett *et al.* 1989). Por otro lado, en los supuestos del método se desprecia el efecto de factores científicamente definidos como capacidad de sorción, tiempo de transporte y dilución (Rosen 1994). En cuanto a la valoración de la vulnerabilidad, mencionan que el sistema sobreestima la vulnerabilidad de los acuíferos en medios porosos en comparación con los acuíferos en medios fracturados (Rosen 1994). Además, es difícil realizar una prueba de exactitud del modelo ya que se requiere que un contaminante con las propiedades asumidas por el modelo (introducido desde la superficie, se transporta verticalmente hacia el acuífero por medio de la precipitación aprovechando la movilidad del agua) se deposite sobre la zona de prueba con una concentración uniforme y por un período de tiempo considerable que permita que el sistema hidrogeológico responda (Rosen 1994).

Entre las ventajas del método DRASTIC (Aller, 1987) se encuentra que cubre áreas extensas a bajo costo derivado de la facilidad para conseguir los datos requeridos (Aller, 1987). Por otro lado, la selección de los siete parámetros de la metodología y su interrelación disminuye la probabilidad de pasar por alto algún parámetro importante, restringe el efecto de un error incidental en el cálculo de un parámetro y mejora la exactitud estadística del modelo (Rosen, 1994). Por otro lado, la metodología DRASTIC puede utilizarse en acuíferos libres y confinados (Fritch *et al.*, 2000; Hammouri y El-Naqa, 2006) ya que el mismo acuífero puede variar sus condiciones de confinamiento de un área a otra, sin embargo, esto no es muy común en acuíferos que cubren áreas extensas (Aller, 1987). Este método da resultados relativamente precisos para regiones amplias con una estructura geológica compleja, a pesar de la ausencia de mediciones de parámetros específicos que los métodos más especializados requerirían (Kalinski *et al.*, 1994; McLay *et al.*, 2001).

Dada su estructura como método de superposición y conteo de puntos, DRASTIC (Aller, 1987) es la metodología más utilizada pues se ha documentado en diversos trabajos de investigación (p. ej. Melloul y Colin, 1997; Al-Zabet, 2002; Murat *et al.*, 2003; Hammouri y El-Naqa, 2006; Assaf y Saadeh, 2007; Raj-Pathak *et al.*, 2007; Kabera y Zhahoui, 2008; Boughriba, *et al.*, 2009; Srinivasamoorthy *et al.*, 2011, Shirazi *et al.*, 2012; Anane *et al.*, 2012).

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto de tesis se inició con una investigación que aporta los datos para generar cada uno de los siete parámetros de la metodología DRASTIC (Aller, 1987) y el parámetro adicional de la metodología propuesta: DRASTIC-Sg. Una vez que se analizó y depuró la información proporcionada, descartando la información anómala o incoherente, de manera que fuera consistente para cada una de las variables, se generó la base de datos necesaria para cada parámetro. Para procesar la información de las bases de datos y disponerla en forma de mapas por medio de métodos de interpolación, se eligió el paquete Surfer 10 (Golden Software Inc., 2011). Para vincular las interpolaciones con el Sistema de

Información Geográfica se utilizó Global Mapper 10 (Blue Marble Geographics, 2009). Para integrar los datos en un Sistema de Información Geográfica donde se realizaría el álgebra de mapas se optó por ArcGIS 9.3 (ESRI Inc., 2008), en esta plataforma todos los mapas adoptaron proyección UTM en datum WGS-84 zona 14 N. Para realizar el álgebra de mapas es necesario que los mapas se encuentren en formato raster (*.tiff), en este caso la resolución elegida fue de 90 m debido a la distribución de los datos. Si en su defecto la información requerida se dispone en mapas, éstos se convirtieron a formato shape (*.shp), y se vincularon directamente al SIG en ArcGIS 9.3 donde se cambiaron a formato raster (*.tiff) con resolución de 90 m. Se realizó un proceso de clasificación, de acuerdo a las tablas propuestas por Aller (1987) y a la tabla diseñada para el parámetro que representa la subsidencia, para la obtención de cada uno de los mapas de vulnerabilidad relativa de la metodología propuesta DRASTIC-Sg y posteriormente, valiéndose del álgebra de mapas, se determinó del índice DRASTIC-Sg. Inmediatamente, a partir del índice DRASTIC-Sg se establecieron las zonas de vulnerabilidad acuífera en el Distrito Federal, clasificándose en cinco zonas como se efectúa tradicionalmente y en tres zonas, a manera de semáforo, para facilitar su consulta al gestor del agua subterránea.

La lógica general de trabajo para el desarrollo de la metodología DRASTIC-Sg se resume en el diagrama de la Figura 4.1 que a continuación se presenta:

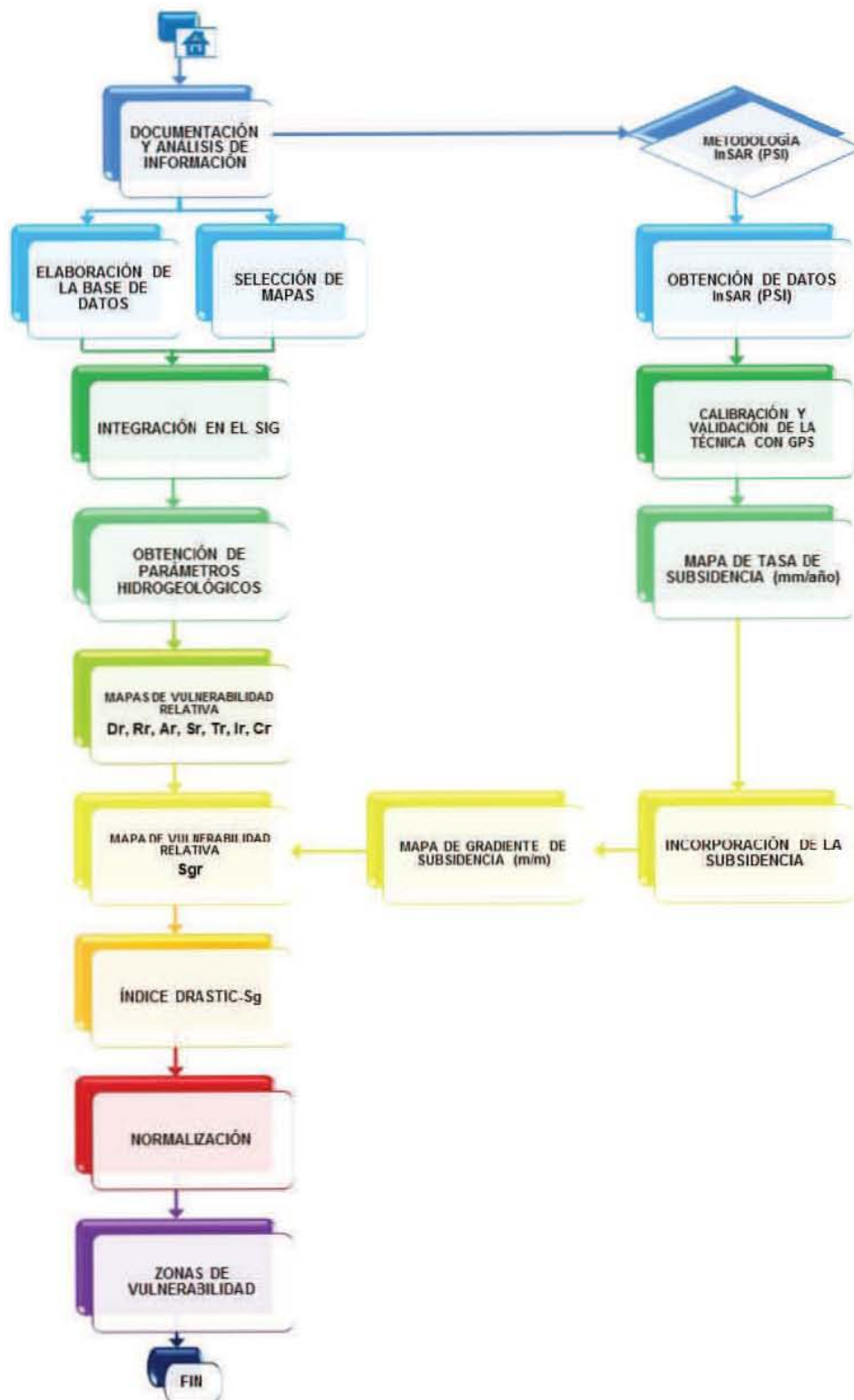


Figura 4.1. Diagrama que muestra la metodología general de trabajo.

4.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

4.3.1 Profundidad del agua subterránea Dr

Para el desarrollo de la profundidad del agua subterránea se consultaron las mediciones realizadas durante el 2010 por el Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México (OCAVM), cuyos datos arrojaron solamente 55 medidas piezométricas, y se complementaron con los niveles históricos (1990-2010) de más de 150 hidrógrafos (Figura 4.2) facilitados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) para construir una tabla con las coordenadas de los pozos y sus medidas piezométricas. Cabe destacar, que la verificación y corrección de las coordenadas de los pozos así como la determinación de las gráficas del comportamiento del nivel estático para cada hidrógrafo, que darían las mediciones piezométricas previstas para el 2010, fueron actividades realizadas por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería.

Una vez construida la tabla con los datos de profundidad a utilizar, se delimitó el área correspondiente al valle delimitado por las sierras de Guadalupe, Las Cruces, Chichinautzin y Santa Catarina tomando como la máxima elevación la cota 2400 msnm ya que es la cota límite entre las faldas de las sierras y el polígono de la zona urbana. Utilizando Surfer10, se llevó a cabo la interpolación dentro del valle por el Método de Mínima Curvatura (Smith y Wessel, 1990), que a diferencia de Kriging (Krige, 1951), permite ingresar un polígono que define un área que se excluye en la interpolación. En este caso el polígono a excluir se define por la cota 2400 msnm de la Sierra de Santa Catarina ya que se encuentra rodeada de diversos valores de profundidad de nivel estático del agua subterránea que deben interpolarse rodeando al polígono.

Debido a que las sierras poseen niveles piezométricos profundos y con mayor variabilidad que los niveles piezométricos que se presentan en las planicies, se consideró que en ellas existe una profundidad piezométrica mayor a 180 [m]. Por otro lado, la Tabla 4.1 original de Aller (1987) considera un límite de profundidad

del agua subterránea de 30 m, por lo que se realizó una modificación del límite hasta 180 m y con ello de los intervalos de profundidad del nivel del agua subterránea pero respetando el número de clases y las valoraciones numéricas de vulnerabilidad de Aller (1987).

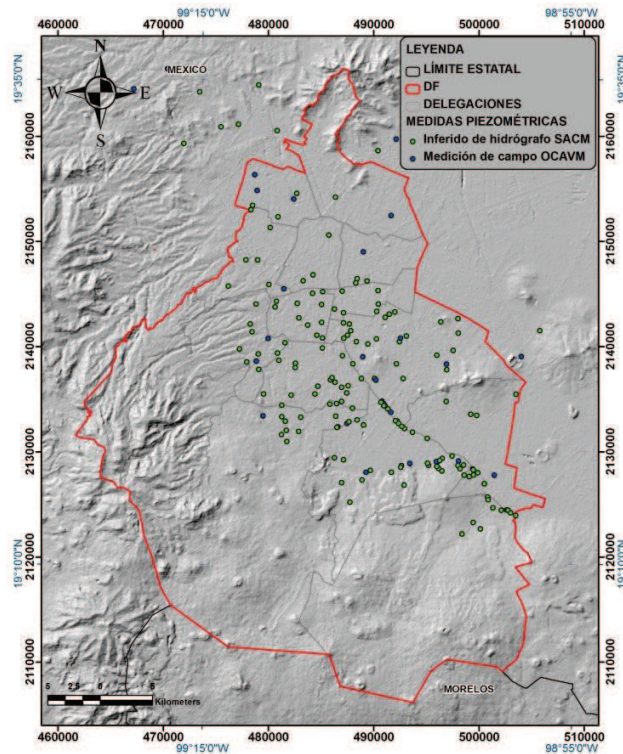


Figura 4.2. Localización de la red de medición piezométrica del Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Los puntos verdes y azules representan los pozos monitoreados, el polígono rojo la extensión del Distrito Federal, las líneas grises el límite delegacional y las negras el límite estatal.

La configuración espacial de la profundidad del nivel piezométrico del agua subterránea en el valle del DF se llevó a Global Mapper10 para exportarla como raster, con resolución de 90 m, y poder manipularla en la plataforma SIG. Con la modificación propuesta para la profundidad del agua subterránea mostrada en la Tabla 4.2 se realizó una reclasificación a través del SIG por medio de la herramienta Reclassify, para determinar un raster con la valoración numérica correspondiente a la profundidad del agua subterránea D_r en la zona del valle del DF. Posteriormente se aplicó una máscara con formato raster (con resolución de 90 m) en la zona de las sierras cuya valoración numérica es 1 ya que corresponde

a zonas con profundidad piezométrica mayor a 180 m. De esta manera se obtuvo el mapa de vulnerabilidad relativa D_r que cubre la totalidad del polígono del DF.

PROFUNDIDAD EN METROS		
INTERVALO (m)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0	1.5	10
1.5	4.5	9
4.6	9.0	7
9.3	15.0	5
15.5	23.0	3
23.2	30.0	2
>30		1
PESO		5

Tabla 4.1. Intervalo de profundidad del agua subterránea y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).

PROFUNDIDAD EN METROS		
INTERVALO (m)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0	9	10
9	27	9
27	54	7
54	90	5
90	138	3
138	180	2
> 180		1
PESO		5

Tabla 4.2. Intervalo de profundidad del agua subterránea y su valoración numérica correspondiente para el Distrito Federal.

4.3.2 Recarga potencial R_r

Para la determinación de la recarga existen diferentes metodologías propuestas, como los balances hídricos, los métodos aplicados a la zona no saturada, los aplicados en aguas subterráneas y trazadores (Healy, 2010). La mayoría de estos métodos necesitan numerosos datos respaldados por un historial del comportamiento estacional, lo que indica que el proceso de cálculo resulte sumamente complejo que bien puede ser un proyecto independiente a este trabajo. Cabe señalar, que el objetivo de esta tesis no contempla establecer una configuración de recarga neta, sin embargo, se pretende mostrar aquellas áreas donde exista un proceso de infiltración potencial que será considerado como recarga potencial para efectos prácticos del modelo DRASTIC-Sg.

Para desarrollar la configuración espacial de la recarga potencial se localizaron las estaciones hidrométricas (Instituto Metropolitano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2008) en el DF, de estas se eligieron seis estaciones hidrométricas (26273, 26275, 26438, 26440, 26458 y 26514) que se localizan en las faldas de las sierras por lo que sus mediciones presentan la menor influencia

posible de los poblados cercanos. Posteriormente, se les delimitó su área de drene o subcuenca correspondiente con el propósito de realizar un balance hídrico para cada una y obtener un coeficiente de infiltración representativo (Figura 4.3).

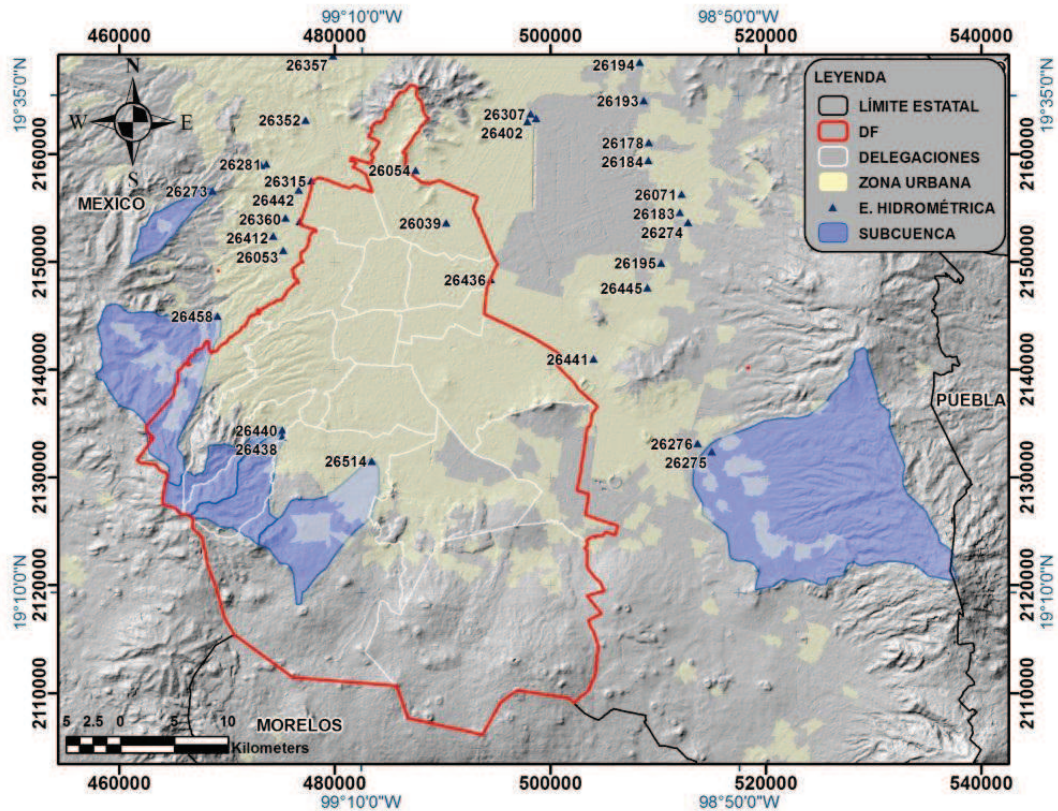


Figura 4.3. Mapa que muestra la delimitación de las subcuencas en polígonos azules, las estaciones hidrométricas (IMTA-CONAGUA, 2008) en triángulos azules con su clave correspondiente, el polígono de la zona urbana (INEGI, 2010b) en amarillo y el límite del Distrito Federal en línea roja.

Adicionalmente, se buscaron las estaciones climatológicas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) que tuvieran datos disponibles para respaldar los últimos 15 años (Figura 4.4) y de ellas se extrajo la precipitación total anual promedio y la temperatura media mensual, además, con ayuda del SIG se delimitó su área de influencia aplicando el método de los polígonos de Thiessen (Figura 4.4). Se utilizó un historial de 15 años consecutivos porque en las bases de datos mexicanas difícilmente se encuentra un historial climático que respalde los 30 años de historial acordados.

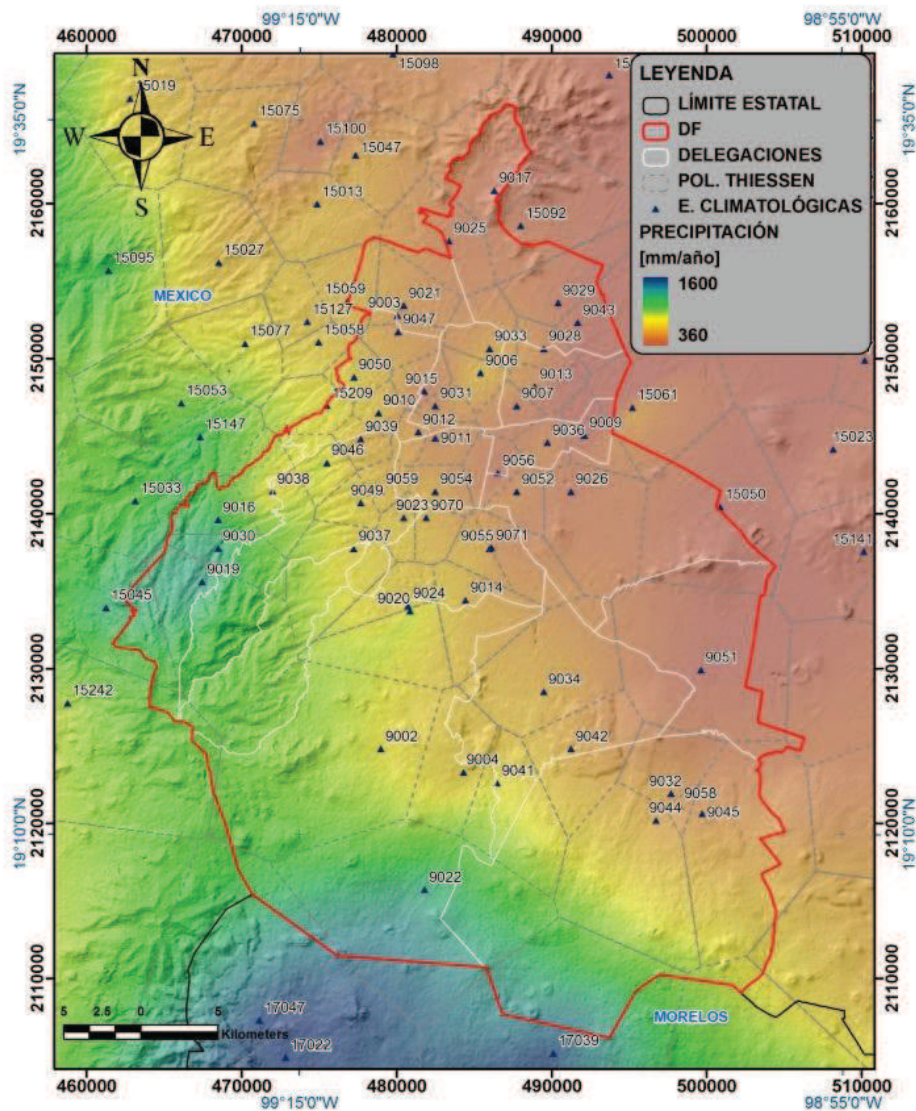


Figura 4.4. Mapa que muestra la localización de las estaciones climatológicas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) en triángulos azules, su área de influencia en polígonos grises, la precipitación total anual [mm/año] interpolada con el método de Kriging (Krige, 1951) y la extensión del Distrito Federal en línea roja.

Para efectos del balance hídrico, el volumen precipitado se obtuvo a partir de la multiplicación de lámina de precipitación total anual promedio por el área de influencia de las estaciones climatológicas. La evapotranspiración potencial se determinó con el método de Thornthwaite (1957), utilizando los datos de precipitación total anual y temperatura media mensual mediante las ecuaciones:

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^{\alpha} \dots\dots\dots(4.1)$$

Donde:

t es la temperatura media mensual en °C

I es el índice de calor anual en °C que está en función del índice de calor anual (i) y se obtiene por la expresión:

$$I = \sum i \dots\dots\dots(4.2)$$

Donde:

i es el índice de calor mensual en función de la temperatura media mensual t, que se obtiene mediante la expresión:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \dots\dots\dots(4.3)$$

α es función del índice de calor anual I y se obtiene como:

$$\alpha = 657 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 492.39 * 10^{-3} \dots\dots\dots(4.4)$$

Posteriormente se obtuvo el volumen de evapotranspiración potencial con el producto de la lámina de evapotranspiración por el área de influencia total de la estación climatológica. El volumen de escurrimiento se determinó a partir de los datos medidos en la estación hidrométrica. Finalmente, se obtuvo el volumen de infiltración potencial por medio de la relación:

$$\text{Infiltración Potencial} = \text{Precipitación} - (\text{Evapotranspiración} + \text{Esgurrimento}) \dots\dots\dots (4.5)$$

Este volumen de infiltración potencial fue referido al volumen de precipitación para determinar el coeficiente de infiltración potencial [%]. El coeficiente de infiltración se relacionó con las permeabilidades de los diferentes tipos de suelos a través de la valoración numérica que se les asignó (Sr); la relación anterior se describe con la Ecuación 4.2 que denota un comportamiento polinómico de tercer orden (Gráfico 4.1) que se respalda por las observaciones realizadas en Finch (1997) y Batelaan-De Smedt (2005).

La ecuación 4.6 se programó en el SIG a través de la herramienta Raster Calculator para transformar el raster de tipo de suelo (Sr) a raster de coeficiente de infiltración potencial, que se multiplicó por el raster de precipitación para generar el raster de infiltración potencial. Tomando en cuenta que en el polígono de la zona urbana no se tiene infiltración directa por precipitación, debido a que se encuentra cubierta por concreto asfáltico, se excluyó esta parte de la configuración anterior por medio de una máscara. La máscara se construyó a partir del polígono del área urbana (INEGI, 2010b) y se transformó a raster (con resolución de 90 m) con la herramienta Polygon to raster, donde al área urbana se le dio un valor de infiltración potencial nulo. Finalmente, se recurrió a la Tabla 4.3 propuesta por Aller (1987) para asignarle una valoración numérica a cada valor de infiltración potencial y obtener el mapa de vulnerabilidad relativa para la recarga potencial Rr.

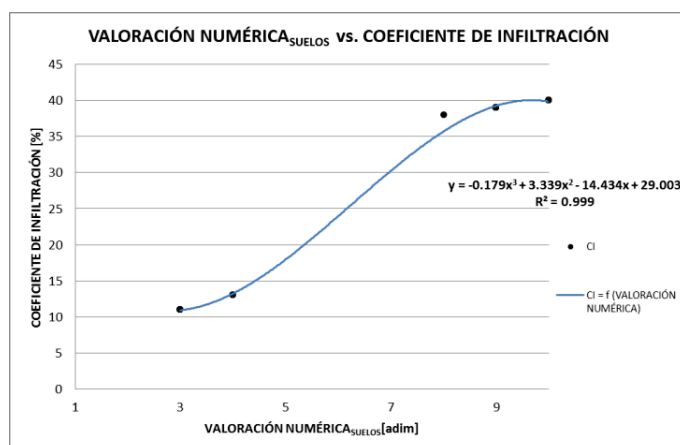


Gráfico 4.1. Se muestra la relación Valoración numérica_{SUELOS} vs. Coeficiente de infiltración potencial y la ecuación 4.6 que la define. Los puntos negros son los coeficientes de infiltración que ajustan el modelo polinómico de tercer orden representado en la línea azul.

RECARGA NETA EN MILÍMETROS		
INTERVALO (mm/año)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0	50	1
50	100	3
100	180	6
180	250	8
> 250		9
PESO		4

Tabla 4.3. Intervalo de Recarga neta y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).

4.3.3 Litología del acuífero Ar

Para el desarrollo del medio acuífero se consultaron más de 350 cortes litológicos (Figura 4.5) proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (DGCOH, 1994) asignándoles una valoración numérica basada en la conductividad hidráulica de la litología (p. e. basalto, andesita, conglomerado, toba) o depósito (p. e. arcillas, cenizas volcánicas, piroclastos, escorias) inmediato al nivel piezométrico de acuerdo a la Tabla 4.5 que se construyó con base en los materiales presentes en el acuífero y de acuerdo a la Tabla 4.4 original de Aller (1987). Por ejemplo, en el corte litológico de la Figura 4.6 se observa que el nivel piezométrico se localiza en escoria y recurriendo a la Tabla 4.4 le corresponde una valoración numérica de 7.

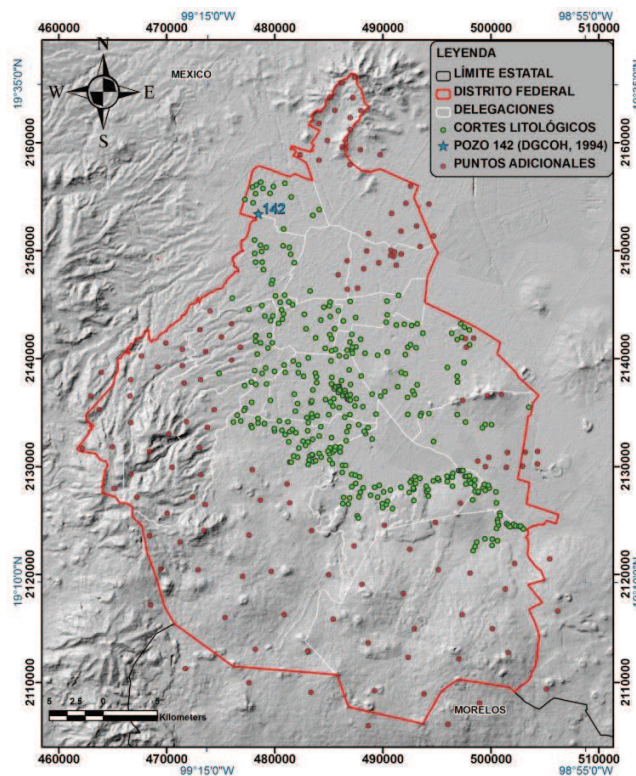


Figura 4.5. Localización de los cortes litológicos (verdes) y los puntos adicionales (rojos) utilizados en la interpolación. Las líneas grises representan el límite delegacional, la línea roja representa el límite del Distrito Federal, la línea negra el límite estatal y la estrella azul el pozo 142 (DGCOH, 1994).

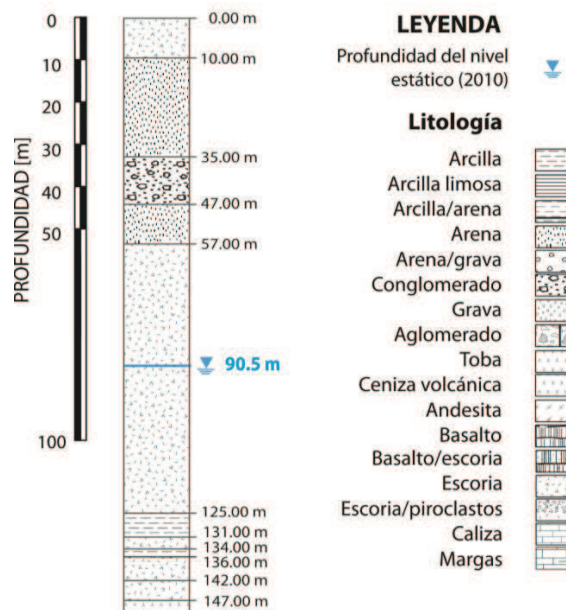


Figura 4.6. Fracción del corte litológico del pozo 142 (DGCOH, 1994), su localización se presenta en la Figura 4.5. La línea azul representa la profundidad del nivel estático del año 2010 (SACM-OCAVM).

Con las coordenadas de los pozos y su valoración numérica correspondiente se construyó una tabla para interpolar el medio acuífero Ar mediante el método de Kriging (Krige, 1951) debido a que se considera el mejor interpolador ya que se basa en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo *et al.*, 2001; McGrath *et al.*, 2002). Para aplicar el método de Kriging (Krige, 1951) se realizó una previa inspección de los datos a través de la estadística básica y un histograma que muestra el tipo de distribución de los datos, la cual se realizó en R Project v. 2.10.0 (R Project, 2009). Lo anterior para descartar una distribución asimétrica, ya que si el conjunto de datos presenta valores atípicos se exhibe un comportamiento errático en el variograma, lo que se reduce por medio de una transformación de los datos que disminuya la diferencia entre los valores extremos (Gringarten y Deutsch, 2001). Una vez que se comprobó la simetría de los datos, se ajustó un semivariograma exponencial que modeló la interpolación de la valoración numérica de la litología del acuífero Ar. Posteriormente, la interpolación se complementó con puntos adicionales (Figura 4.6) que poseen una valoración numérica según la geología (Figuras 3.2 y 3.5) descrita por Vázquez y Jaimes

(1989) y se volvió a interpolar con el propósito de cubrir la totalidad del polígono del DF. Finalmente, la interpolación anterior se exportó al SIG como un raster con resolución de 90 m a fin de disponer del mapa de vulnerabilidad relativa de la litología del acuífero Ar.

LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO			
LITOLOGÍA	VALORACIÓN NUMÉRICA		VALORACIÓN NUMÉRICA TÍPICA
	1	3	
LUTITA MASIVA	1	3	2
METAMORFICA/ÍGNEA	2	5	3
METAMORFICA/ÍGNEA INTEMPERIZADA	3	5	4
TILL GLACIAL	4	6	5
CAPAS DE ARENISCA, CALIZA Y SECUENCIAS DE LUTITA	5	9	6
ARENISCA MASIVA	4	9	6
CALIZA MASIVA	4	9	6
ARENA Y GRAVA	4	9	8
BASALTO	2	10	9
CALIZA CÁRSTICA	9	10	10
PESO			3

Tabla 4.4. Litología del Acuífero y el intervalo de valoración numérica que puede tomar la litología o depósito así como la valoración numérica típica recomendada del material (Aller, 1987).

LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO	
LITOLOGÍA/DEPÓSITO	VALORACIÓN NUMÉRICA
ARCILLA	1
ARCILLA/LIMO	2
CENIZA VOLCÁNICA	3
ARCILLA/ARENA	4
CONGLOMERADO	4
TOBA	4
PIROCLASTOS, PÓMEZ, CENIZAS, ALUVIÓN	4
AGLOMERADO	5
ARENA	5
BASALTO, ANDESITA	5
TOBAS, BRECHAS VOLCÁNICAS, LAVAS	5
BASALTO/ESCORIA	6
ESCORIA	7
ESCORIA/PIROCLASTO	7
ARENA/GRAVA	7
GRAVA	9
PESO	3

Tabla 4.5. Unidades litológicas del Acuífero de la Ciudad de México, en la zona del Distrito Federal, y su valoración numérica asignada de acuerdo a las descripciones litológicas y la propuesta de Aller (1987).

4.3.4 Tipo de suelo Sr

En el caso del suelo, se utilizó el mapa edafológico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad ((INIFAP-CONABIO, 1995) que considera las escalas 1:250000 y 1:1000000, y que está publicado en formato shape.

En el mapa (Figura 4.7) podemos observar que en la Ciudad de México se tienen los siguientes tipos de suelos:

ANDOSOL (T). Son suelos de color oscuro (negro) que se desarrollan en un ambiente montañoso y húmedo, cuyo material parental son lavas o vidrios volcánicos, generalmente son suelos de textura franca. Tienen alto contenido de minerales de rango corto como alofano, imogolita y ferrihidrita, por lo que son untuosos y tienen alta capacidad de retención de humedad (Bautista *et. al*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

FEOZEM (H). Son suelos de tonalidades oscuras debido a su contenido elevado de materia orgánica, provienen de materiales no consolidados, principalmente de composición básica, eólicos, till glacial y otros, además son porosos y fértiles, se consideran suelos arenosos de textura media a gruesa. Se desarrollan en clima cálido a fresco en donde las condiciones de humedad permiten que exista percolación a través del suelo, la vegetación natural es pastizal (Bautista *et al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

FLUVISOL (J). Son suelos característicos de sedimentos aluviales que se desarrollan en ambientes fluviales, lacustres y marinos. Se encuentran poco desarrollados con profundidades medias y estructura débil o suelta; varían su textura de mediana a gruesa (Bautista *et al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

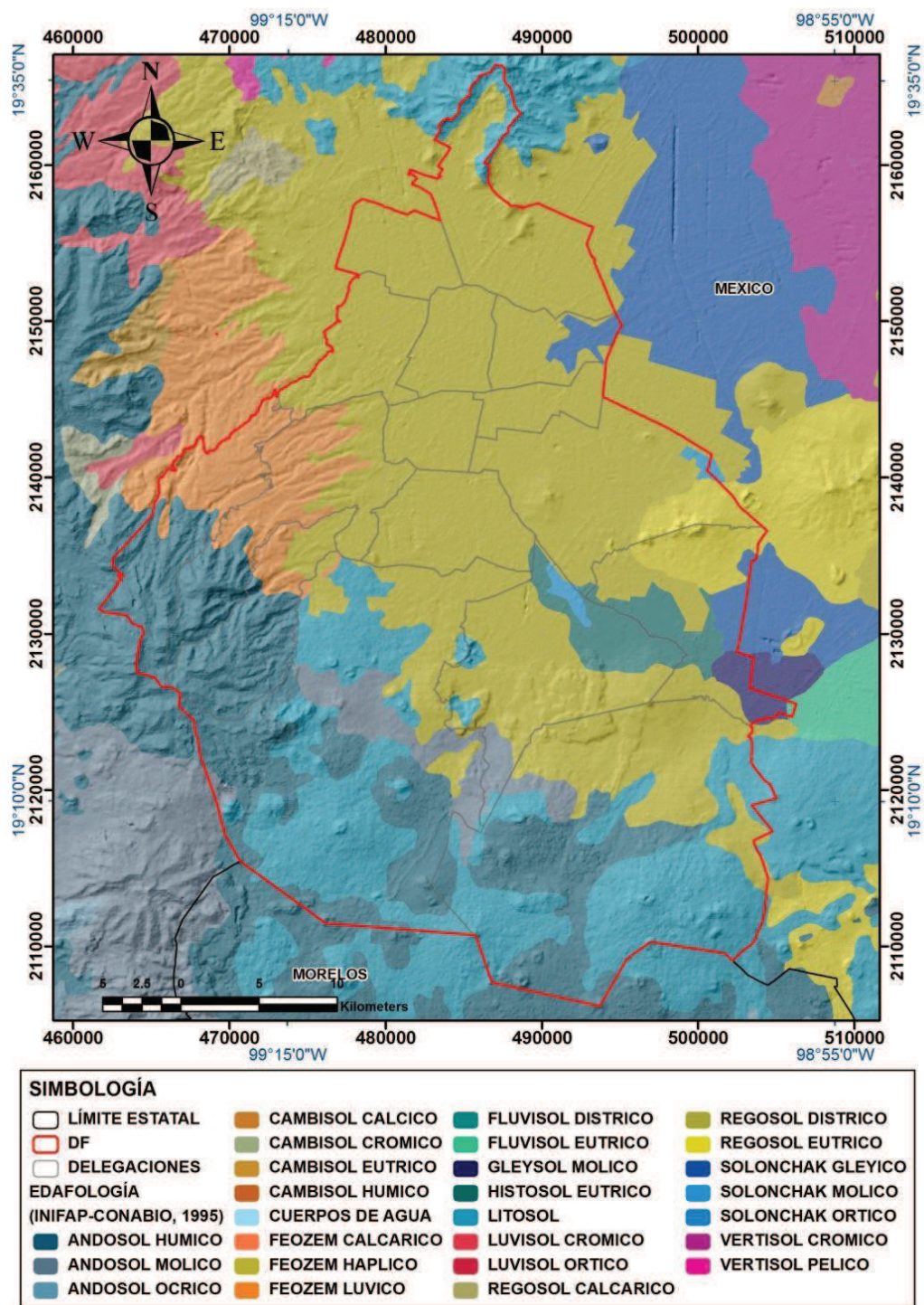


Figura 4.7. Mapa Edafológico de la Ciudad de México (INIFAP-CONABIO, 1995). Se muestra en línea roja la extensión del Distrito Federal, en líneas grises el límite delegacional y en diversos colores el tipo de suelo.

GLEYSOL (G). Son suelos que se encuentran saturados de agua freática por largos periodos, por lo cual, desarrollan colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos/azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo debido a las condiciones anoxicas que mantienen por periodos prolongados. Se desarrollan en materiales no consolidados con minerales de composición básica a ácida, su textura es variable pero en México predominan los arcillosos, regularmente presentan acumulaciones de salitre (Bautista *et al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

HISTOSOLES (O). Son suelos derivados de restos vegetales parcialmente descompuestos con o sin mezcla de arena, limo o arcilla; se desarrollan en cuencas y depresiones pobremente drenadas, pantanos, marismas y tierras altas con relación precipitación/evaporación alta. Son de color oscuro (negro), esponjosos, ligeros, con alta capacidad de retención de humedad, olor a podrido y alta acumulación de salitre. En México, Xochimilco es un ejemplo representativo (Bautista *et. al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

LITOSOL (I). Son suelos con espesor menor a 10 cm debido a la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido; se distribuyen en todos los climas con diversos tipos de vegetación. En México se encuentran en barrancas, lomeríos y algunas planicies (Bautista *et. al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

REGOSOL (R). Son suelos de color claro que se desarrollan en material no consolidado de grano fino, son comunes en zonas áridas y regiones montañosas, por lo cual poseen un perfil de edad joven y/o lenta formación del suelo, es decir, no se aprecia buena diferenciación en sus horizontes. Se asocian a Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate, frecuentemente son someros (Bautista *et al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

SOLONCHAK (Z). Son suelos con alta concentración de sales solubles, provienen de cualquier material no consolidado y se desarrollan en regiones áridas y

semiáridas donde el nivel freático alcanza el solum o existe agua superficial, con vegetación de pastos y/o hierbas halófitas y en áreas de riego con manejo inadecuado (Bautista *et al.*, 2009; IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

Otros suelos que se encuentran fuera del polígono de la Ciudad de México son el Cambisol, Luvisol y Vertisol:

CAMBISOL (C). Son suelos con material de reciente deposición, contienen un horizonte cámbico distinguible por su textura franco-arenosa o más fina, estructura moderada, con evidencia de alteración con respecto al material subyacente, con espesor mínimo de 15 cm y profundidad mínima de 25 cm. Se pueden encontrar en diversos ambientes (altitud, tipo de vegetación y clima) (Bautista *et al.*, 2009).

LUVISOL (L). Son suelos con diferenciación pedogenética de arcilla entre un suelo superficial con menor contenido y un subsuelo con mayor contenido de arcilla. Proceden de materiales no consolidados como depósitos aluviales y coaluviales, se desarrollan en tierras llanas o con pendientes suaves en regiones templadas frescas y cálidas con estación seca y húmeda marcadas. Poseen alto contenido de limo por lo que son susceptibles al deterioro de la estructura del suelo y en pendientes fuertes los hace susceptibles a la erosión (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; INEGI, 2004).

VERTISOL (V). Es un suelo cuyo contenido de arcilla es superior al 30%, por lo cual, posee agregados en forma de cuña o paralelepípedo, muestra caras de deslizamiento y debe presentar grietas que abren y cierran periódicamente. Se desarrollan en las partes bajas del relieve donde predomina la presencia de arcillas expandibles, del grupo de las esmectitas; son pesados en la época de secas y pegajosos en la época de lluvias (Bautista *et al.*, 2009).

De acuerdo a los tipos de suelo descritos anteriormente se realizó un análisis de sus propiedades, en el que de acuerdo las descripciones generales de INEGI (2004) y del grupo de trabajo especializado en suelos de la FAO (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) se le asignó una valoración numérica (Tabla 4.7) con base al

criterio de la Tabla 4.6 original de Aller (1987). En el SIG se transformó el mapa de suelos en formato shape (*.SHP) a formato raster (*.tif), con resolución de 90 m, por medio de la herramienta Feature to raster y así obtener el mapa de vulnerabilidad relativa del tipo de suelo Sr.

SUELO	
RASGO SOBRESALIENTE	VALORACIÓN NUMÉRICA
DELGADO O AUSENTE	10
GRAVA	10
ARENA	9
TURBA	8
ARCILLA COMPACTADA Y/O AGREGADA	7
ARENA FRANCA	6
FRANCO	5
FRANCO LIMOSO	4
FRANCO ARCILLOSO	3
ESTIERCOL	2
ARCILLA NO COMPACTADA Y NO AGREGADA	1
PESO	2

Tabla 4.6. Material del suelo y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).

TIPO DE SUELO	
SUELO	VALORACIÓN NUMÉRICA
LITOSOL	10
REGOSOL	10
FLUVISOL	10
CAMBISOL	9
FEZEM	9
LUVISOL	9
HISTOSOL	8
ANDOSOL	4
SOLONCHAK	3
GLEYSOL	3
VERTISOL	3
PESO	2

Tabla 4.7. Tipos de suelo en el Distrito Federal y su valoración numérica correspondiente de acuerdo a Aller (1987).

4.3.5 Topografía Tr

La topografía se tomó del Modelo Digital de Elevación (DEM ASTER) publicado por la NASA (2011). El DEM (Figura 4.8) se trató directamente en el SIG donde primero se realizó un mosaico en formato raster, remuestreado con resolución de 90 m, y posteriormente se transformó a pendiente por medio de un análisis de superficie con la herramienta Slope.

Finalmente, para obtener el mapa de vulnerabilidad relativa de la topografía Tr se realizó una reclasificación de la pendiente por medio de la herramienta Reclassify, en la que se asignó la valoración numérica correspondiente según la Tabla 4.8 original de Aller (1987).

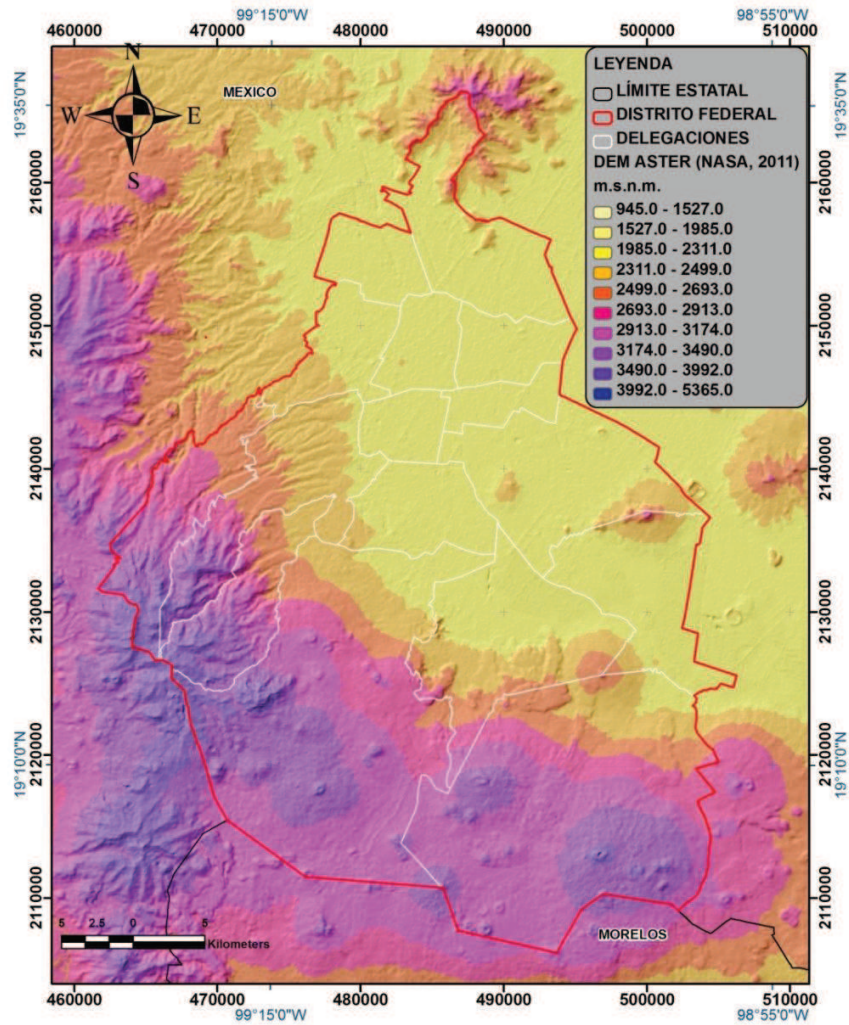


Figura 4.8. Modelo Digital de Elevación para el Distrito Federal (NASA, 2011). La línea roja es el límite del Distrito Federal, la línea blanca es el límite delegacional y la línea negra el límite estatal.

TOPOGRAFÍA (PENDIENTE EN %)		
INTERVALO (%)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0	2	10
2	6	9
6	12	5
12	18	3
> 18		1
PESO		1

Tabla 4.8. Pendiente en porcentaje y su valoración numérica (Aller, 1987).

4.3.6 Impacto a la zona vadosa I r

Para el desarrollo del impacto a la zona vadosa también se analizaron más de 350 cortes litológicos (Figura 4.6) facilitados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (DGCOH, 1994), a cada uno se le asignó una valoración numérica ponderada con base en el espesor de los materiales observados en la zona no saturada y de acuerdo con la Tabla 4.10, en la que se establece una valoración numérica para cada litología o depósito, concebida a partir de la Tabla 4.9 original de Aller (1987). Por ejemplo, en el corte litológico de la Figura 4.9 se observa que la zona vadosa (identificada en la parte superior del nivel estático) está constituida por escoria, arena y conglomerado que en conjunto tienen espesor de 90.5 m, cada material posee una fracción de ese espesor que se multiplica por su valoración numérica correspondiente y que al sumarse se genera la valoración numérica ponderada de la zona vadosa (Tabla 4.11).

IMPACTO A LA ZONA VADOSA			
INTERVALO	VALORACIÓN NUMÉRICA		VALORACIÓN NUMÉRICA TÍPICA
CAPA CONFINANTE	1		1
LIMO/ARCILLA	2	6	3
LUTITA	2	5	3
CALIZA	2	7	6
ARENISCA	4	8	6
ESTRATIFICACIÓN DE CALIZA, ARENISCA, LUTITA	4	8	6
ARENA Y GRAVA CON IMPORTANTE CANTIDAD DE LIMO Y ARCILLA	4	8	6
METAMORFICA/ÍGNEA	2	8	4
ARENA Y GRAVA	6	9	8
BASALTO	2	10	9
CALIZA CÁRSTICA	8	10	10
PESO			5

Tabla 4.9. Materiales de la zona vadosa y el intervalo de valoración numérica que puede tomar la litología o depósito así como la valoración numérica típica recomendada del material (Aller, 1987).

IMPACTO A LA ZONA VADOSA	
LITOLOGÍA/DEPÓSITO	VALORACIÓN NUMÉRICA
ARCILLA	2
ARCILLA/LIMO	3
CENIZA VOLCÁNICA	3
MARGAS	3
ANDESITA	4
ARCILLA/ARENA	4
CALIZA	5
TOBA	5
ARENA	6
BASALTO	6
CONGLOMERADO	6
BASALTO/ESCORIA	7
AGLOMERADO	8
ARENA/GRAVA	8
ESCORIA	8
ESCORIA/PIROCLASTO	8
GRAVA	9
PESO	5

Tabla 4.10. Materiales de la zona vadosa en el Distrito Federal y su valoración numérica asignada de acuerdo a las descripciones litológicas y la propuesta de Aller (1987).

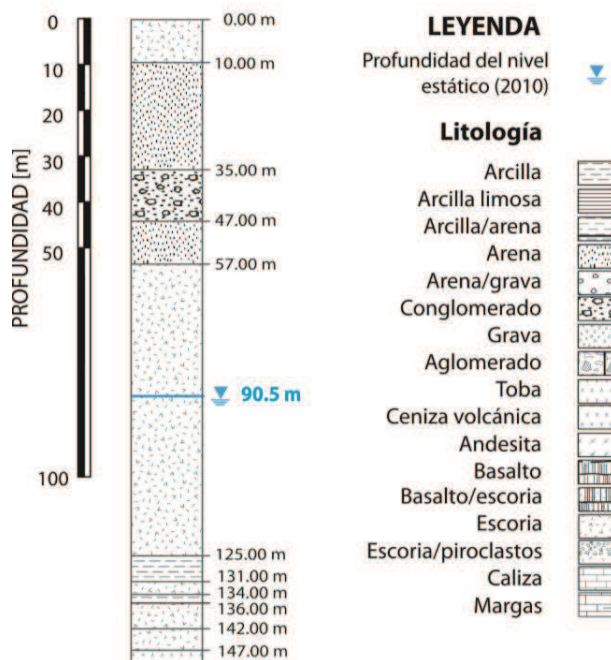


Figura 4.9. Fracción del corte litológico del pozo 142 (DGCOH, 1994), su localización se muestra en la Figura 4.5. La línea azul representa la profundidad del nivel estático es del año 2010 (SACM-OCAVM).




Litología/Depósito		Espesor m	Fracción Espesor	Valoración numérica del material	Valoración numérica correspondiente
	Escoria	43.5	0.48	8	3.85
	Arena	35	0.39	6	2.32
	Conglomerado	12	0.13	6	0.80
Valoración numérica total					6.96

Tabla 4.11. Tabla que muestra el procedimiento para obtener la valoración numérica del impacto a la zona vadosa.

Con las coordenadas de los pozos y su valoración numérica ponderada se elaboró una tabla para interpolar la valoración numérica del impacto a la zona vadosa mediante el método de Kriging (Krige, 1951) que se considera el mejor interpolador ya que se basa en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo *et al.*, 2001; McGrath *et al.*, 2002).

Para ello se realizó una inspección previa de los datos a través de la estadística básica y un histograma que muestra el tipo de distribución de los datos a través del software R Project v. 2.10.0 (R Project, 2009). Lo anterior se debe a que si se presenta una distribución asimétrica donde en el conjunto de datos se observan valores atípicos se exhibe un comportamiento errático en el variograma, lo cual se reduce por medio de una transformación de los datos que disminuya la diferencia entre los valores extremos (Gringarten y Deutsch, 2001). Una vez confirmada la simetría de la distribución de los datos, se ajustó un semivariograma por medio de un modelo exponencial que generó la interpolación de la valoración numérica del impacto a la zona vadosa I_r . Esta interpolación se complementó con puntos adicionales que teóricamente tienen profundidad del nivel estático mayor a 200 m (sección 4.3.1), con valoración numérica asignada de acuerdo a la geología (Figuras 3.2 y 3.5) descrita por Vázquez y Jaimes (1989) y se interpoló nuevamente para cubrir la totalidad del Distrito Federal. La segunda interpolación se realizó con el mismo variograma, suponiendo que la inserción de los puntos en las sierras no modifica el histograma y la distribución de los datos originales en el valle del Distrito Federal. Finalmente, la interpolación se exportó como un raster,

con resolución de 90 m, para disponer del mapa de vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa Ir en la plataforma SIG.

4.3.7 Conductividad hidráulica Cr

Para el desarrollo de la conductividad hidráulica Cr se analizaron los datos de 55 pruebas de bombeo (Figura 4.10) proporcionadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (DGCOH, 1983, 1992 y 1993), de las que se realizó la reinterpretación de 48 pruebas de bombeo mediante los métodos analíticos de Cooper-Jacob (1946), Hantush (1964), Theis (1935), Boulton (1954), Newman (1974), Walton (1962) y Boulton-Streltsova (1978). Sin embargo, el método que asume mejor las condiciones del pozo durante el desarrollo de la prueba de bombeo es el método numérico de Rushton-Redshaw (1979) y Rushton-Rathod (1988, 1991). Dichas condiciones son (CNA, 2007):

- Radio finito del pozo
- Almacenamiento en el pozo
- Caudal de extracción variable
- Recuperación (extracción cero)
- Fronteras externas impermeables y de carga constante (recarga)
- Espesor saturado variable
- Variabilidad horizontal de la conductividad hidráulica
- Variabilidad de la conductividad hidráulica con la profundidad
- Variabilidad horizontal del coeficiente de almacenamiento
- Variabilidad del coeficiente de almacenamiento con la profundidad
- Condiciones semiconfinadas, es decir, recarga intermitente como respuesta al drenado retardado
- Pérdidas de pozo no lineales
- Aporte de zonas fracturadas
- Penetración parcial del pozo
- Cambio de condiciones confinadas a libres

Para la reinterpretación con el método numérico se requirieron los cortes litológicos de los pozos, por lo que solamente se reinterpretaron 23 pruebas de bombeo con su corte litológico correspondiente. Posteriormente, se sumaron 7 pruebas más, cuyo modelo conceptual se apoyó en los cortes litológicos (Figura 4.5) más cercanos.

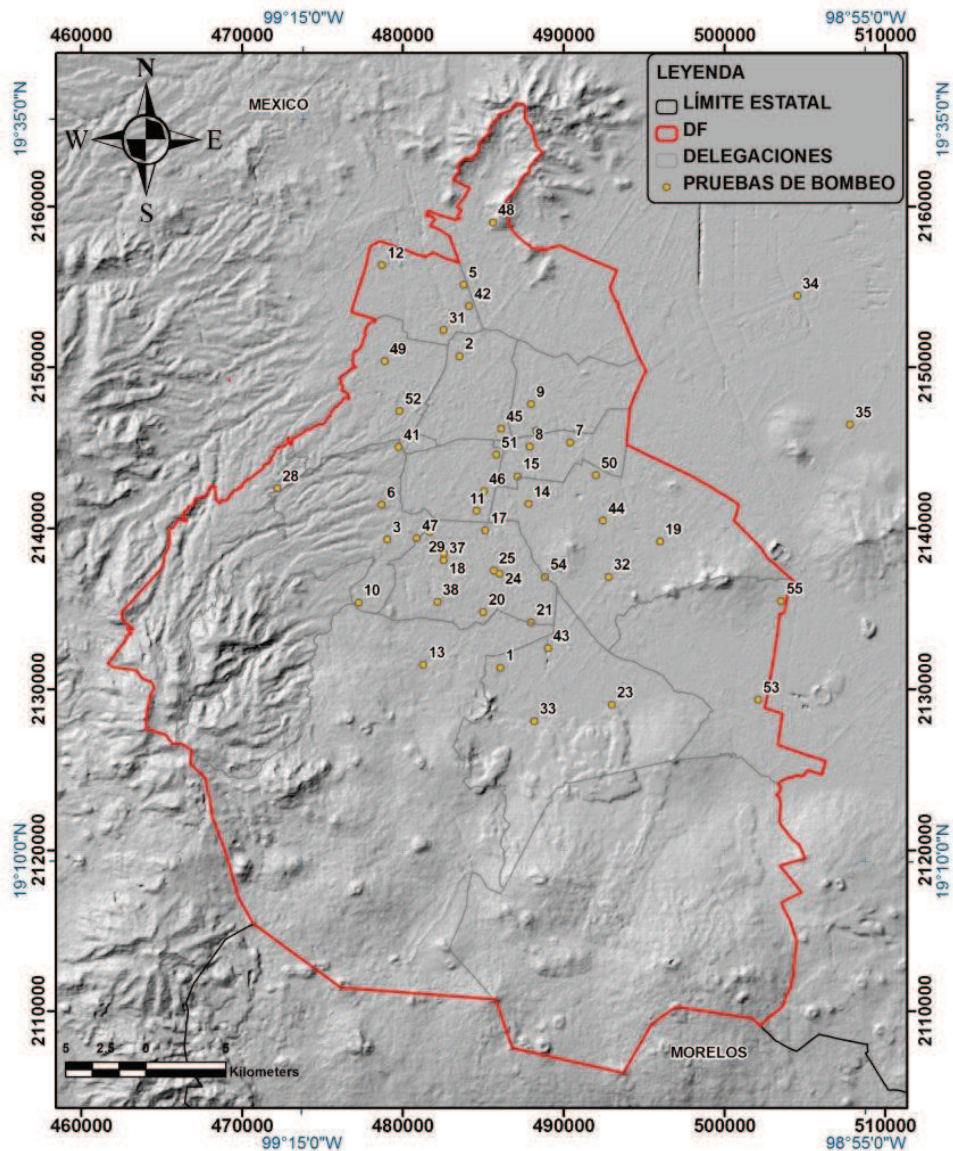


Figura 4.10. Ubicación de las pruebas de bombeo (puntos naranja) proporcionadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (DGCOH, 1983, 1992 y 1993). El límite delegacional en líneas grises, el límite del Distrito Federal se muestra en línea roja y en línea negra el límite estatal.

El método de Rushton-Redshaw (1979) y Rushton-Rathod (1988, 1991) se abordó por medio del software Visual Two-Zone Model (Hernández-Laloth, 2008). Se ingresó un modelo conceptual construido a partir del corte litológico del pozo de bombeo que puede ser libre, confinado o semiconfinado. Posteriormente se ingresaron los datos de la prueba de bombeo como el caudal y el tiempo que permanece activo con estos datos y el modelo conceptual previo, el software calculó una curva teórica; finalmente se ingresaron los datos de tiempo-abatimiento colectados durante la prueba, que representan la curva de campo. Esta última curva se calibró mediante un ensayo a prueba y error hasta lograr el ajuste con la curva teórica. De esta forma se determinaron los valores de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica saturada K , coeficiente de almacenamiento S , rendimiento específico S_y).

De la forma anteriormente descrita, se obtuvieron los valores de conductividad hidráulica a considerar para constituir una tabla con las coordenadas de los pozos y su valor de conductividad hidráulica que sirvió para realizar su configuración espacial. Nuevamente se recurrió al método de Kriging (Krige, 1951) por ser el mejor interpolador que se basa en la minimización del error cuadrático medio de la predicción (Giraldo *et al.*, 2001; McGrath *et al.*, 2002). Se obtuvo la estadística básica y el histograma por medio de R Project v. 2.10.0 (R Project). Este histograma muestra el tipo de distribución de los datos ya que si se presenta una distribución asimétrica donde en el conjunto de datos se observan valores atípicos (ver Giraldo *et al.*, 2001) se exhibe un comportamiento errático en el variograma, lo cual se reduce por medio de una transformación de los datos que disminuya la diferencia entre los valores extremos (Gringarten y Deutsch, 2001). Una vez confirmada la simetría de la distribución de los datos, se ajustó un semivariograma esférico que modeló la interpolación del logaritmo de la conductividad hidráulica ($\log K$). Análogamente, se utilizó la relación $10^{(\log K)}$ para generar resultados lineales y disponer de la configuración espacial de la conductividad hidráulica. Esta configuración se complementó con puntos adicionales de acuerdo con el dato más cercano de las pruebas de bombeo que se relacionó con la geología descrita

por Vázquez y Jaimes (1989) y se interpoló nuevamente para cubrir la totalidad del Distrito Federal.

Finalmente, la configuración de conductividad hidráulica se exportó al SIG como raster (*.tiff), con resolución de 90 m, y para transformarla en el mapa de vulnerabilidad relativa de conductividad hidráulica Cr, se realizó una reclasificación para asignarle la valoración numérica correspondiente según la Tabla 4.12 original de Aller (1987).

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA [m/d]		
INTEVALO (m/d)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0.04	4.07	1
4.07	12.22	2
12.22	28.52	4
28.52	40.75	5
40.75	81.49	8
> 81.49		10
PESO		3

Tabla 4.12. Intervalo de la Conductividad hidráulica y su valoración numérica correspondiente (Aller, 1987).

4.3.8 Gradiente de subsidencia Sgr

Una vez desarrollado el método DRASTIC, se realizó la modificación mediante la adición del parámetro gradiente de subsidencia (Subsidence gradient Sgr) (Cabral-Cano et al, 2007, 2011a, 2011b). El gradiente de subsidencia expresa la inestabilidad del subsuelo que se genera con la extracción intensiva del agua subterránea. El proceso de subsidencia da inicio con la disminución de los esfuerzos horizontales y el aumento del esfuerzo efectivo vertical en el acuífero, le sigue la respuesta de los materiales a la consolidación diferencial, de manera que al generarse esfuerzos de cizalla que superen la resistencia natural de los materiales, provocan el movimiento del suelo, que finalmente se expresa como grieta en superficie. Por otro lado, al existir una grieta en una zona susceptible a la

deformación, se genera una elevada concentración de esfuerzos a profundidad que conlleva a su desarrollo y propagación (Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1984). Por tanto, el parámetro Sgr resulta útil al evaluar la vulnerabilidad de acuíferos con subsidencia ya que por una parte define áreas susceptibles al fallamiento y fisuramiento que pueden afectar la infraestructura subterránea e inducir fuentes contaminantes como los sistemas hidráulicos de drenaje con fracturas y por otro lado, al aumentar la permeabilidad secundaria de la zona no saturada, puede permitir el paso de diversos contaminantes al acuífero desde la superficie.

Para el desarrollo del gradiente de subsidencia Sgr se utilizó la nube de puntos georeferenciados y codificados con la magnitud de subsidencia (Solano *et al.*, 2012) generada a partir del método SqueeSAR (Ferreti *et al.*, 2000; 2001) y desarrollado por TRE Europa. Para este análisis se utilizaron imágenes SAR para el periodo comprendido desde el 7 de marzo de 2003 hasta el 12 de octubre de 2007, es decir, un total de 1680 días. Este conjunto de datos se manipuló directamente en el SIG, donde a partir del Field Calculator se programó la ecuación:

$$T_s = \frac{St}{-1680} * 365 \dots\dots\dots (4.7)$$

Donde:

Ts es la tasa de subsidencia en mm/año

St es la subsidencia total acumulada en el periodo de estudio en mm

Los datos generados con la ecuación anterior se interpolaron directamente en la plataforma SIG debido a la gran cantidad de puntos y se definió un raster de magnitud de subsidencia, remuestreado a una resolución espacial de 90 m. La nube de puntos se constituye de casi 300 mil puntos localizados a distancias variables entre sí, por lo que dentro de un pixel (90x90 m) se considera el promedio de ellos. La tasa de subsidencia es un fenómeno que puede ser variable

en el tiempo y espacio, aunque en el caso de la Ciudad de México no se presentan variaciones estacionales significativas (Osmanoglu *et al.*, 2010). Por otra parte la correlación espacial entre magnitud de subsidencia con zonas de desarrollo de fallas superficiales, daños en casas habitación y sistemas de infraestructura urbana muestra que el mayor potencial de deterioro se presenta en las zonas donde la variabilidad horizontal de la tasa de subsidencia tiene un alto gradiente. Esto es que dentro de una distancia muy corta existen variaciones significativas en la magnitud de subsidencia. En esta situación las estructuras civiles y sistemas de servicios urbanos experimentan esfuerzos que resultan en fallas estructurales tanto del medio geológico como de las estructuras civiles y urbanas que en muchas ocasiones se ubican dentro de bandas que circundan altos topográficos como el Peñón de los Baños y del Marques (Cabral-Cano *et al.*, 2010).

Este parámetro se calcula como la mayor diferencia entre magnitudes de puntos (píxeles) adyacentes dividido entre la distancia entre estos puntos (píxeles):

$$\text{Grad max Subsidencia} = \frac{T_s - T_{s_{prom}}}{D} \dots\dots\dots(4.8)$$

Donde:

Grad max Subsidencia es el gradiente máximo de subsidencia en el periodo de estudio en mm/mm

T_s es la tasa de subsidencia en el píxel en mm/año

T_{s_{prom}} es la tasa de subsidencia promedio de los píxeles colindantes en mm/año

D es la distancia entre el píxel de interés y los píxeles colindantes en mm

De la forma anteriormente descrita, en la plataforma SIG se obtuvo un mapa de gradiente de subsidencia auxiliándose de un análisis de superficie por medio de la herramienta Slope. Posteriormente, se reclasificó el gradiente de subsidencia en cinco clases que poseen la valoración numérica del parámetro topografía (Tr), ya que también es una pendiente pero que en términos de vulnerabilidad se evalúa a

la inversa, es decir, a mayor gradiente de subsidencia aumenta la vulnerabilidad, mientras que para la topografía, a mayor pendiente menor vulnerabilidad del acuífero. Los umbrales se eligieron con el mejor ajuste de los gráficos polinómico de segundo orden y logarítmico (Gráfico 4.2). Para lograr el ajuste se consideró que el umbral máximo, que corresponde con la valoración numérica de 10, tiene la mitad del valor máximo ($56 \cdot 10^{-3}$) del gradiente de subsidencia para el Distrito Federal, por lo que los puntos restantes (con valoraciones numéricas 1, 3, 5 y 9) variaron su valor del gradiente de subsidencia hasta lograr que el coeficiente de determinación de Pearson en los modelos polinómico de segundo orden y logarítmico fuera cercano a 1. Con los umbrales elegidos y su valoración numérica se propuso la Tabla 4.13. Por otro lado, para la asignación del grado de peso se llevó a cabo un análisis comparativo entre el valor de 3, 4, 5 y de acuerdo a las variables que se involucran en el proceso de subsidencia.

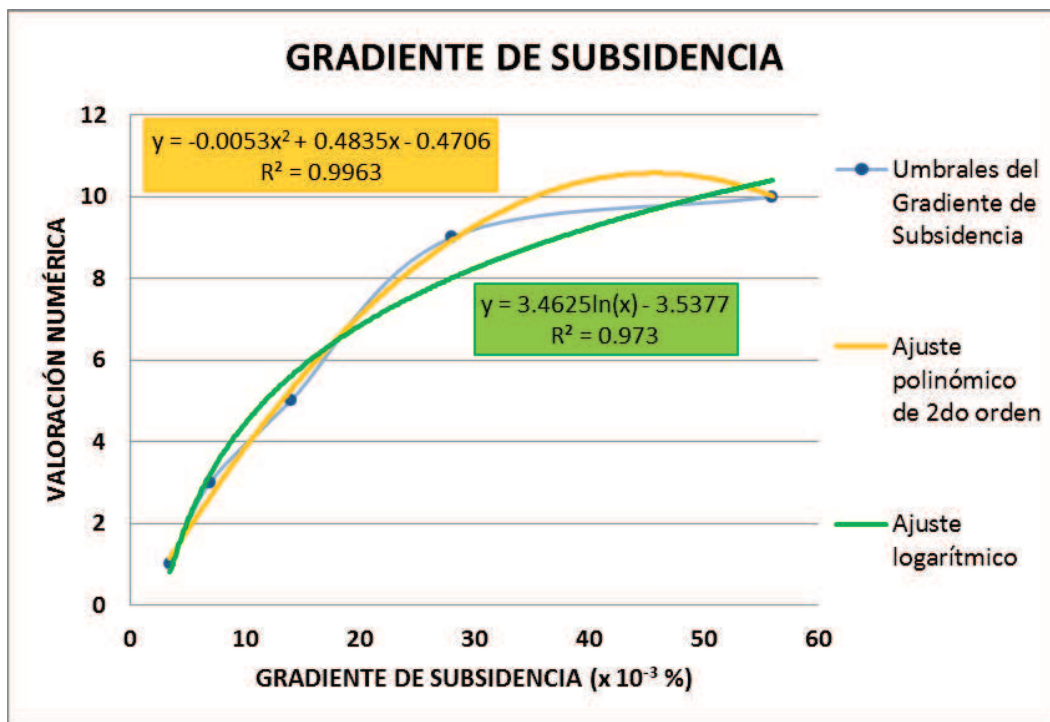


Gráfico 4.2. Elección de los umbrales del gradiente de subsidencia por medio del ajuste de los modelos polinómico de segundo orden (línea naranja) y logarítmico (línea verde). Los puntos azules corresponden a los umbrales del gradiente de subsidencia, los recuadros naranjas y verdes (polinómico de segundo orden y logarítmico, respectivamente) muestran las ecuaciones que definen cada modelo y su coeficiente de correlación de Pearson.

GRADIENTE DE SUBSIDENCIA		
INTERVALO (x10 ⁻³)		VALORACIÓN NUMÉRICA
0.0	3.5	1
3.5	7.0	3
7.0	14.0	5
14.0	28.0	9
> 28.0		10
PESO		4

Tabla 4.13. Intervalo del Gradiente de Subsistencia y su valoración numérica para el Distrito Federal.

4.4 Índices DRASTIC Y DRASTIC-Sg

Para comparar los resultados de la metodología DRASTIC (Aller, 1987) y la metodología modificada DRASTIC-Sg se determinaron los índices correspondientes, de manera que se recurrió al SIG para realizar el álgebra de mapas y con el auxilio de la herramienta Raster Calculator se aplicaron las Ecuaciones 4.9 y 4.10, respectivamente:

$$\text{Índice DRASTIC} = 5 \cdot D_r + 4 \cdot R_r + 3 \cdot A_r + 2 \cdot S_r + 1 \cdot T_r + 5 \cdot I_r + 3 \cdot C_r \dots \dots \dots (4.9)$$

$$\text{Índice DRASTIC-Sg} = 5 \cdot D_r + 4 \cdot R_r + 3 \cdot A_r + 2 \cdot S_r + 1 \cdot T_r + 5 \cdot I_r + 3 \cdot C_r + 4 \cdot Sg_r \dots (4.10)$$

Donde:

D_r es la profundidad del agua subterránea en (m)

R_r es la recarga neta (recarga potencial) en (mm/año)

A_r es el medio acuífero (adim)

S_r es el material del suelo (adim)

T_r es la topografía en (%)

I_r es el impacto a la zona vadosa (adim)

C_r es la conductividad hidráulica en (m/d)

Sg_r es el gradiente de subsidencia en (m/m)

Posteriormente, el índice DRASTIC-Sg se normalizó en 10 clases, y a través de la herramienta Reclassify se generaron cinco zonas de vulnerabilidad acuífera para

el DF: Muy Baja (0-2), Baja (2-4), Intermedia (4-6), Alta (6-8) y Muy Alta (8-10). La clasificación de cinco clases es la más utilizada en la literatura (p.ej. Melloul y Colin, 1997; Al-Zabet, 2002; Murat *et al.*, 2003; Hammouri y El-Naqa, 2006; Assaf y Saadeh, 2007; Raj-Pathak *et al.*, 2007; Kabera y Zhahoui, 2008; Boughriba, et. a., 2009; Srinivasamoorthy *et al.*, 2011, Shirazi *et al.*, 2012; Anane *et al.*, 2012) sin embargo, con el propósito de facilitar la comprensión del mapa de vulnerabilidad y facilitar la toma de decisiones al administrador del recurso agua subterránea se determinaron tres zonas de vulnerabilidad: Baja (0-3), Intermedia (3-6) y Alta (6-10).

CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Antes de presentar los resultados de la metodología DRASTIC-Sg es preciso señalar que el acuífero de la Ciudad de México posee un acuitardo arcilloso con espesores variables de 2 m hasta 110 m en el DF. De lo anterior se desprende que el acuífero es semiconfinado pero según los cortes litológicos (DGCOH, 1994) y la piezometría (SACM), en algunos pozos el nivel del agua subterránea ha descendido por debajo del material arcilloso cambiando la respuesta del acuífero de semiconfinado a libre mientras que en algunos otros pozos se observa que se conserva el carácter estrictamente semiconfinado. Sin embargo, son pocos los cortes litológicos que permiten delimitar a qué profundidad se encuentra la superficie acuitardo-acuífero o techo del acuífero sobretodo en la zona NE y SE de la planicie del DF donde se tienen los niveles del agua subterránea más someros. Ante esta limitante de datos, se eligió evaluar al acuífero de la Ciudad de México como acuífero libre ya que de esta forma no se aventura a encontrar la superficie acuitardo-acuífero en el área semiconfinada y por otro lado, se asigna un material arcilloso (en los parámetros A_r e I_r) en la zona carente de cortes litológicos, dándole implícitamente su significado de acuífero semiconfinado.

5.2 Parámetros de vulnerabilidad relativa

5.2.1 Profundidad del agua subterránea D_r

En la Figura 5.1 se observa que los valores de profundidad del nivel estático durante el año 2010 para el acuífero de la Ciudad de México en el DF, según las medidas de campo realizadas por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) y los hidrógrafos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), se encuentran desde menos de 30 m y más de 180 m. Al evaluar este intervalo de profundidad del agua subterránea directamente con la Tabla 4.1 original de Aller (1987), la mayor parte del polígono del DF tendría vulnerabilidad 1 y no existiría vulnerabilidad relativa de profundidad del agua subterránea. Debido a

que la profundidad del agua subterránea es variable debe existir una valoración numérica de vulnerabilidad que distinga la zona más vulnerable a la contaminación, por esta razón se realizó la modificación de los intervalos de profundidad del agua subterránea en la Tabla 4.2.

Según la clasificación propuesta (Tabla 4.2), el intervalo de profundidad del agua subterránea en el DF corresponde a las categorías de vulnerabilidad de 1 a 9 (Figura 5.1), donde 1 representa la zona con mayor profundidad de la superficie piezométrica, es decir, la región menos vulnerable, y la categoría de vulnerabilidad 9 identifica la zona con menor profundidad piezométrica por lo que se considera la zona más vulnerable a la contaminación. Lo anterior se debe a que si un contaminante ingresa verticalmente desde la superficie del terreno y atraviesa la zona no saturada hasta la superficie piezométrica, el tiempo de tránsito que le toma llegar al acuífero es menor en las zonas con niveles piezométricos someros con respecto al tiempo de tránsito que le toma ingresar a niveles piezométricos profundos.

Como se observa en el mapa de la Figura 5.1, la clase de vulnerabilidad 1 es la que tiene mayor porcentaje del área de la Ciudad de México con el 54.7%, y corresponde a las zonas serranas donde los niveles son profundos (> 180 metros) y variables. La zona con vulnerabilidad 2 tiene un área del 1.6%, se localiza en las faldas de las Sierras de Las Cruces y Chichinautzin donde las profundidades son mayores a 138 metros. La zona de vulnerabilidad 3 posee un área del 3.9%, se ubica a los pies de las sierras Las Cruces, Chichinautzin y Guadalupe con profundidades que oscilan entre 90 y 138 metros. La superficie de vulnerabilidad 5, con un área del 23.7%, posee profundidades entre 54 y 90 metros y se ubica en la mayor parte de la planicie lacustre. La región de vulnerabilidad 7 se encuentra también en la planicie, ocupa un área del 14.6% e incluye profundidades mayores a los 27 metros. Finalmente, la categoría de vulnerabilidad 9 ocupa un área del 1.5%, se identifica rápidamente en las delegaciones Venustiano Carranza, Tláhuac y un pequeño sector en Iztapalapa donde las profundidades son menores a los 27 metros.

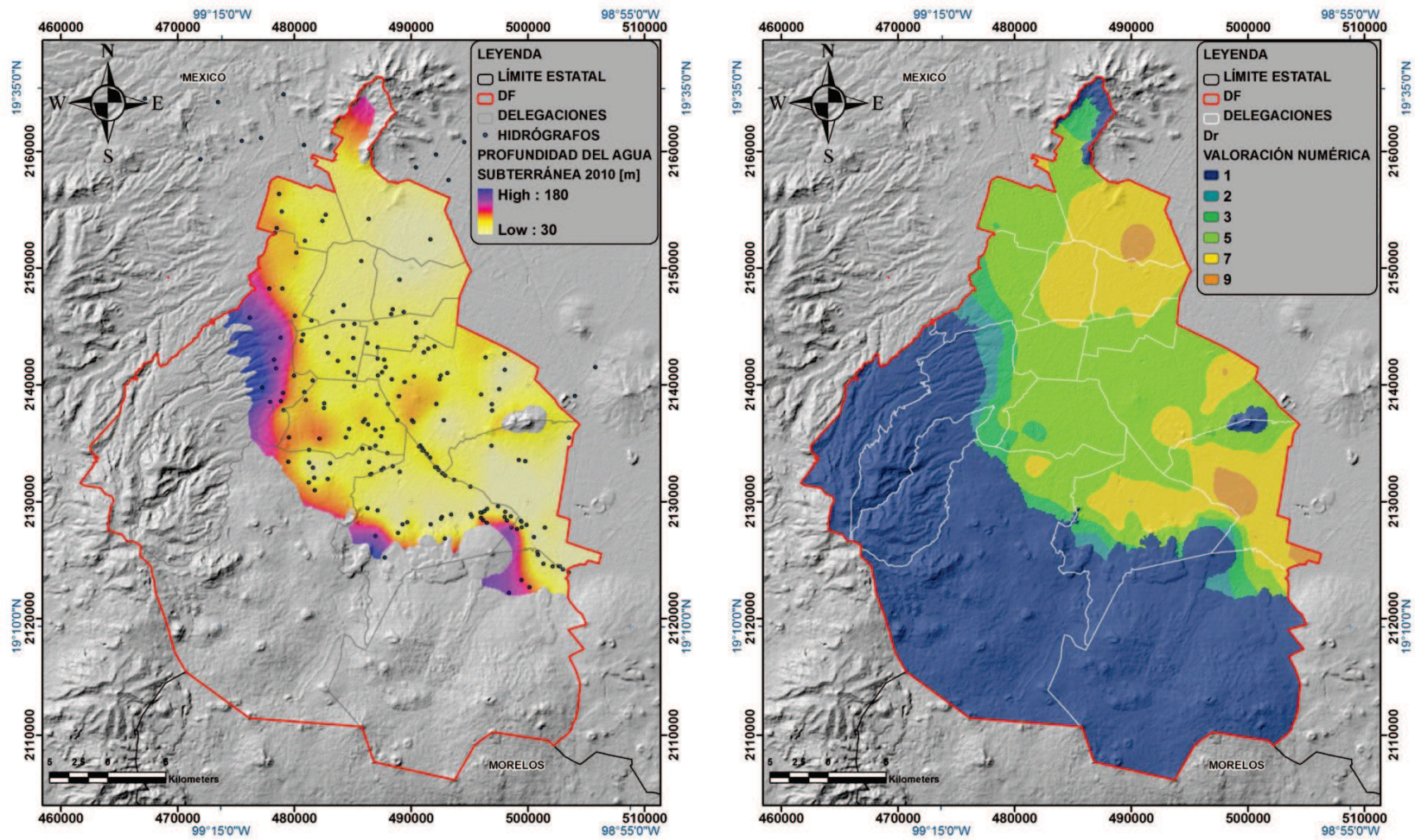


Figura 5.1. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración de profundidad del agua subterránea 2010 donde los tonos amarillos corresponden a niveles someros y los tonos azules representan niveles profundos. Los puntos verdes muestran la localización de los hidrógrafos de pozos utilizados para la configuración. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de profundidad del agua subterránea Dr donde se muestran en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.2 Recarga potencial Rr

Es preciso recordar que los resultados de este apartado se refieren a un proceso de infiltración potencial que será considerado como recarga potencial en el modelo DRASTIC-Sg. Cabe destacar que los términos infiltración y recarga no son sinónimos ya que el primero se refiere a la cantidad total de agua que ingresa desde la superficie del suelo, que se transporta verticalmente hacia el acuífero pero que no necesariamente llega al mismo debido a que es susceptible de perder un porcentaje de la cantidad inicial por efecto de la evapotranspiración y/o quedar retenido en las partículas del suelo como parte de la capacidad de campo antes de llegar al acuífero. Mientras que recarga es la cantidad total del agua que ingresa verticalmente desde la superficie del suelo atravesando la zona no saturada y que llega hasta la superficie piezométrica, por lo que puede decirse que es un porcentaje de la infiltración. Por otro lado, este proceso de recarga potencial no considera los efectos de la recarga proveniente de las fugas en la red del sistema de drenaje profundo y/o pérdidas por conducción en la red de agua potable así como el aporte derivado del drenado vertical del acuitardo arcilloso. Lo anterior se debe a que la determinación de dichas láminas de recarga resulta un proceso sumamente complejo, que bien puede ser un proyecto independiente a este trabajo, ya que habría que determinar las zonas donde dichos fenómenos tienen mayor importancia y este análisis queda fuera del alcance técnico de la presente tesis. Asimismo, es preciso señalar que el objetivo de este trabajo no contempla modificar el nombre de alguno de los parámetros de la metodología DRASTIC (Aller, 1987) sino adicionar los efectos del parámetro gradiente de subsidencia (Sg), por lo que se conserva el término recarga pero se aclara que es “potencial”, es decir, que recarga potencial es la cantidad máxima de recarga que puede ingresar al acuífero.

En el mapa de la Figura 5.2 se muestra que la infiltración potencial es mayor en la zona de la Sierra Chichinautzin con aproximadamente 585 mm/año, le sigue la zona de la sierra de Santa Catarina con aproximadamente 250 mm/año y la Sierra de las Cruces con alrededor de 150 mm/año. Se muestra que una porción

considerable de la Sierra de Guadalupe forma parte del área urbanizada que se considera impermeable debido a la presencia de construcciones de casas habitación y de la cobertura asfáltica que impide la infiltración por precipitación al subsuelo de manera significativa. Según la Tabla 4.3 propuesta por Aller (1987), los valores anteriores de infiltración potencial, que se consideran como recarga potencial en la metodología DRASTIC-Sg, corresponden a las categorías de vulnerabilidad 1 a 9, donde 1 representa la zona con menor recarga (menor vulnerabilidad) y la categoría 9 es la zona donde hay mayor recarga al acuífero por lo tanto, esta última categoría resulta más vulnerable. Lo anterior debido a se considera que los contaminantes ingresan verticalmente transportados por el agua de recarga atravesando la zona no saturada donde se dispersan y/o diluyen dependiendo de la cantidad del agua de recarga disponible.

En el mapa de la Figura 5.2 se muestra que la zona de vulnerabilidad 1 corresponde al mayor porcentaje del área del Distrito Federal, con el 52.9% pues representa el área urbana en su totalidad con láminas de recarga menores a 50 mm/año. La región de vulnerabilidad 3 cubre el 1.3% del área de estudio, se localiza en la planicie lacustre, en las delegaciones Tláhuac y Xochimilco, donde el suelo es solonchak cuyo intervalo de recarga es de 50 a 100 mm/año. La zona de vulnerabilidad 6 envuelve un área del 18.8% del Distrito Federal, que corresponde a gran parte de la Sierra de Las Cruces y Chichinautzin donde los suelos son andosoles y el intervalo de recarga es de 100 a 180 mm/año. La zona de vulnerabilidad 8 comprende un área del 4.1% del polígono del Distrito Federal, se presenta al este de la ciudad de México y al Sur de la Sierra Chichinautzin donde los suelos son regosoles, histosoles y en menor medida andosoles cuyos valores de recarga oscilan entre 180 y 250 mm/año. La superficie de vulnerabilidad 9 alcanza el 22.9% del área de estudio, incluye pequeñas partes de la Sierra de Las Cruces y la mayor parte de Chichinautzin donde los suelos son principalmente litosoles y feozem y la recarga es mayor a 250 mm/año.

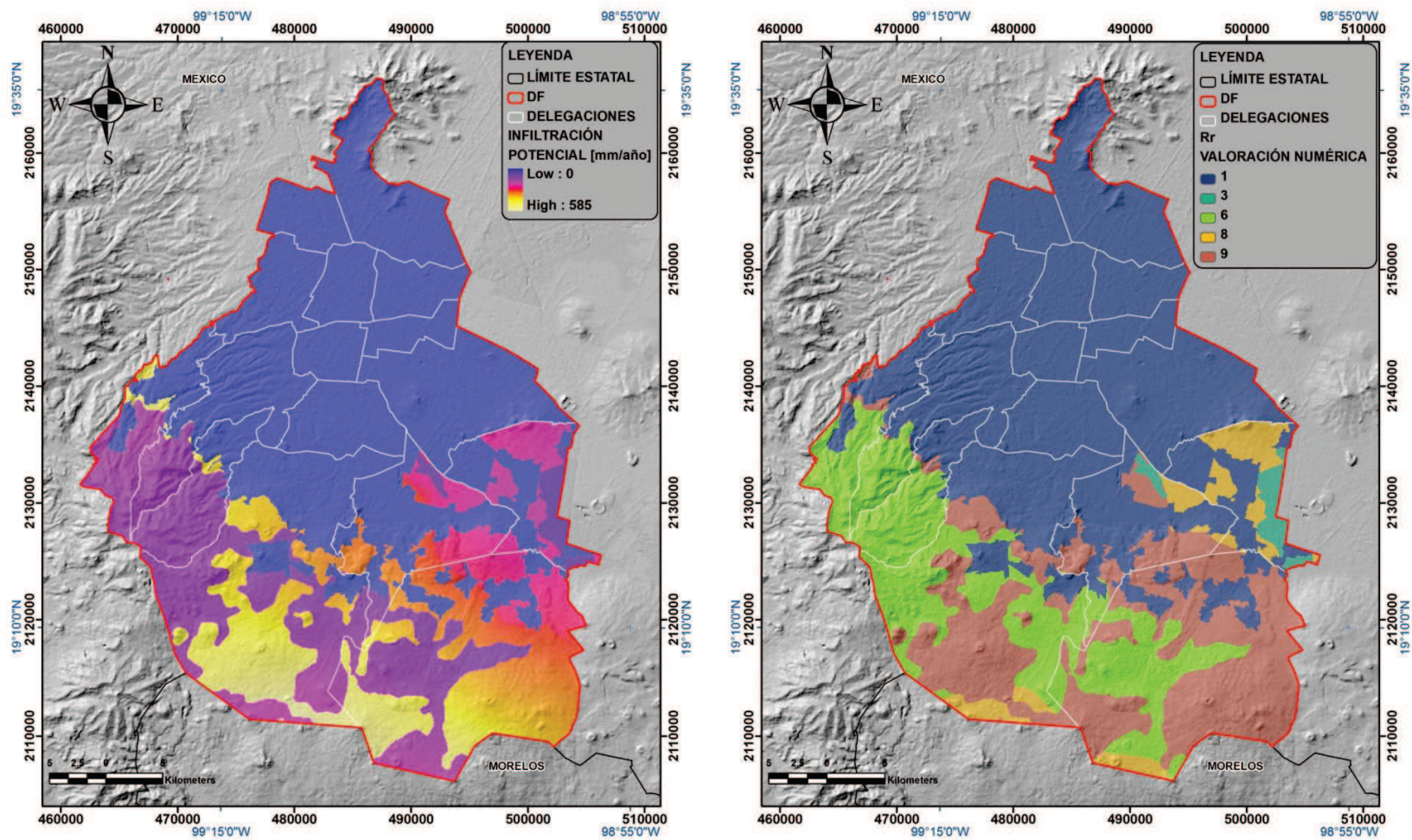


Figura 5.2. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración de la infiltración potencial en mm/año, en tonos azules se presentan las láminas de infiltración potencial bajas y en tonos amarillos las láminas de infiltración potencial altas. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de recarga Rr donde se muestran en tonos azules las categorías de vulnerabilidad baja y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.3 Litología del acuífero Ar

Con respecto al material acuífero, se presenta una configuración a semi-detalle que permite diferenciar los depósitos de materiales finos de aquellos de granulometría gruesa y/o litologías fracturadas (Tabla 4.5). Esta configuración puede ser cuestionable pues se deriva de la interpolación de las observaciones realizadas en los cortes litológicos proporcionados por el SACM (DGCOH, 1994) que no cubren la totalidad de la superficie del DF.

A continuación se presenta la estadística descriptiva para la valoración numérica de la litología del acuífero Ar (Tabla 5.1 y Figura 5.3).

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE Ar	
NÚMERO DE DATOS	361.00
MÍNIMO	1.00
MÁXIMO	9.00
MEDIA	5.25
MEDIANA	5.00
DESV. EST.	1.57
VARIANZA	2.45
COEF. ASIMETRÍA	0.26
CURTOSIS	1.77

Tabla 5.1. Estadística básica de Valoración numérica de litología del acuífero Ar.

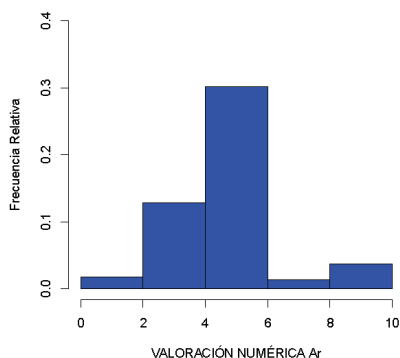


Figura 5.3. Histograma de valoración numérica de litología del acuífero Ar.

En la Tabla 5.1 se observa el número de cortes litológicos (sin considerar los puntos adicionales) utilizados para la interpolación, también se muestra la valoración numérica mínima y máxima de estos puntos así como los valores de media, mediana, desviación estándar, varianza, coeficiente de asimetría y curtosis de la muestra. Por otro lado, en el histograma de la Figura 5.3 se observa que la distribución de la valoración numérica de la litología del acuífero Ar es aproximadamente simétrica, con forma de campana de Gauss, con un ligero sesgo hacia la izquierda. La cercanía de los valores de media y mediana, así como el valor reducido de la desviación estándar y la varianza junto con la forma del histograma permite validar la simetría aproximada de la distribución de los datos de valoración numérica de la litología del acuífero. Lo anterior permite

descartar un transformación que mejore la simetría de los datos pues no hay necesidad de eliminar el efecto de los posibles valores extremos para ajustar el variograma (Gringarten y Deutsch, 2001).

En la Figura 5.4 (Izquierda) se muestra el variograma isotrópico (en dirección 90°) que se construyó en Surfer 10 para el logaritmo de valoración numérica de litología del acuífero, éste se constituye por 25 puntos con separación de 560 m (ver Cressie, 1991). El modelo de ajuste es exponencial con un máximo alcance de correlación de 1200 m y un efecto nugget de 0.016. Asimismo en la Figura 5.4 (Derecha) se muestra el número de pares que constituye cada punto del variograma y que se utilizó para realizar el ajuste manual. Cabe destacar, que el variograma se muestra afectado por un efecto agujero, que está relacionado con un fenómeno aleatorio (ver Cressie, 1991) y que fue ignorado para el ajuste.

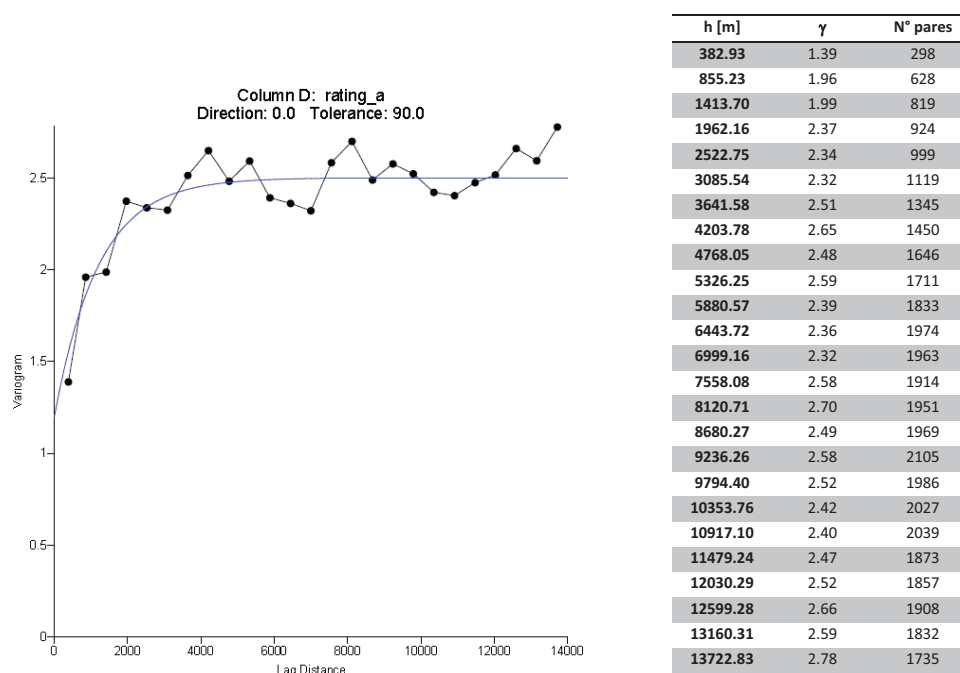


Figura 5.4. (Izquierda) Variograma isotrópico para la valoración numérica de litología del acuífero Ar. La línea azul representa el modelo de ajuste exponencial para los puntos negros que constituyen el semivariograma. (Derecha) Tabla que muestra la distancia (h) entre cada punto del variograma (γ) y los pares de datos (N° pares) que constituyen cada punto.

En la Figura 5.5 se observa el valor de vulnerabilidad que se le asignó a la litología o depósito inmediato al nivel piezométrico en un intervalo de 1 a 9 de acuerdo a la

Tabla 4.5. De esta forma, la clase de vulnerabilidad 1 representa la litología del acuífero con menor vulnerabilidad, es decir, aquella litología con alto contenido de arcillas, mayor superficie reactiva para atenuar los contaminantes y baja conductividad hidráulica, y la categoría 9 se atribuye a materiales de granulometría gruesa (gravas) que tienen menor superficie reactiva para atenuar los contaminantes y mayor conductividad hidráulica que le conceden mayor vulnerabilidad. Cabe destacar, que este parámetro evalúa el primer contacto que tiene el contaminante con el acuífero una vez que ha atravesado verticalmente la zona no saturada.

La zona de vulnerabilidad 1-2 ocupa el 6.6% del área del DF, se encuentra en la planicie lacustre, en gran parte de las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Iztapalapa y Tláhuac donde el nivel piezométrico se encuentra alojado en depósitos arcillosos y limosos. La superficie con vulnerabilidad 2-4 ocupa el 6% del área total, y se distribuye en las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztapalapa y Tláhuac, en esta zona el nivel piezométrico se identifica en cenizas volcánicas, arcillas arenosas, conglomerados, tobas, piroclastos y pómez. El área de vulnerabilidad 4-6 comprende el 69.6%, agrupa a las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, parte de Tlalpan, Milpa Alta, Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa, Iztacalco, Cuauhtémoc, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; en esta zona el nivel del agua subterránea se aloja en arenas, aglomerados, basaltos, basalto con escorias y en las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío Tmv (tobas, brechas volcánicas y lavas). La región de vulnerabilidad 6-8 corresponde a un área del 15.6% y se ubica en las delegaciones Tlalpan, Xochimilco, Coyoacán, Iztapalapa, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Azcapotzalco, donde la superficie piezométrica se localiza principalmente en escorias, piroclastos y arenas con grava. Finalmente, el área de mayor vulnerabilidad 8-10 corresponde a solamente el 2.1% del área total, se identifica en las delegaciones Tlalpan, Xochimilco, Coyoacán, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Azcapotzalco donde la superficie piezométrica se encuentra en depósitos de granulometría gruesa (gravas).

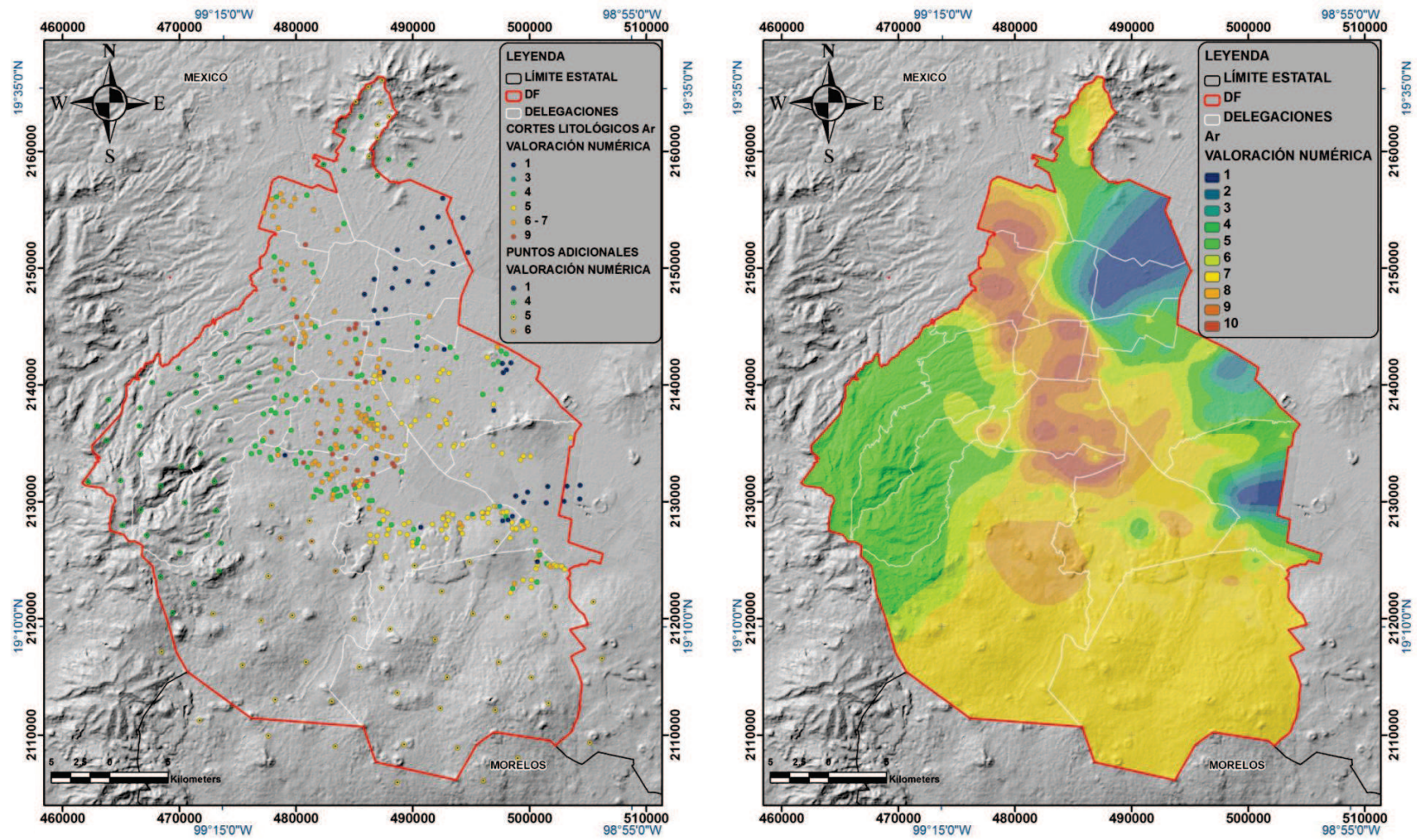


Figura 5.5. (Izquierda) Distribución de los cortes litológicos (DGCOH, 1984) con su valoración numérica y la localización de los puntos adicionales. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de la litología del acuífero Ar donde se muestra en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.4 Tipo de suelo Sr

El mapa de la Figura 5.6 muestra la edafología en el DF donde los principales tipos de suelos son Andosol, Feozem, Fluvisol, Gleysol, Histosol, Litosol, Regosol y Solonchak (INIFAP-CONABIO, 1995) cuyas características se describen en la sección 4.3.4. La zona urbana del DF presenta un material que se considera como un sustrato ya que no es de procedencia natural sino que se deriva de las actividades antropogénicas, especialmente de las actividades de la industria de la construcción, por lo que se trató como un suelo tipo feozem en lugar de un suelo ausente. A los suelos de la Figura 5.6, que poseen textura franca y arenosa les corresponden las clases de vulnerabilidad de 3 a 10 (según la Tabla 4.7), donde la categoría de vulnerabilidad 3 corresponde a suelos con mayor contenido de arcilla, que le brinda menor conductividad hidráulica y mayor capacidad de retención y/o asimilación de contaminantes, por lo que son suelos menos vulnerables. Por otro lado, la categoría de vulnerabilidad 10 corresponde a suelos arenosos, con mayor pedregosidad que le otorga mayor conductividad hidráulica, lo que acelera el paso del contaminante a través del suelo disminuyendo la posibilidad de alguna reacción de asimilación y/o retención en el mismo, por lo que se considera un suelo más vulnerable.

De acuerdo al mapa de la Figura 5.6, la zona de vulnerabilidad 3 corresponde al 2.2% del área, donde el suelo es Solonchak que se localiza en parte de las delegaciones Venustiano Carranza, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. La región con vulnerabilidad 4 ocupa un 21.7%, le corresponden los suelos de tipo Andosol que se localizan en las Sierras de Las Cruces y Chichinautzin. La zona de vulnerabilidad 8 posee el 3% del área, es suelo tipo Histosol que se localiza en las delegaciones Xochimilco y Tláhuac. La superficie de vulnerabilidad 9 corresponde a suelo tipo Feozem, que ocupa el 52.2% del área del DF y está presente en las 16 delegaciones. Finalmente, el sector de vulnerabilidad 10 corresponde a Litosoles y Regosoles que se localizan en las Sierras Chichinautzin y Santa Catarina.

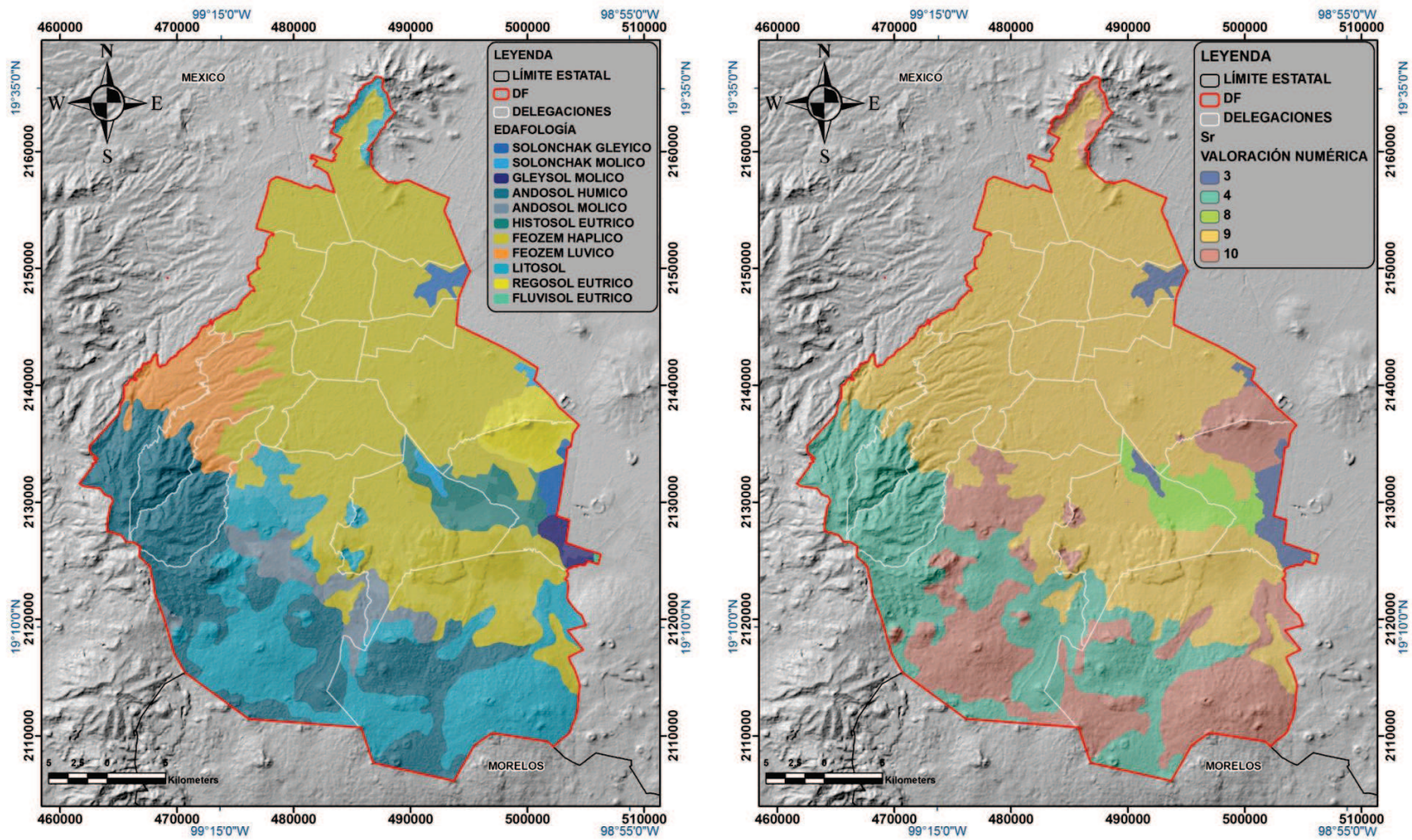


Figura 5.6. (Izquierda) Mapa Edafológico para el Distrito Federal (Modificado de INIFAP-CONABIO, 1995). (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de tipo de suelo Sr donde se muestran en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.5 Topografía Tr

En la Figura 5.7 (Izquierda) se muestra el mapa de pendiente del terreno en porcentaje cuya clasificación se encuentra desde 0% a más del 18%. A estos porcentajes les corresponden las clases de vulnerabilidad 1 a 10 según la Tabla 4.8 original de Aller (1987). En la clase de vulnerabilidad 1 se agrupan las pendientes mayores al 18% y se consideran de menor vulnerabilidad, debido a que son pendientes pronunciadas donde el contaminante adquiere mayor velocidad de transporte en la superficie del terreno, es decir, que adquiere mayor escurrimiento sobre el suelo, lo que disminuye su posibilidad de infiltrarse en el subsuelo. Por otro lado, en pendientes suaves, como las de la categoría 10, la velocidad de transporte en superficie o escurrimiento es menor, lo que permite que el contaminante se acumule y comience su infiltración o movimiento vertical hacia el acuífero.

En la Figura 5.7 (Derecha) se muestran claramente dos zonas, la que corresponde a las categorías de vulnerabilidad 1, 3 y 5 que engloban una zona del 64.4% del área de estudio donde los valores de la pendiente oscilan entre el 6% y más del 18%, las cuales, se localizan en las zonas más pronunciadas de las sierras. Y la zona que agrupa a las regiones de vulnerabilidad 9 y 10 que se localizan en la planicie lacustre abarcando un área del 35.6% y que corresponden a pendientes menores al 6%. En las zonas de vulnerabilidad 9 y 10, se localiza la infraestructura urbana y subterránea del DF, es decir, gasolineras, diversas industrias, ductos, sistema de drenaje, etc. que pueden servir como fuentes potenciales de contaminación y donde cualquier contaminante derramado tiene la posibilidad de acumularse e infiltrarse hacia la zona vadosa.

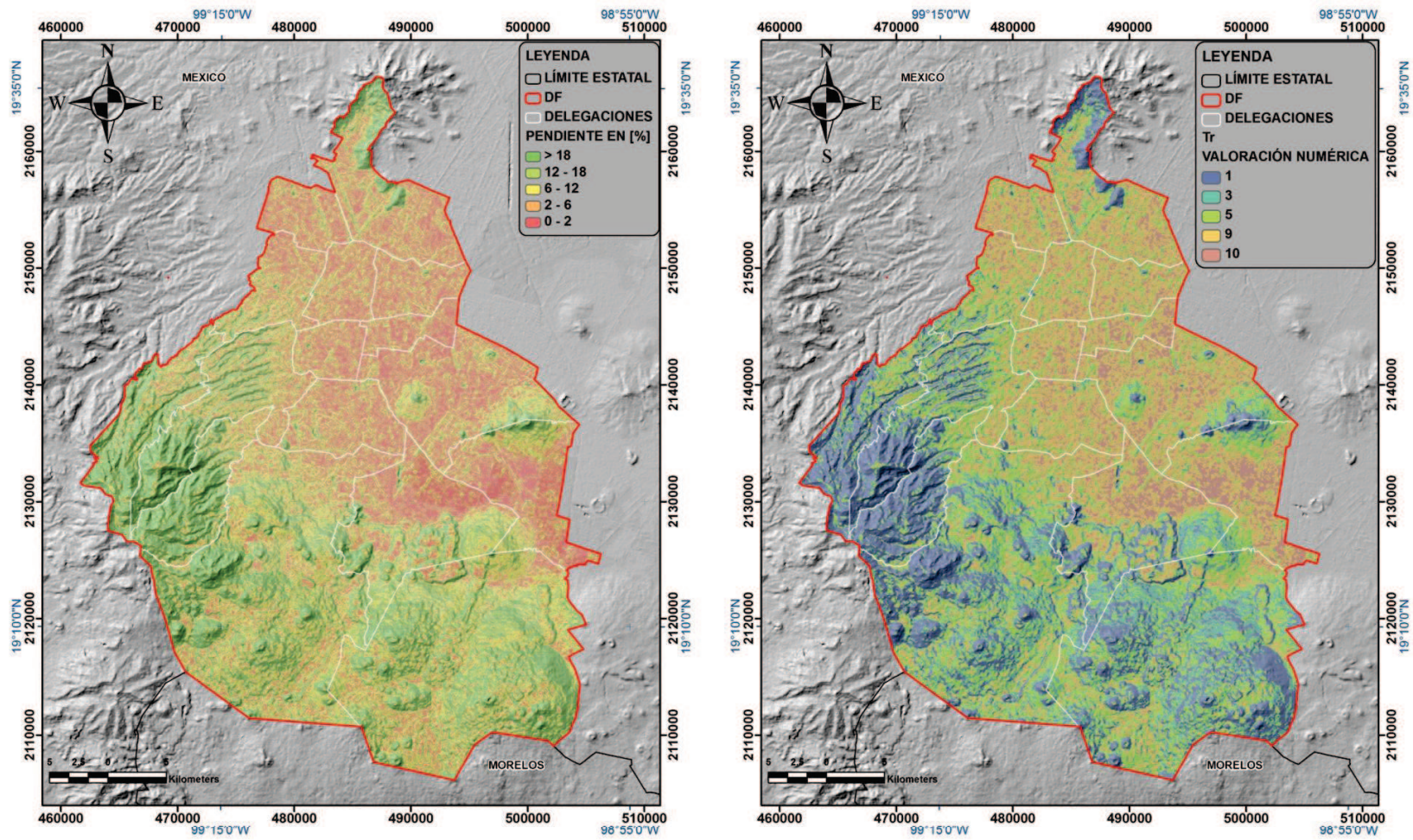


Figura 5.7. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración de la pendiente del terreno en porcentaje. En tonos verdes se presentan las pendientes suaves y en tonos rojos las pendientes pronunciadas. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de la topografía Tr donde se muestran las en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.6 Impacto a la zona vadosa Ir

De manera análoga al medio acuífero, en este apartado se presentan los resultados de la configuración a semi-detalle de la zona vadosa donde se distingue la vulnerabilidad relativa del conjunto de materiales que la constituyen de acuerdo a los niveles piezométricos actuales. Esta configuración se deriva de las observaciones realizadas en los cortes litológicos (sección 4.3.6) proporcionados por el SACM (DGCOH, 1994).

En la Tabla 5.2 y Figura 5.8 se muestra la estadística descriptiva de la valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE Ir	
NÚMERO DE DATOS	361.00
MÍNIMO	1.09
MÁXIMO	9.88
MEDIA	5.32
MEDIANA	5.70
DESV. EST.	1.32
VARIANZA	1.74
COEF. ASIMETRÍA	-0.58
CURTOSIS	0.41

Tabla 5.2. Estadística básica de valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir.

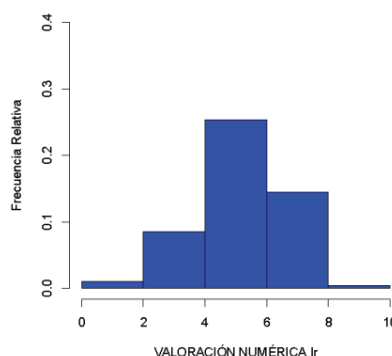


Figura 5.8. Histograma de valoración numérica del impacto a la zona vadosa Ir.

En la Tabla 5.2 se muestra el número de cortes litológicos utilizados en la interpolación así como los valores mínimos y máximos de la valoración numérica, la media, mediana, desviación estándar, varianza, coeficiente de asimetría y curtosis de la muestra. La Figura 5.8 muestra un histograma donde se observa que el tipo de distribución de los datos de valoración numérica es aproximadamente simétrica, con un ligero sesgo hacia la derecha. La cercanía de los valores de media y mediana, los valores mínimos de desviación estándar y varianza junto con la forma de campana del histograma permiten validar la simetría aproximada de la distribución de la valoración numérica del impacto a la zona vadosa. Esta simetría en la distribución permite descartar una transformación de los datos ya que no hay necesidad de eliminar el efecto de los posibles valores extremos para ajustar el semivariograma (Gringarten y Deutsch, 2001).

En la Figura 5.9 se presenta el variograma isotrópico (en dirección 90°) que se construyó en Surfer 10 para la valoración numérica del impacto a la zona vadosa, este se constituye por 25 puntos cada 560 m de distancia. El modelo de ajuste es exponencial con alcance de máxima correlación de 3000 m y efecto nugget de 0.05. También se muestra en la Figura 5.9 (Derecha) el número de pares que constituye cada punto del variograma y que se utilizó para realizar el ajuste manual. Cabe mencionar que el semivariograma presenta rasgos del efecto agujero que está vinculado a un fenómeno aleatorio (ver Cressie, 1991), por lo que no se consideró en el ajuste.

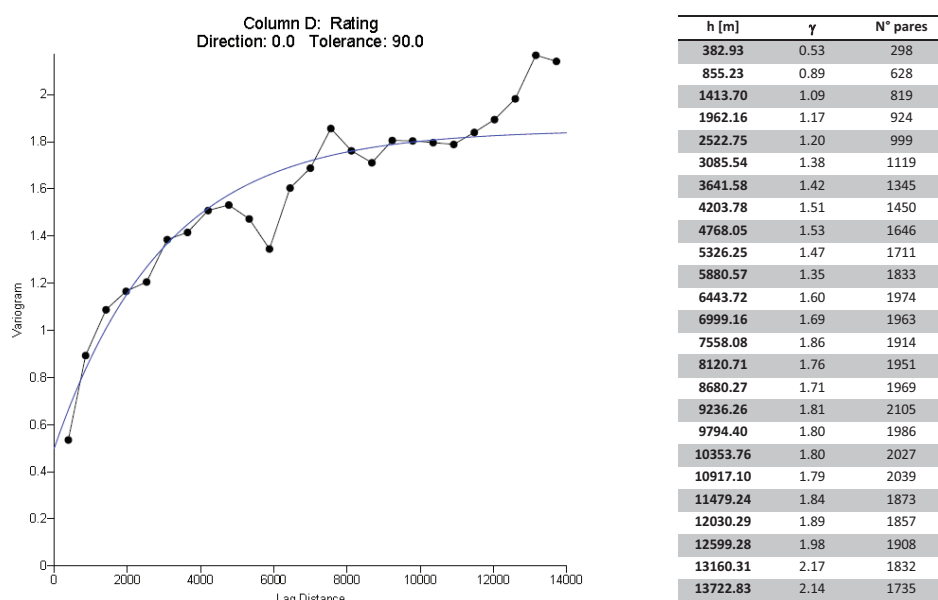


Figura 5.9. (Izquierda) Variograma isotrópico para el logaritmo de valoración numérica del impacto a la zona vadosa I_r . La línea azul representa el modelo de ajuste exponencial para los puntos negros que constituyen el semivariograma. (Derecha) Tabla que muestra la distancia (h) entre cada punto del variograma (γ) y los pares de datos (N° pares) que constituyen cada punto.

En el mapa de la Figura 5.10 (Izquierda), se muestra la localización de los cortes litológicos utilizados para la configuración del impacto a la zona vadosa; asimismo se muestra que los valores de vulnerabilidad asignados, de acuerdo a los materiales presentes en la zona no saturada (Tabla 4.10) y su espesor se encuentran entre 1 y 10. De esta forma, la categoría de vulnerabilidad 1

representa los materiales de la zona vadosa que en conjunto poseen menor conductividad hidráulica que concede al contaminante un tiempo de tránsito largo, lo que permite mayor posibilidad de atenuación del contaminante y por lo que estos materiales resultan menos vulnerables; mientras que la categoría 10 corresponde a los materiales que en conjunto tienen mayor conductividad hidráulica y que por tanto, el contaminante no tiene el tiempo de residencia suficiente como para atenuarse por el medio, así que resultan más vulnerables. El parámetro I_r evalúa la capacidad de los materiales de la zona no saturada para permitir el transporte vertical de los contaminantes y su capacidad de atenuación.

En el mapa de la Figura 5.10 (Derecha), se observa que las categorías de vulnerabilidad 1-2 ocupan gran parte de las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa y Tláhuac. Representan el 11.6% del área de estudio y agrupan materiales principalmente arcillosos. Las clases de vulnerabilidad 2-4 se localizan en parte de las delegaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztapalapa, Iztacalco, Coyoacán, Xochimilco y Tláhuac. Los materiales que agrupan son principalmente intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas, arenas y tobas; comprenden el 14.8% del área del DF. La región con vulnerabilidad 4-6 se localiza principalmente en las delegaciones Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Benito Juárez, Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac, Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta, que cubren el 65.2% del área de estudio. Agrupan principalmente basaltos intercalados con conglomerados, arenas, gravas y tobas. Las zonas de vulnerabilidad 6-8 se localizan en parte de las delegaciones Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán, Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, donde cubre el 8.2% del DF. Estas zonas agrupan intercalaciones de arena, grava, conglomerado y basalto. Finalmente, la superficie con vulnerabilidad 8-10 corresponde a las delegaciones Magdalena Contreras y Álvaro Obregón, donde se localiza una intercalación de conglomerado, grava, arena y basalto que abarca el 0.2% del área del DF.

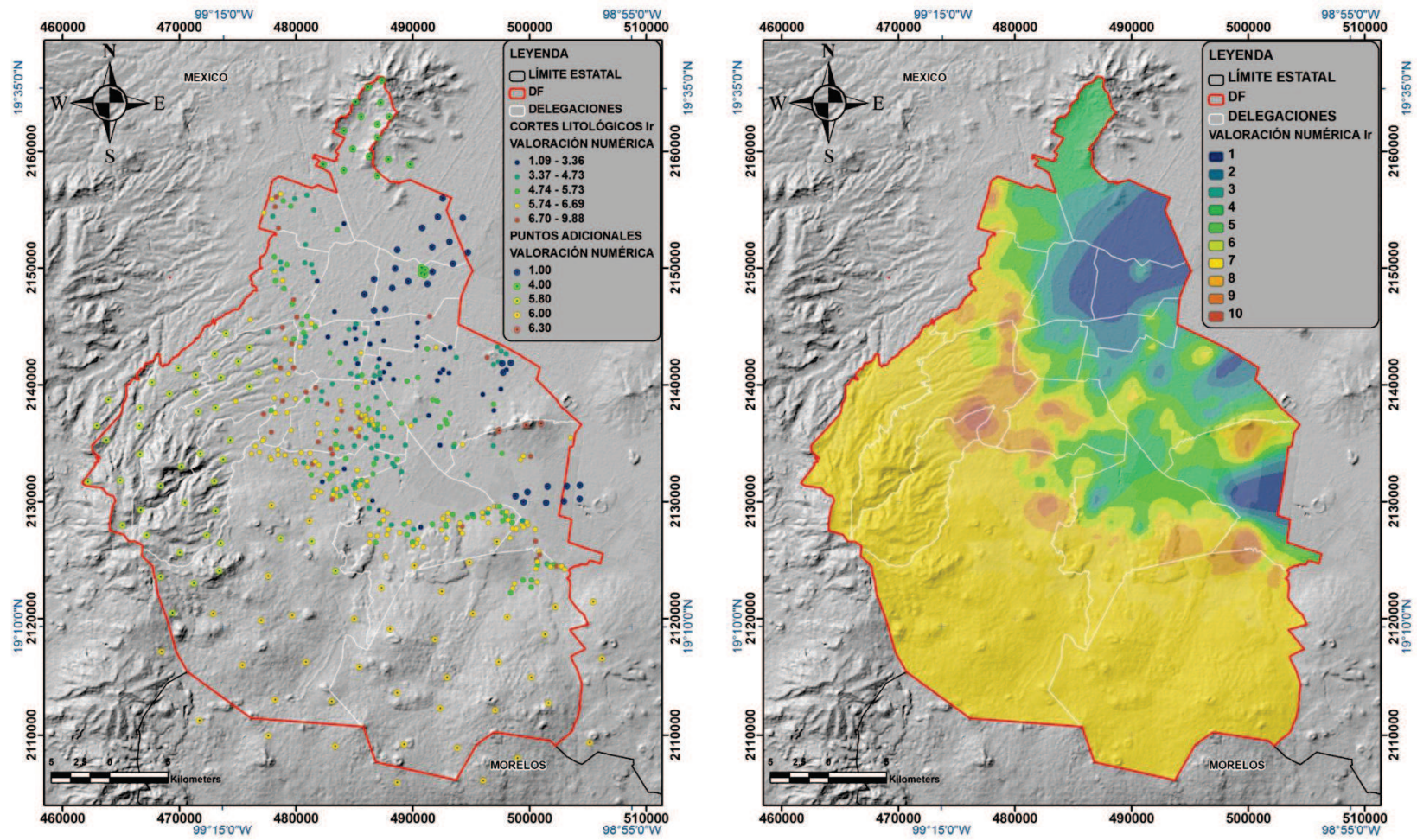


Figura 5.10. (Izquierda) Mapa que muestra la distribución de los cortes litológicos (DGCOH, 1994) con su valoración numérica y los puntos adicionales. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa Ir donde se muestran en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.7 Conductividad hidráulica Cr

La conductividad hidráulica se obtuvo con la reinterpretación de las pruebas de bombeo proporcionadas por el SACM (DGCOH, 1983, 1992 y 1993) mediante el método numérico de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991) ya que esta metodología permite asumir mejor las condiciones que se presentan durante la prueba de bombeo (ver sección 4.3.7) y permite considerar que el acuífero se constituye por varias litologías, lo que se restringe en los métodos convencionales ya que su resolución deriva de observaciones de un tipo específico de litología.

Por otro lado, al revisar las interpretaciones y reinterpretaciones de las pruebas de bombeo anteriormente referidas, se pudo observar que la conductividad hidráulica varía hasta 2 órdenes de magnitud con interpretaciones analíticas (DGCOH, 1983, 1992 y 1983; Vázquez-Sánchez, 1995) y numéricas (Vázquez-Sánchez, 1995). Por esta razón, se optó por realizar otra reinterpretación más de las pruebas de bombeo con ambos métodos, sin embargo, en este apartado solo se muestran los resultados de la reinterpretación con el método numérico. Lo anterior se debe a que el objetivo principal de este trabajo es presentar la metodología DRASTIC-Sg para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos con subsidencia y el tema de parámetros hidráulicos puede tratarse como un trabajo adicional a este proyecto.

Cabe señalar, que el número de pruebas de bombeo es una limitante para generar una configuración espacial de conductividad hidráulica confiable, pues son 55 pruebas de bombeo proporcionadas de las que resultaron interpretables solamente 30 y finalmente no están bien distribuidas espacialmente en el DF. Por ejemplo, en la delegación Cuauhtémoc se tienen disponibles dos pruebas de bombeo (ver Figura 4.9) pero solamente se logró reinterpretar una.

Asimismo, los datos corresponden a observaciones realizadas en el pozo de bombeo, lo que cuestiona su confiabilidad ya que se requiere que las observaciones se realicen en pozos de observación, por lo que los valores de los

coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico que se presentan deben tomarse con reserva.

5.1.7.1 Parámetros hidráulicos

En la Tabla 5.3 se encuentra el resumen de los parámetros hidráulicos obtenidos mediante la reinterpretación de 30 pruebas de bombeo (sección 4.3.7) con el método de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991). Asimismo, en la Figura 5.11 se muestran algunos gráficos de interpretación.

N°	Clave Original	Modelo Conceptual	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Coefficiente de almacenamiento	Rendimiento específico
1	Per-9	Libre	13.450	12.000	1.00E-03	0.100
2	12	Libre	2.800	1.500	5.40E-04	0.120
3	18	Libre	1.250	0.600	1.80E-03	0.048
5	24	Libre	1.600	0.004	1.50E-06	0.006
7	38	Libre	1.090	0.070	4.00E-03	0.180
8	45	Libre	2.500	0.300	5.00E-03	0.150
9	51	Libre	6.200	1.800	3.00E-03	0.100
10	69	Libre	2.680	0.100	5.00E-03	0.190
11	119	Libre	10.000	10.000	6.00E-03	0.100
12	141	Libre	19.500	0.900	4.00E-06	0.030
13	148	Libre	4.680	0.300	3.00E-03	0.002
14	150	Libre	1.100	0.050	8.00E-04	0.030
15	170	Libre	19.500	0.002	1.00E-04	0.300
16	190	Libre	0.840	0.500	4.00E-05	0.006
17	194	Libre	4.670	0.050	8.00E-04	0.013
18	197	Libre	0.185	0.185	8.50E-05	0.007
19	Izt-8	Semiconfinado	40.000	40.000	5.00E-04	0.009
20	Per-3	Libre	0.370	0.100	3.50E-06	0.050
21	Per-14	Libre	1.680	0.350	6.00E-06	0.001
23	SL-15	Libre	39.200	0.600	2.50E-04	0.008
24	Xot-3B	Libre	0.800	0.100	3.00E-05	0.005
28	175	Libre	0.770	0.500	1.40E-03	0.042
29	165	Libre	3.850	0.100	9.00E-04	0.010
31	188	Libre	0.730	0.500	6.00E-05	0.110
32	SC-12	Libre	15.600	0.010	5.00E-05	0.006
33	N-6	Libre	0.990	0.090	1.00E-03	0.080
37	74	Libre	1.750	0.800	2.00E-04	0.030
38	PS-24	Libre	2.150	1.080	4.00E-03	0.100
41	155	Libre	1.700	0.100	3.50E-03	0.070
42	161	Libre	3.070	0.150	5.00E-03	0.250

Tabla 5.3. Resultados de la reinterpretación de las pruebas de bombeo mediante el método de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991). En la tabla se muestra el número consecutivo de la prueba de bombeo (N°), la clave original del pozo, el modelo conceptual utilizado para la reinterpretación, las conductividades hidráulicas horizontal (Kx) y vertical (Ky), los coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico que arroja el ajuste de curvas.

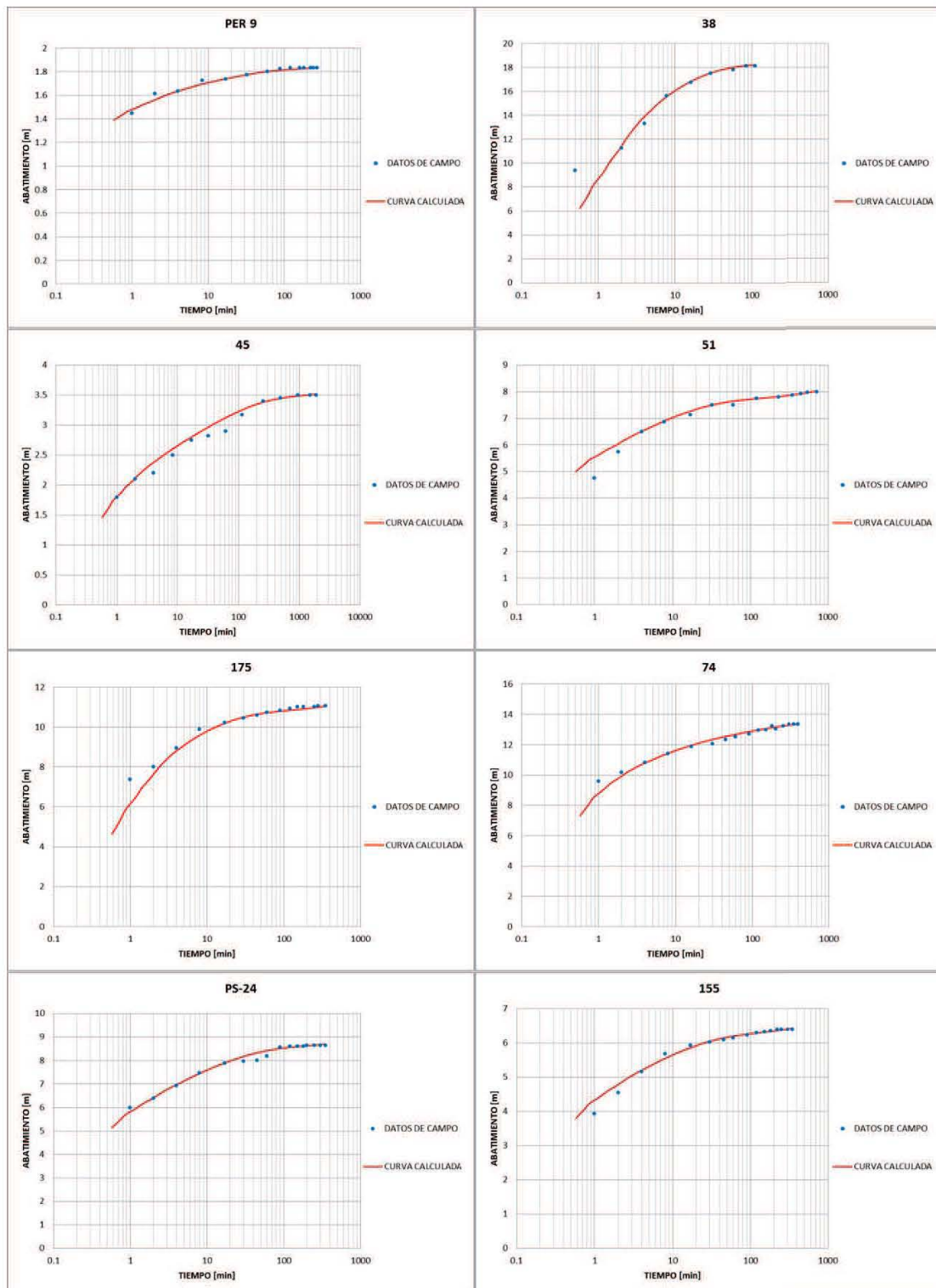


Figura 5.11. Gráficos de interpretación mediante el método de Rushton (Rushton-Redshaw, 1979 y Rushton-Rathod, 1988 y 1991). En puntos azules se muestran los datos de campo y en línea roja la curva de ajuste con el método anteriormente citado.

A continuación se presenta la estadística básica para la conductividad hidráulica determinada (Tabla 5.4 y Figura 5.12).

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE K	
NÚMERO DE DATOS	30.00
MAXIMO	40.00
MINIMO	0.19
MEDIA	2.80
MEDIANA	2.33
DESV. ESTANDAR	10.46
VARIANZA	109.51
COEF. ASIMETRIA	2.33
CURTOSIS	5.11

Tabla 5.4. Estadística básica de la conductividad hidráulica (método de Rushton) [m/d].

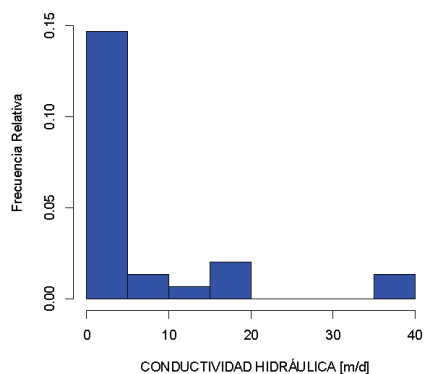


Figura 5.12. Histograma de la conductividad hidráulica (método de Rushton) [m/d].

En la Tabla 5.4 se muestra el número de datos analizados, el valor mínimo, máximo, la media, mediana, desviación estándar, varianza, coeficiente de asimetría y curtosis de la muestra de conductividades hidráulicas. Asimismo, en el histograma de la Figura 5.12 se observa que el tipo de distribución de los datos es asimétrica positiva, ya que se distingue un sesgo hacia la izquierda. Este comportamiento es frecuente en las variables ambientales, según lo expresan Zhang *et al.* (1995) y Zhang y Selinus (1998). Ellos mismos, argumentan la necesidad de una transformación que mejore la simetría en la distribución de los datos. Asimismo, la transformación de los datos se recomienda para disminuir la diferencia entre los valores extremos y evitar un comportamiento errático en el variograma que se presenta cuando el conjunto de datos posee valores atípicos (Gringarten y Deutsch, 2001).

Como resultado de la transformación logarítmica de los datos se presenta la Tabla 5.5 donde se observa la cercanía de los valores de media y mediana, así como los valores reducidos de la desviación estándar y varianza que junto con el histograma en forma de campana (Figura 5.13), con un ligero sesgo hacia la izquierda, permite validar la simetría de la distribución de los datos en logaritmo.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOG(K)	
NÚMERO DE DATOS	30.00
MAXIMO	1.76
MINIMO	-0.60
MEDIA	0.54
MEDIANA	0.53
DESV. ESTANDAR	0.59
VARIANZA	0.34
COEF. ASIMETRIA	0.20
CURTOSIS	0.22

Tabla 5.5. Estadística básica del Logaritmo de Conductividad Hidráulica [m/d].

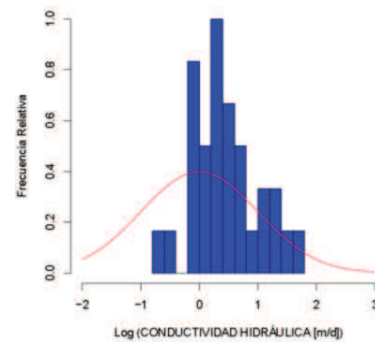
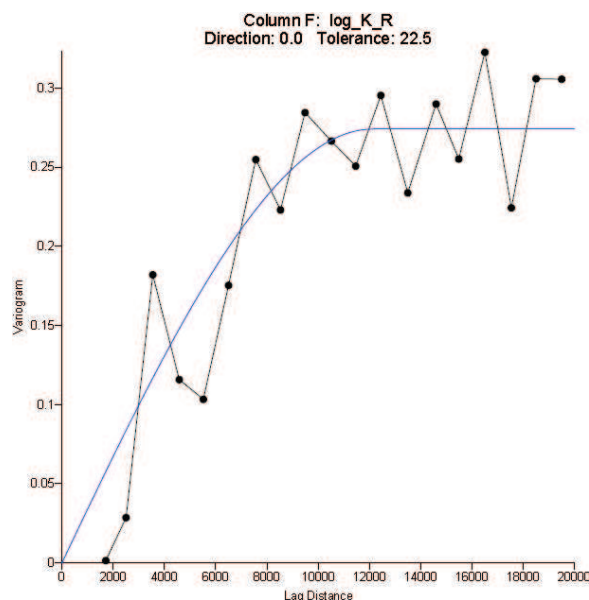


Figura 5.13. Histograma del Logaritmo de Conductividad Hidráulica [m/d]. La línea roja representa la curva típica de una distribución simétrica.



h [m]	γ	N° pares
1713.63	0.00	6
2505.61	0.03	26
3547.17	0.18	33
4579.83	0.12	36
5518.58	0.10	38
6503.06	0.18	55
7567.69	0.25	49
8530.02	0.22	61
9487.17	0.28	57
10513.89	0.27	68
11464.00	0.25	57
12446.35	0.30	71
13497.53	0.23	78
14600.79	0.29	64
15486.07	0.26	85
16504.70	0.32	86
17539.07	0.22	83
18501.57	0.31	64
19503.65	0.31	87

Figura 5.14. (Izquierda) Variograma en dirección 0° para el logaritmo de conductividad hidráulica (m/d). La línea azul representa el modelo de ajuste esférico. (Derecha) Tabla que muestra la distancia (h) entre cada punto del variograma (γ) y los pares de datos (N° pares) que constituyen cada punto.

La Figura 5.14 muestra el variograma calculado en Surfer 10 para el logaritmo de conductividad hidráulica (m/d), el que se construyó en dirección 0° con tolerancia de 22.5°, con tamaño del intervalo de 792 m y 19 puntos (ver Cressie, 1991). El modelo de ajuste para el semivariograma es esférico con un alcance de 10000 m, radio de anisotropía de 0.6 y ángulo de anisotropía de 135°. En la Figura 5.14

(Izquierda) se observa el número de pares que constituye cada punto del variograma y que se utilizaron para el ajuste manual.

El mapa de la Figura 5.15 (Izquierda) muestra la distribución de la conductividad hidráulica; asimismo muestra el intervalo de conductividad que arrojó la interpolación, de 0.2 a 20 [m/d] (sección 4.3.7). Este intervalo de conductividad hidráulica corresponde a las clases de vulnerabilidad de 1 a 4 propuestas por Aller (1987), donde la clase de vulnerabilidad 1 representa bajas conductividades hidráulicas que vuelven menos vulnerable al acuífero, mientras que la clase de vulnerabilidad 4 corresponde a conductividades hidráulicas mayores que provocan que esa zona del acuífero sea más vulnerable. Lo anterior se debe a que este parámetro evalúa la velocidad con la que un contaminante se desplaza dentro del acuífero, suponiendo que su velocidad es igual a la velocidad del agua.

También en la Figura 5.15 (Derecha), se muestra el mapa de vulnerabilidad relativa de conductividad hidráulica Cr. En el mapa, la región de vulnerabilidad 1 ocupa mayor parte del área de estudio con el 49.6%, se distribuye en 15 delegaciones del DF. Se localiza en parte de la planicie lacustre y de la sierras de Las Cruces y Guadalupe donde las conductividades hidráulicas son menores a 4 m/d. La zona de vulnerabilidad 2 corresponde al 15.8% del DF, se localiza en las delegaciones Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Benito Juárez, Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta y Tlalpan, ocupando parte de la Sierra Chichinautzin y parte de la planicie lacustre con conductividades hidráulicas que oscilan entre 4 y 12 m/d. Finalmente, la superficie de vulnerabilidad 4 representa el 34.6% del área total, incluye parte de las delegaciones Azcapotzalco, Iztapalapa, Tláhuac, Milpa Alta, Xochimilco y Tlalpan, en el área de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, donde las conductividades hidráulicas se encuentran entre 12 y 28 m/d.

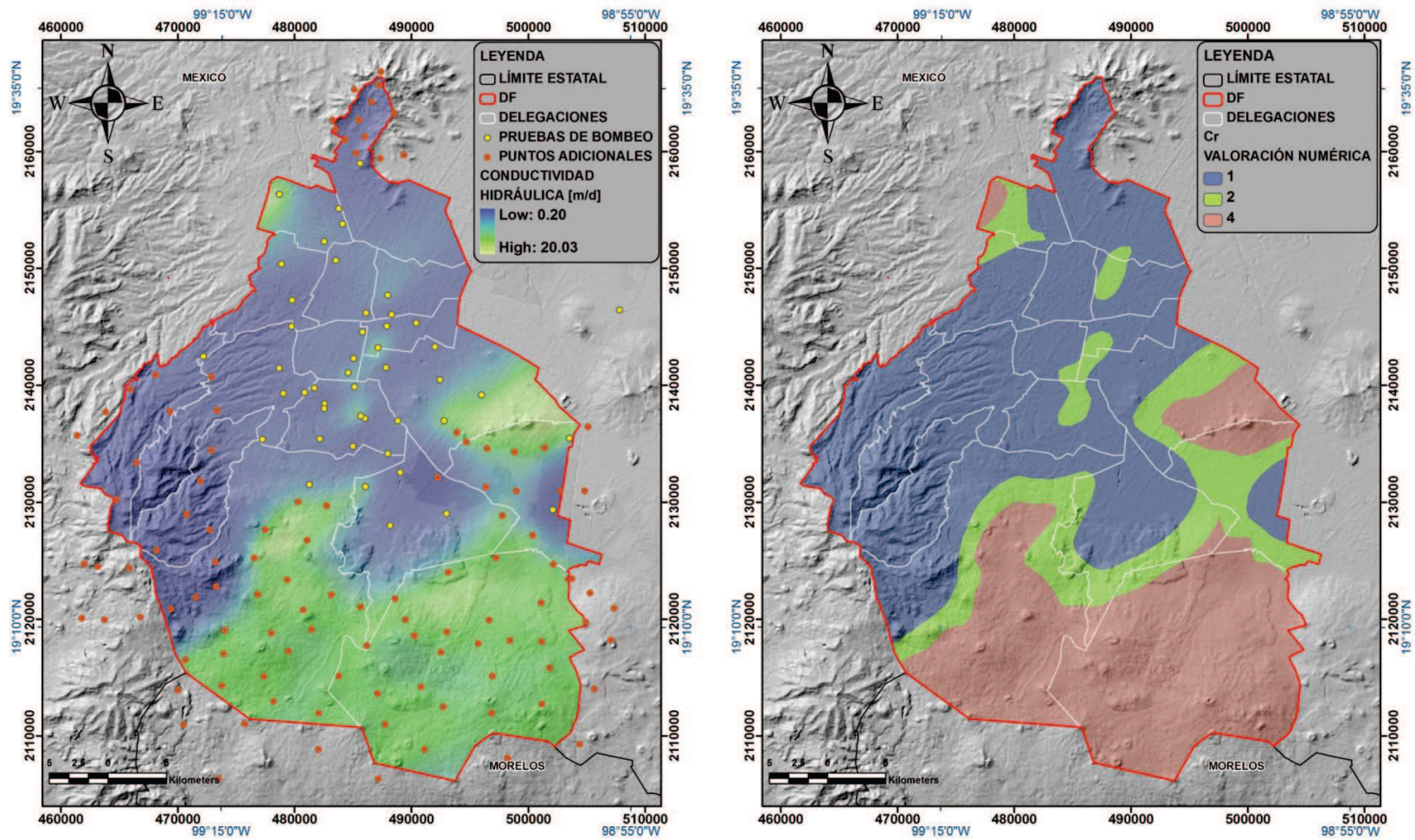


Figura 5.15. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración espacial de la conductividad hidráulica [m/d], la localización de las pruebas de bombeo (puntos amarillos) y los puntos adicionales (puntos rojos) para la interpolación. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa de la conductividad hidráulica Cr donde se muestran en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.2.8 Gradiente de subsidencia Sgr

La Figura 5.16 presenta la configuración de la tasa de subsidencia derivada de los datos presentados por Solano *et al.* (2012). En ella se muestra que la zona con alto contenido de arcilla localizada al oriente del Distrito Federal experimenta una máxima tasa de subsidencia de -344 mm/año. También muestra que la zona estable, es decir, que presenta una variación positiva mínima en la magnitud de subsidencia (+7 mm/año), corresponde con material volcánico y/o depósitos de granulometría gruesa (ver sección 3.2.2 y Figura 3.3).

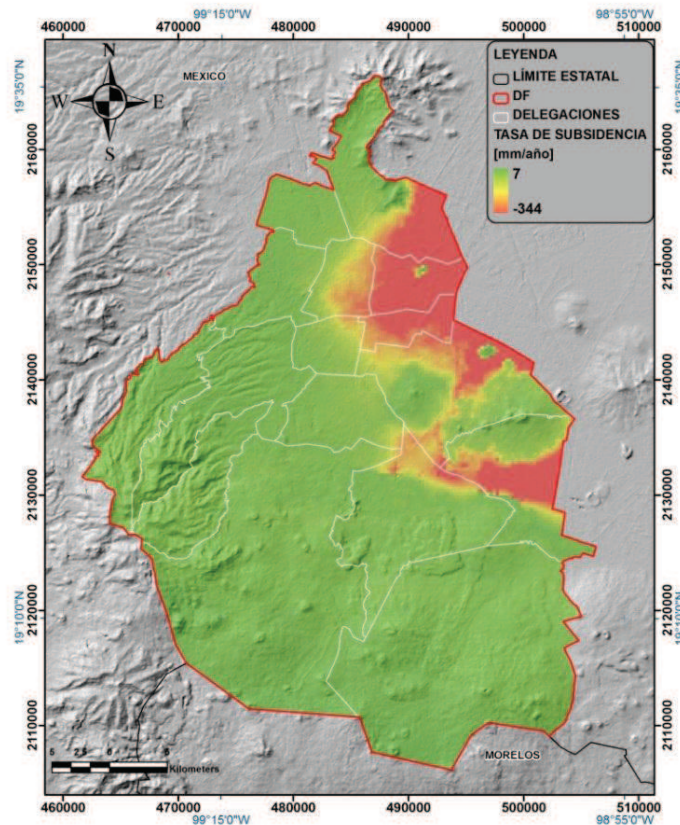


Figura 5.16. Mapa que muestra la tasa de subsidencia en [mm/año] (Solano *et al.*, 2012). En rojo se identifican las zonas con mayor hundimiento diferencial mientras que en verde se identifican las zonas estables. Los límites delegacionales se muestran en líneas blancas y la extensión del DF en línea roja.

A nivel mundial, se reporta que Los Ángeles, California experimentó por décadas una tasa de 700 mm/año como respuesta de la extracción de petróleo, gas y agua

subterránea (Zektser *et al.*, 2004). Actualmente, la tasa de subsidencia que experimenta el acuífero de la Ciudad de México es la de mayor magnitud reportada únicamente como consecuencia de extracción de agua subterránea desde 300 mm/año (Osmanoglu *et al.*, 2010; Chaussard *et al.*, 2013) hasta 380 mm/año (López-Quiroz *et al.*, 2010). Le siguen en magnitud el acuífero de Jakarta, Indonesia que experimenta una tasa de 250 mm/año (Douglas, 2005; Abidin *et al.*, 2010) y el acuífero de Semarang, Indonesia con una tasa de 160 mm/año (Marfai y King, 2007). A nivel nacional, le sigue en magnitud el acuífero de Mexicali, Baja California con una tasa de 180 mm/año (Sarychikhina *et al.*, 2010), y con una tasa de 100 mm/año los acuíferos de Celaya, Guanajuato (Ávila-Olivera *et al.*, 2010) y Toluca, Estado de México (Calderhead *et al.*, 2010).

En el mapa de la Figura 5.17 (Izquierda), se muestra el Gradiente de Subsidencia, calculado según la sección 4.3.8, donde se observa que éste varía entre 0 y más de $28(*10^{-3}$ m/m), la zona que presenta mayor gradiente corresponde a las delegaciones Iztapalapa, Venustiano Carranza, Tláhuac y Gustavo A. Madero, cuyo gradiente de subsidencia es mayor a $7(*10^{-3}$ m/m). Asimismo, se distingue claramente que la delegación Iztapalapa presenta el máximo gradiente de subsidencia, la cual es la delegación con mayor población (1'815,786 habitantes) (INEGI, 2010) y que consecuentemente posee las mayores demandas de agua.

Por otro lado, en el mapa de la Figura 5.17 (Derecha) se observa que la clase de vulnerabilidad 1 corresponde al 90.2% del área del DF por lo que está presente en las 16 delegaciones pero ocupa la totalidad de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Milpa Alta. La zona con vulnerabilidad 3 se identifica en las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa, Coyoacán, Xochimilco y Tláhuac, donde ocupa el 5.6% del área de estudio y le corresponde un gradiente de subsidencia entre 3.5 y $7(*10^{-3}$ m/m). La región de vulnerabilidad 5 se localiza en la delegación Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, en donde representa el 3.1% del área de estudio y cuyo gradiente de subsidencia oscila entre 7 y $14(*10^{-3}$

³m/m). La zona de vulnerabilidad 9 se encuentra en las delegaciones Venustiano Carranza, Iztapalapa y Tláhuac, ocupando el 0.9% del área del DF y agrupando a gradientes de subsidencia de 14 a $28(*10^{-3}$ m/m). Finalmente, la superficie de vulnerabilidad 10 se ubica principalmente en la delegación Iztapalapa y en menor medida en Venustiano Carranza y Tláhuac, en ellas suma el 0.2% del área del DF y considera a gradientes de subsidencia superiores a $28(*10^{-3}$ m/m).

El gradiente de subsidencia permite identificar rápidamente aquellas zonas propensas a desarrollar o propagar fracturas y fallas en el terreno, como las que se distinguen en la Calzada Ignacio Zaragoza, en la delegación Iztapalapa, y la zona del Peñón de los Baños, en la delegación Venustiano Carranza.

El gradiente de subsidencia es la tasa de cambio de la magnitud de subsidencia, la cual a su vez, depende de las características del subsuelo, la tasa o caudal de extracción y hasta de la estación del año, pues las mayores tasas de subsidencia se presentan en periodos secos (Calderhead *et al.*, 2010), sin embargo, en el caso de la Ciudad de México no se presentan variaciones estacionales significativas (Osmanoglu *et al.*, 2010). Por otro lado, también se le relaciona con el decremento de la conductividad hidráulica saturada, la cual a la larga disminuye la tasa de recarga al acuífero e incluso se especula que puede reducir permanentemente la capacidad de almacenamiento (Chen *et al.*, 2002). Lo anterior, implica que el parámetro gradiente de subsidencia esté relacionado con los parámetros litología del acuífero Ar, impacto a la zona vadosa Ir, profundidad del agua subterránea Dr, conductividad hidráulica Cr y recarga potencial Rr, con factores de peso 3, 5, 5, 3 y 4, respectivamente. De lo anterior, se propone que el peso del gradiente de subsidencia debe ser un promedio entre los pesos de los parámetros anteriormente mencionados, es decir que dada su importancia se le asigne un peso de 4 unidades, ya que al elegir el peso de 5 unidades se sobreestiman los efectos del nuevo parámetro y por otra parte si se asigna el peso de 3 unidades no se distingue un cambio significativo en la configuración espacial con respecto al Índice DRASTIC.

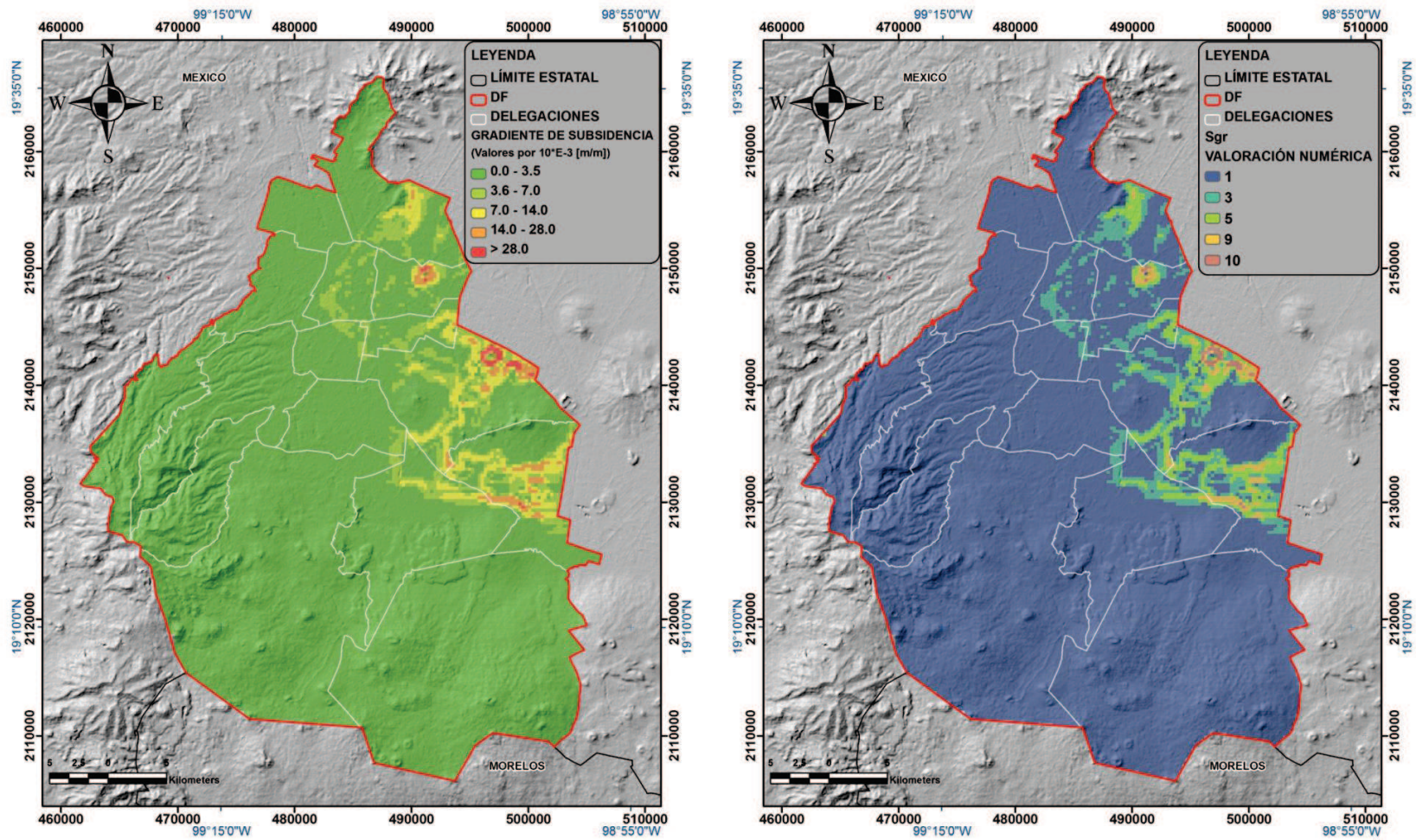


Figura 5.17. (Izquierda) Mapa que muestra el gradiente de subsidencia para el DF. Los tonos verdes representan bajos gradientes de subsidencia y los tonos rojos representan las zonas con alto gradiente de subsidencia. (Derecha) Mapa de vulnerabilidad relativa del gradiente de subsidencia Sgr donde se muestra en tonos azules las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

5.3 ÍNDICES DRASTIC Y DRASTIC-Sg

En la Figura 5.18 (Izquierda) se muestra el índice DRASTIC que se presenta con valores entre 59 y 158 unidades. Se puede observar que las zonas de mayor vulnerabilidad se encuentran en la Sierra Chichinautzin y Santa Catarina, en las delegaciones Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta y Tlalpan. Por otro lado, al observar el mapa se identifican algunas áreas definidas por los parámetros de vulnerabilidad relativa profundidad del agua subterránea (D_r), en la planicie, y recarga potencial (R_r) en los altos topográficos, que no necesariamente corresponden a zonas con altos valores del índice DRASTIC, sino que simplemente derivan de sus factores de peso 5 y 4, respectivamente. Asimismo, las zonas de alta vulnerabilidad se asocian con las principales zonas de recarga en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina donde se tiene la mayor vulnerabilidad relativa de recarga potencial R_r y conductividad hidráulica C_r , es decir, que estos parámetros tuvieron mayor influencia en el cálculo del índice DRASTIC. Por otro lado, la variabilidad del índice DRASTIC en la planicie se debe, principalmente, al factor de peso de 5 unidades de los parámetros de vulnerabilidad relativa profundidad del agua subterránea D_r e impacto a la zona vadosa I_r .

En la Figura 5.18 (Derecha) se muestra el índice DRASTIC-Sg con un intervalo de 63 a 179 unidades, donde la vulnerabilidad alta se encuentra en las delegaciones Tláhuac, Xochimilco, Iztapalapa y parte de Milpa Alta, Tlalpan y Venustiano Carranza. De manera inmediata, se observa que la vulnerabilidad alta se distribuye en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina, además de la variabilidad de la vulnerabilidad en la planicie. Lo anterior se debe al efecto de la vulnerabilidad relativa de los parámetros recarga potencial R_r y conductividad hidráulica C_r en la zona serrana y a la profundidad del agua subterránea D_r e impacto a la zona vadosa I_r en la planicie, al igual que en el índice DRASTIC. Además, en la planicie lacustre también resaltan patrones derivados de la integración del parámetro gradiente de subsidencia S_{gr} como se observa en las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero donde se tienen los mayores espesores del acuitardo arcilloso.

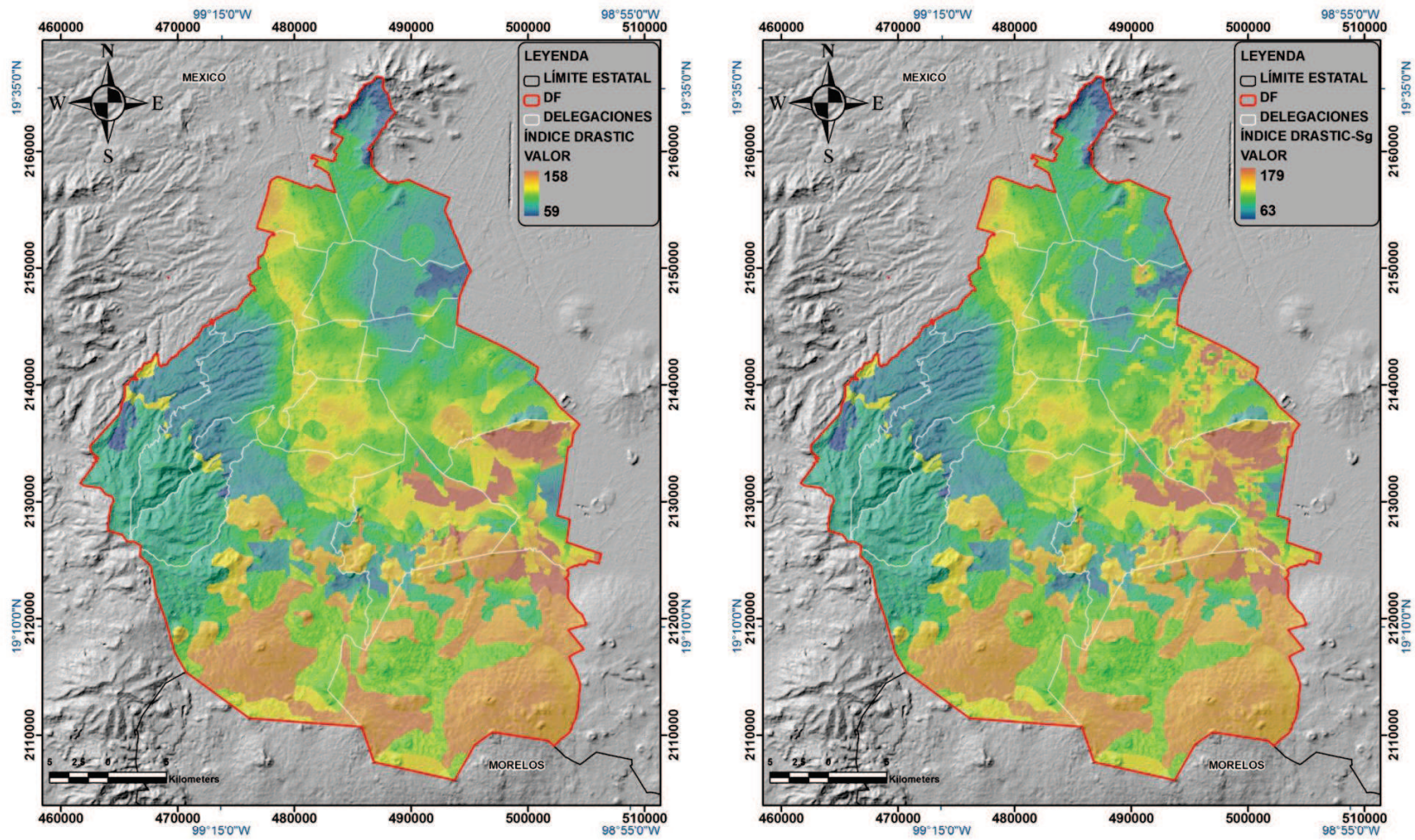


Figura 5.18. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración del índice DRASTIC, el cual se encuentra entre 59 y 158 unidades. (Derecha) Mapa que muestra el índice DRASTIC-Sg, cuyo intervalo es 63 a 179 unidades. En ambos mapas se muestra en azul los valores bajos y en rojo los valores altos del índice.

5.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES DRASTIC y DRASTIC-Sg

La diferencia entre DRASTIC y DRASTIC-Sg no solo radica en el intervalo de valores que abarca cada uno, ya que la diferencia entre los valores máximos es 20 unidades, sino en el patrón derivado del parámetro gradiente de subsidencia Sgr. Al incluir el parámetro Sgr y asignarle un factor de peso de 4 unidades el índice DRASTIC aumenta 4 unidades en las zonas relativamente estables, es decir, aquellas que no experimentan subsidencia; mientras que en las zonas afectadas por hundimientos diferenciales el índice aumenta de 4 a 40 unidades reflejándose en la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg en dicha zona (Figura 5.19).

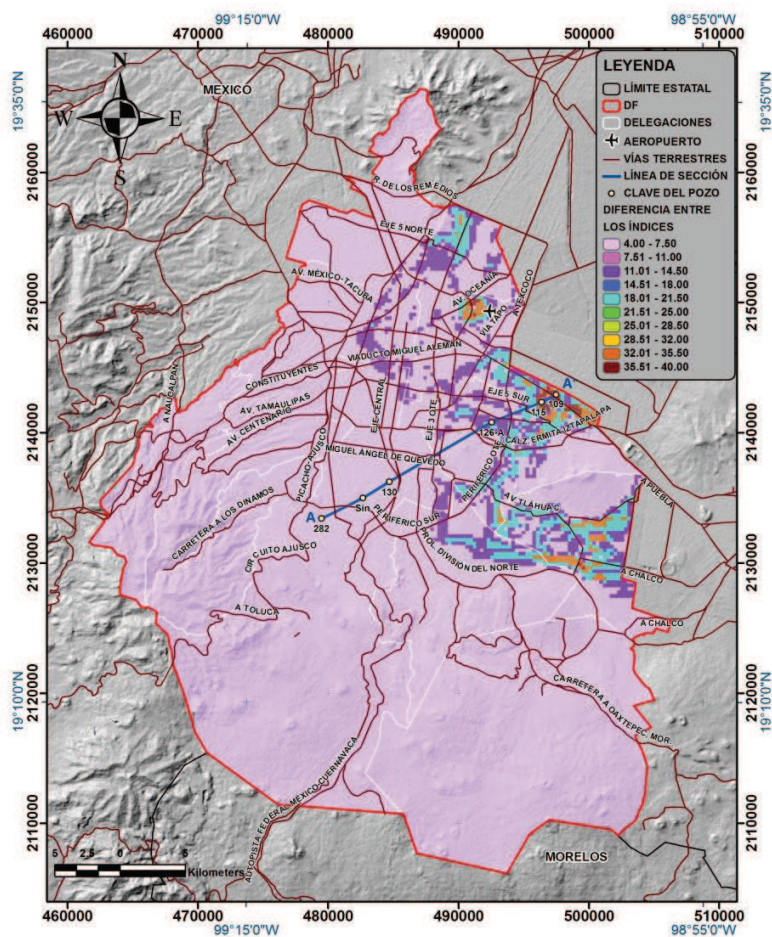


Figura 5.19. Mapa de diferencias entre los índices DRASTIC-Sg y DRASTIC. La línea roja es el límite del Distrito Federal, la línea negra es el límite estatal, la línea blanca es el límite delegacional, las líneas cafés son las vías terrestres, la línea azul oscura es la línea de sección A-A' y los puntos blancos son los pozos auxiliares de la sección A-A'.

En la Figura 5.19 se muestra el mapa de diferencias entre los índices DRASTIC y DRASTIC-Sg donde se observa que la mayor discrepancia se localiza en la delegación Iztapalapa sobre la Calzada Ignacio Zaragoza y en la delegación Venustiano Carranza sobre Av. Oceanía en los alrededores del Aeropuerto Internacional donde los efectos de subsidencia han generado fracturas y fallas en el acuitardo arcilloso. Asimismo, el Gráfico 5.1 representa la sección A-A' que parte de los límites de las delegaciones Tlalpan y Coyoacán en dirección SW-NE hasta los límites de la delegación Iztapalapa (Figura 5.19). En ella se observa que al SW de la sección, la diferencia entre los valores de los índices DRASTIC y DRASTIC-Sg es solamente de 4 unidades y ambos índices conservan un comportamiento paralelo, mientras que al llegar a la delegación Iztapalapa en la zona afectada por los hundimientos diferenciales el patrón de comportamiento cambia aumentando la diferencia entre los índices de manera significativa. Cabe señalar, que de acuerdo a los cortes litológicos (Figura 5.19) consultados (DGCOH, 1994), el espesor del acuitardo arcilloso también aumenta en dirección SW-NE desde aproximadamente 2 m de espesor hasta alrededor de 70 m en la sección mencionada anteriormente.

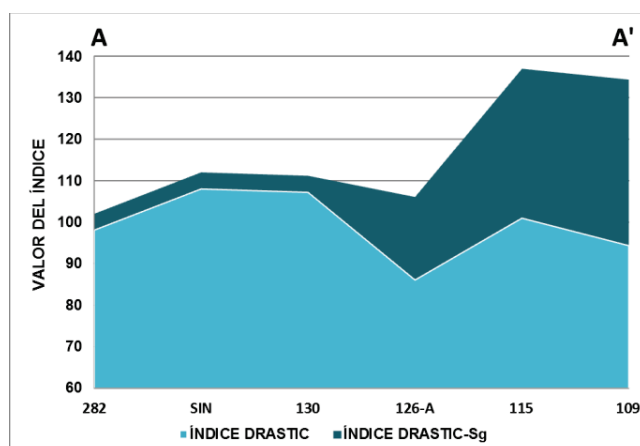


Gráfico 5.1. Comparación de los índices DRASTIC y DRASTIC-Sg en la sección A-A' en dirección SW-NE. El número en el eje horizontal corresponde a la clave original del pozo con corte litológico (DGCOH, 1994) cuya ubicación se muestra en la Figura 5.19.

Resulta lógico asegurar que el material arcilloso es un filtro amortiguador de contaminantes y que el potente espesor del acuitardo garantiza la protección del

acuífero a la contaminación. Sin embargo, el mecanismo de fisuramiento hidráulico (Figura 5.20) nos permite cuestionar esta idea ya que este proceso se presenta cuando el agua acumulada en superficie ingresa en una discontinuidad y logra un incremento en las presiones horizontales en su vértice inferior que logran propagar la grieta (Juárez-Badillo y Figueroa-Vargas, 1984). Este proceso de fisuramiento hidráulico genera un aumento de vulnerabilidad debido al incremento de la permeabilidad secundaria en la zona vadosa somera y genera fuentes potenciales de contaminación al afectar las estructuras civiles como ductos y tuberías (Cabral-Cano *et al.*, 2010b). Asimismo, este tipo de grietas han sido reportadas principalmente en la Calzada Ignacio Zaragoza, donde se muestra el mayor gradiente de subsidencia y cuyo espesor máximo del acuitardo es de 70 m según los cortes litológicos consultados (DGCOH, 1994), e incluso en otras localidades como Tlapala, Chalco (ver Valencia-Guzmán, 2008).

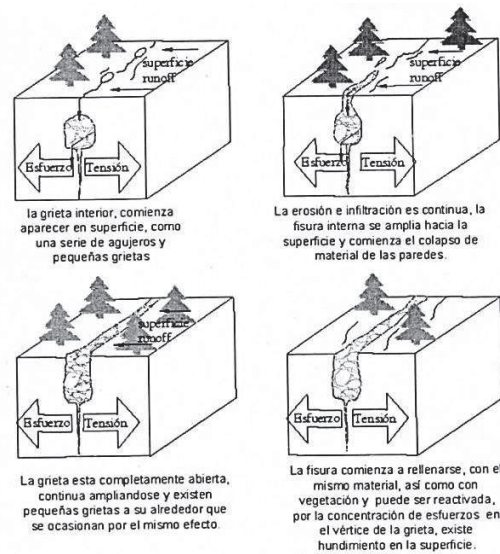


Figura 5.20. Proceso de propagación de fisuras. Modificado de Lee *et al.* (1988).

Lo anterior, permite demostrar que el índice DRASTIC-Sg es completamente representativo de las condiciones actuales del acuífero de la Ciudad de México en la zona del Distrito Federal, pues engloba a los siete parámetros hidrogeológicos más importantes en la evaluación de la vulnerabilidad e incorpora el hundimiento diferencial que aqueja a la infraestructura urbana. Además, el índice DRASTIC-Sg puede determinarse en otros acuíferos granulares que presenten hundimientos

diferenciales que pueden evaluarse por medio de un gradiente de subsidencia (Sgr) como se expresa en la sección 4.3.8. Asimismo, en zonas donde no se presente gradiente de subsidencia es recomendable desarrollar únicamente el índice DRASTIC o bien aplicar otra metodología que permita evaluar la vulnerabilidad del acuífero en cuestión.

5.5 ZONAS DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En la Figura 5.21 (Izquierda) se muestra un mapa con cinco zonas de vulnerabilidad definidas a partir del índice DRASTIC-Sg normalizado en 10 unidades. Se observa que la región de vulnerabilidad Muy Baja (1-2) se distribuye en parte de 13 delegaciones donde cubre el 14.1% del área del DF. Se encuentra en Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero y Cuajimalpa con el 68%, 13.6%, 14.5%, 7.5%, 11.4%, 2.4%, 44.8%, 0.3%, 21.5%, 3.1%, 27%, 34.8% y 45.7%, respectivamente.

La zona de vulnerabilidad Baja (2-4) se encuentra las 16 delegaciones y suma el 50.5% del área de estudio. Particularmente, se distribuye en Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero, Cuajimalpa, Coyoacán y Azcapotzalco con el 27.2%, 69.1%, 79.2%, 92.3%, 38.2%, 47.9%, 23.7%, 53.1%, 33.7%, 77.3%, 67.7%, 63.6%, 64.5%, 51.2%, 71.1% y 73.2% del DF, respectivamente.

El sector de vulnerabilidad Intermedia (4-6) también ocupa las 16 delegaciones y abarca el 31.8% del área del DF. Particularmente, se extiende en las delegaciones Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero, Cuajimalpa, Coyoacán y Azcapotzalco con el 4.8%, 17.3%, 6.3%, 7.7%, 42.9%, 40.7%, 40.2%, 2.1%, 62.9%, 1.1%, 26.2%, 9.4%, 0.7%, 3.1%, 28.9% y 26.8%, respectivamente.

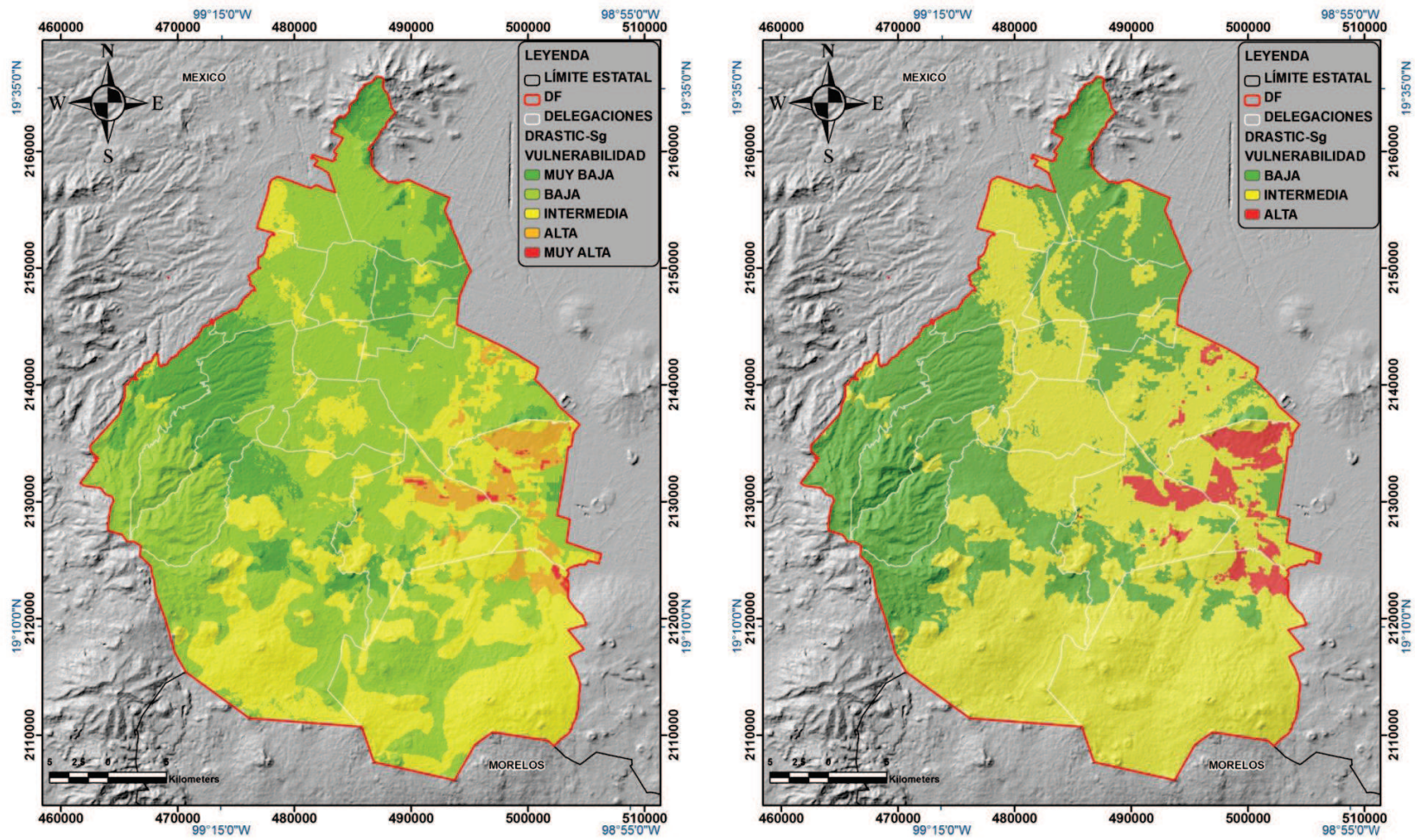


Figura 5.21. (Izquierda) Mapa que muestra la delimitación de cinco zonas de vulnerabilidad para el Distrito Federal a partir del índice DRASTIC-Sg. (Derecha) Mapa que muestra la delimitación de tres zonas de vulnerabilidad para el Distrito Federal a partir del índice DRASTIC-Sg. En ambos mapas, los tonos verdes representan zonas de baja vulnerabilidad y los rojos refieren zonas de alta vulnerabilidad.

La zona de vulnerabilidad Alta (8-10) se encuentra al este del DF, en las delegaciones Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta e Iztapalapa con el 31.4%, 10.3%, 2.7% y 3%, respectivamente; en conjunto esta superficie corresponde al 3.4% del área de estudio.

La superficie de vulnerabilidad Muy Alta (8-10) corresponde a pequeñas partes de las delegaciones Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta, donde ocupa el 2.3%, 1% y 0.4%, respectivamente. Esta zona representa solamente el 0.3% del área del DF.

La Figura 5.22 muestra los gráficos de distribución de las cinco zonas de vulnerabilidad para cada una de las 16 delegaciones del DF.

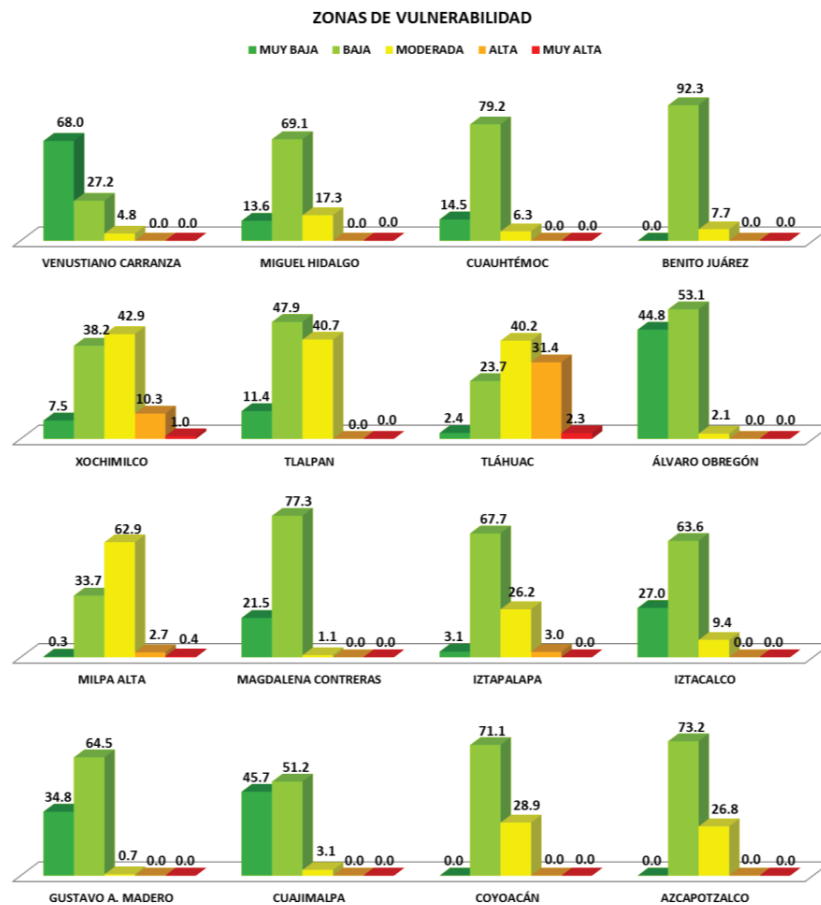


Figura 5.22. Distribución de las cinco clases de vulnerabilidad en las 16 delegaciones del Distrito Federal. En verde oscuro se presenta el porcentaje de vulnerabilidad muy baja, en verde claro el porcentaje de vulnerabilidad baja, en amarillo el porcentaje de vulnerabilidad intermedia, en naranja el porcentaje de vulnerabilidad alta y en rojo el porcentaje de vulnerabilidad muy alta.

Por otro lado, en el mapa de la Figura 5.21 (Derecha) se muestran tres zonas de vulnerabilidad definidas a partir del índice DRASTIC-Sg normalizado en 10 unidades, esta clasificación a manera de semáforo permite que la consulta del mapa de vulnerabilidad del Distrito Federal sea más sencilla. Se observa que la superficie de vulnerabilidad Baja (1-3) se encuentra presente en las 16 delegaciones del DF, con un área del 37.5%. En las delegaciones Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero, Cuajimalpa, Coyoacán y Azcapotzalco ocupa el 87.8%, 37.7%, 58.7%, 23.4%, 33.2%, 9.7%, 84.5%, 6.2%, 93.5%, 24.6%, 66.2%, 84.8%, 92.5%, 5.7% y 23.3%, respectivamente.

La clase de vulnerabilidad Intermedia (3-6) representa el 58.8% del área de estudio y se distribuye en las 16 delegaciones del DF. En Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero, Cuajimalpa, Coyoacán y Azcapotzalco corresponde a una superficie del 12.2%, 62.3%, 41.3%, 89.7%, 65.3%, 66.8%, 56.6%, 15.5%, 90.7%, 6.5%, 72.5%, 33.8%, 15.2%, 7.5%, 94.3% y 76.7%, respectivamente.

Finalmente, la región de vulnerabilidad Alta (6-10), se localiza en las delegaciones Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta e Iztapalapa en las que suma el 3.7% del área del DF. Particularmente, en ellas alcanza un área de 33.7%, 11.4%, 3.1% y 3%, respectivamente.

La Figura 5.23 muestra los gráficos de distribución de las tres zonas de vulnerabilidad para cada una de las 16 delegaciones del Distrito Federal.

En ambas clasificaciones, se observa que las zonas con vulnerabilidades intermedias a altas, localizadas al sur y al este de la ciudad, corresponden a importantes áreas de recarga, donde se identifica que se tienen los tipos de suelos más susceptibles, Litosoles y Regosoles, así como a las litologías con mayor conductividad hidráulica. Por otro lado, se distingue que las delegaciones que

presentan una gran variedad de categorías de vulnerabilidad son Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta e Iztapalapa. En ésta última delegación, la variabilidad de categorías de vulnerabilidad se atribuye principalmente a la distribución de la profundidad del agua subterránea, la conductividad hidráulica y al gradiente de subsidencia.

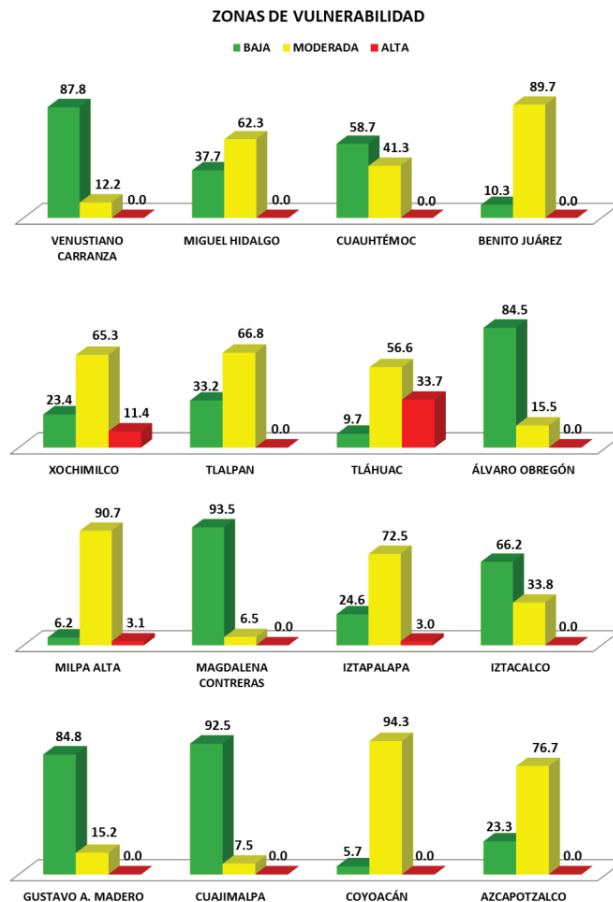


Figura 5.23. Distribución de las tres clases de vulnerabilidad en las 16 delegaciones del Distrito Federal. En verde se presenta el porcentaje de baja vulnerabilidad, en amarillo el porcentaje de vulnerabilidad intermedia y en rojo el porcentaje de alta vulnerabilidad.

Los mapas de zonas de vulnerabilidad descritos anteriormente (Figura 5.21) pueden servir para identificar aquellas áreas donde el acuífero de la Ciudad de México, en el Distrito Federal, es más o menos propenso a contaminarse debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan. Las zonas de baja vulnerabilidad pueden ser óptimas para las actividades que en ellas se realizan e

incluso para el desarrollo de nuevas actividades industriales, sin embargo, esto no quiere decir que se descarten los estudios hidrogeológicos previos. En las zonas de vulnerabilidad intermedia se necesitan estudios hidrogeológicos a detalle que permitan excluir el riesgo a contaminar el acuífero antes de considerar un cambio en el uso de suelo o de la incorporación de una nueva actividad industrial. Por otro lado, las zonas de alta vulnerabilidad deben quedar totalmente restringidas a nuevas actividades por medio del cambio del uso de suelo, pues a través de éste último se pueden optimizar las actividades antropogénicas que se realizan, de manera que no representen fuentes potenciales y activas de contaminación.

5.6 COMPARACIÓN ENTRE DRASTIC-Sg Y OTROS MAPAS DE VULNERABILIDAD

A pesar de las diferentes regiones de estudio consideradas en los mapas de vulnerabilidad publicados anteriormente, (Mazari-Hirart *et al.*, 2006; López-Martínez, 2007; Ramos-Leal *et al.*, 2010) no deberían diferir de manera significativa ya que los datos utilizados en su elaboración son prácticamente los mismos sobretodo si las metodologías utilizadas consideran los mismos parámetros hidrogeológicos.

En el mapa de vulnerabilidad para el Área Metropolitana de la Ciudad de México determinado mediante un método simple de ponderación (Mazari-Hirart *et al.*, 2006), se observa vulnerabilidad moderada a alta en la sierra de Las Cruces, vulnerabilidad moderada en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina, vulnerabilidad baja a muy alta en la sierra de Guadalupe y en la planicie lacustre resulta de vulnerabilidad baja con algunas zonas altas al SW de la sierra de Santa Catarina. Por otro lado, en el mapa de vulnerabilidad determinado con el método SINTACS (Civita y De Maio, 1997) para la cuenca de México (Ramos-Leal *et al.*, 2010), la planicie lacustre posee vulnerabilidades muy bajas a moderadas, en los altos topográficos de las sierras Chichinautzin y Santa Catarina se identifica vulnerabilidad alta a muy alta y en las sierras de Las Cruces y Guadalupe vulnerabilidad moderada a alta. Mientras que el mapa de cinco zonas de vulnerabilidad determinado con el índice DRASTIC-Sg, difiere en la planicie

lacustre con vulnerabilidad muy baja a muy alta, las sierras de Las Cruces y Chichinautzin con vulnerabilidad muy baja a moderada, la sierra de Guadalupe con vulnerabilidad muy baja y la sierra de Santa Catarina con vulnerabilidad baja a muy alta.

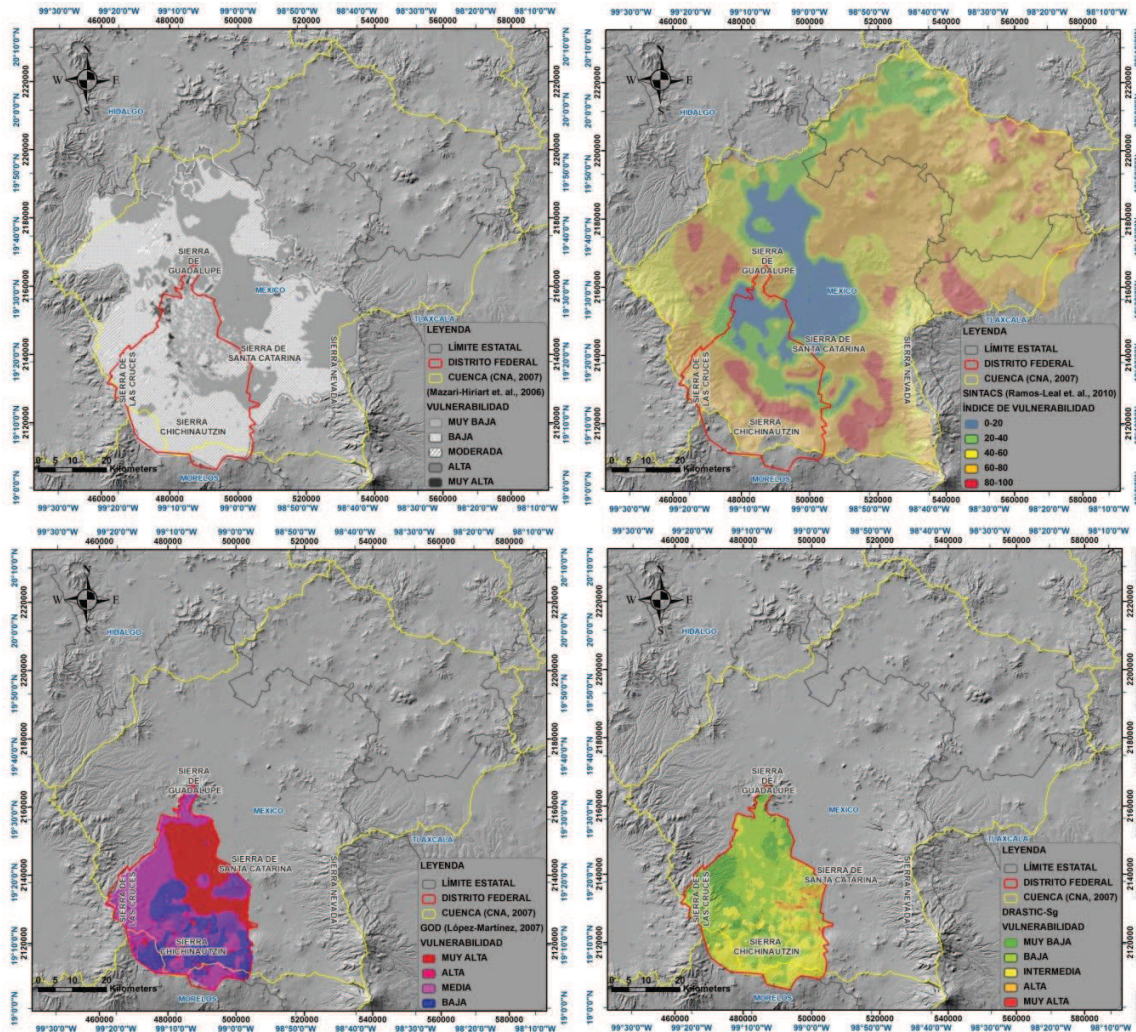


Figura 5.24. (Izquierda y arriba) Mapa de vulnerabilidad para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (Mazari-Hiriart *et al.*, 2006). (Izquierda y abajo) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal (López-Martínez, 2007). (Derecha y arriba) Mapa de vulnerabilidad para la Cuenca de México (Ramos-Leal *et al.*, 2010). (Derecha y abajo) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal determinado con DRASTIC-Sg.

En el mapa de vulnerabilidad realizado a través del método GOD (Foster, 1987) para el Distrito Federal (López-Martínez, 2007), la planicie lacustre se identifica como zona de vulnerabilidad muy alta, las sierras de Guadalupe y Chichinautzin

poseen vulnerabilidad baja a muy alta y las sierras de Las Cruces y Santa Catarina vulnerabilidad baja a moderada. Mientras que el mapa de cinco zonas de vulnerabilidad determinado a través del índice DRASTIC-Sg, identifica zonas de vulnerabilidad muy baja a muy alta en la planicie lacustre e identifica vulnerabilidad muy baja en la sierra de Guadalupe, las sierras de Las Cruces y Chichinautzin con vulnerabilidad muy baja a moderada, y la sierra de Santa Catarina con vulnerabilidad baja a muy alta.

A escala local, el mapa de vulnerabilidad determinado con el método DRASTIC (Aller, 1987) para la delegación Venustiano Carranza (López-Martínez, 2007), se determinó vulnerabilidad baja al suroeste, vulnerabilidad alta al norte, noroeste y suroeste y la vulnerabilidad moderada en la mayor parte de la delegación. Por otro lado, en el mapa de cinco zonas de vulnerabilidad obtenido con el índice DRASTIC-Sg, se establece que la zona de vulnerabilidad muy baja representa el 68% del área delegacional, la vulnerabilidad baja corresponde al 27.2% y la vulnerabilidad moderada se identifica en la zona del Peñón de los Baños con el 4.8%.

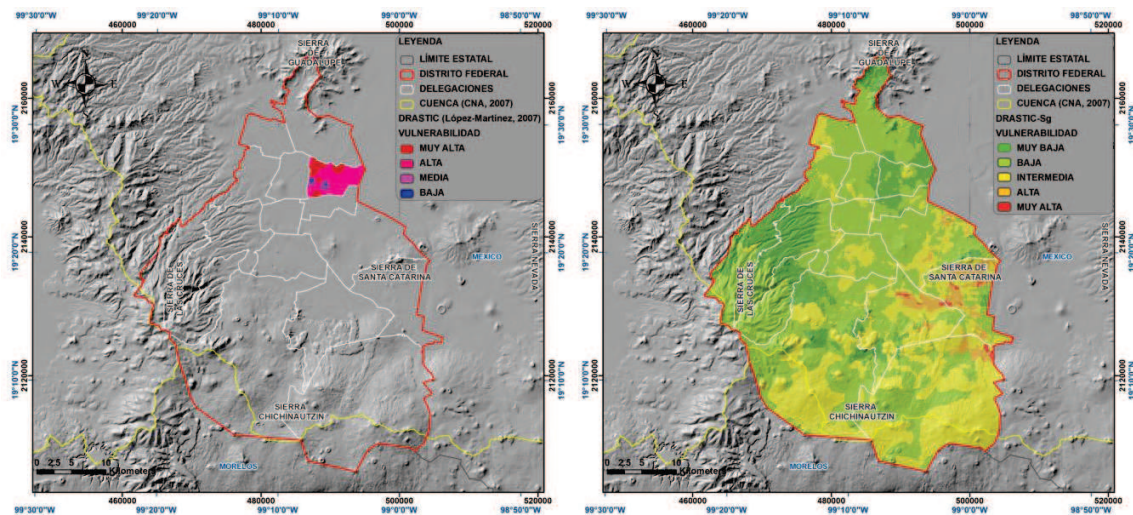


Figura 5.25. (Izquierda) Mapa de vulnerabilidad para la delegación Venustiano Carranza (López-Martínez, 2007). (Derecha) Mapa de vulnerabilidad para el Distrito Federal determinado con DRASTIC-Sg.

Lo anterior, pone en evidencia que las metodologías de vulnerabilidad difieren sus resultados entre sí a pesar de aplicarse en la misma zona de estudio, esto se debe a las diferencias en la escala utilizada, la generalización de los datos y, por otro lado, a la metodología empleada (Gogu y Dassargues 2001; Andreo *et al.*, 2006; Goldscheider *et al.*, 2004). Sin embargo, es evidente que DRASTIC-Sg hace un buen trabajo al reflejar las condiciones actuales del acuífero de la Ciudad de México en el área del Distrito Federal, ya que al incluir al gradiente de subsidencia genera una zonificación de la vulnerabilidad que identifica eficientemente aquellas zonas propensas a desarrollar y/o propagar fisuras y fallas en el terreno, además, resulta congruente con la hidrogeología de la zona de estudio.

5.7 PROCESAMIENTO ADICIONAL

Una manera de visualizar la variación del modelo DRASTIC-Sg y determinar que parámetro tiene mayor relevancia en la metodología es mediante un análisis cualitativo como parte de un procesamiento adicional. En este análisis se cambia la configuración espacial de alguno de los parámetros de vulnerabilidad relativa siempre y cuando dicho cambio resulte coherente y justificable con las características hidrogeológicas de la zona de estudio.

5.7.1 Tipo de suelo

Para obtener el modelo DRASTIC-Sg presentado en la sección 5.3, se consideró que bajo la zona urbana se tiene un sustrato cuya textura es parecida a la de un suelo tipo feozem, sin embargo, este sustrato no es estrictamente un suelo ya que su procedencia no es natural sino se deriva de las actividades antropogénicas. Debido a lo anterior, se volvió a valorar la extensión de la zona urbana considerando la ausencia de suelo y de acuerdo a Aller (1987), le corresponde la valoración numérica de 10 unidades (Figura 5.26).

Con la nueva configuración del tipo de suelo, se volvió a generar el índice DRASTIC-Sg mediante el álgebra de mapas en el SIG. La Figura 5.27 (Derecha) muestra el índice DRASTIC-Sg obtenido en la sección 5.2 y el mapa del índice

DRASTIC-Sg (Izquierda) con la modificación del tipo de suelo, en la que se observa que el índice DRASTIC-Sg se encuentra entre 70 y 180 unidades. Asimismo, se observa que se conserva la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg, es decir, que tanto las zonas de vulnerabilidad baja como las zonas de vulnerabilidad alta se conservan. Lo anterior resulta lógico pues en la sección 5.1.4, el área urbana posee vulnerabilidad relativa de 9 unidades y al cambiarla a 10 unidades va afectar el intervalo del índice DRASTIC-Sg pero no tiene por qué influir en su variación espacial ya que la modificación se realizó en un área uniforme.

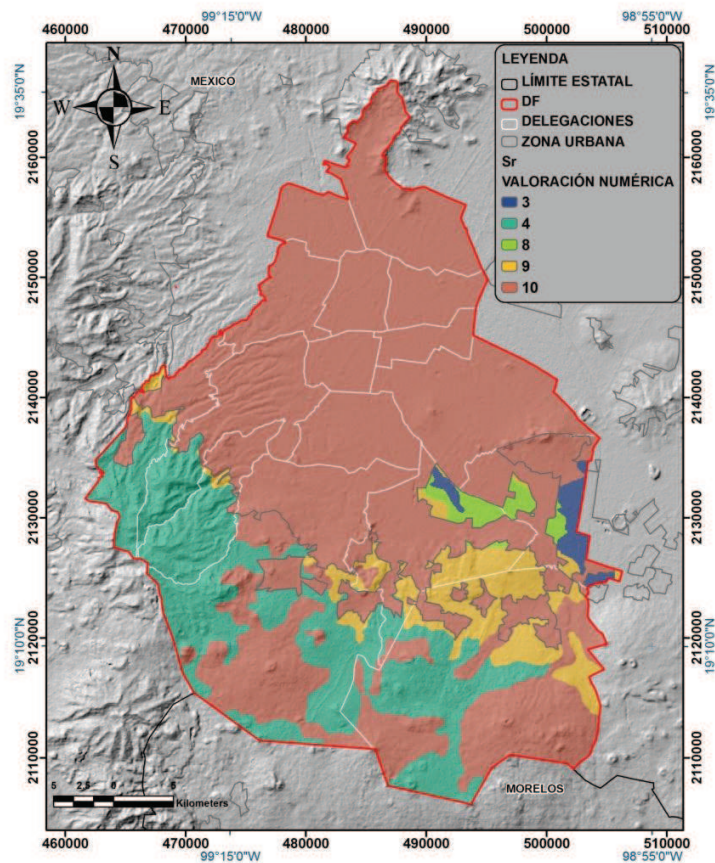


Figura 5.26. Mapa de vulnerabilidad relativa del tipo de suelo Sr modificado por el procesamiento adicional. En tonos azules se muestran las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

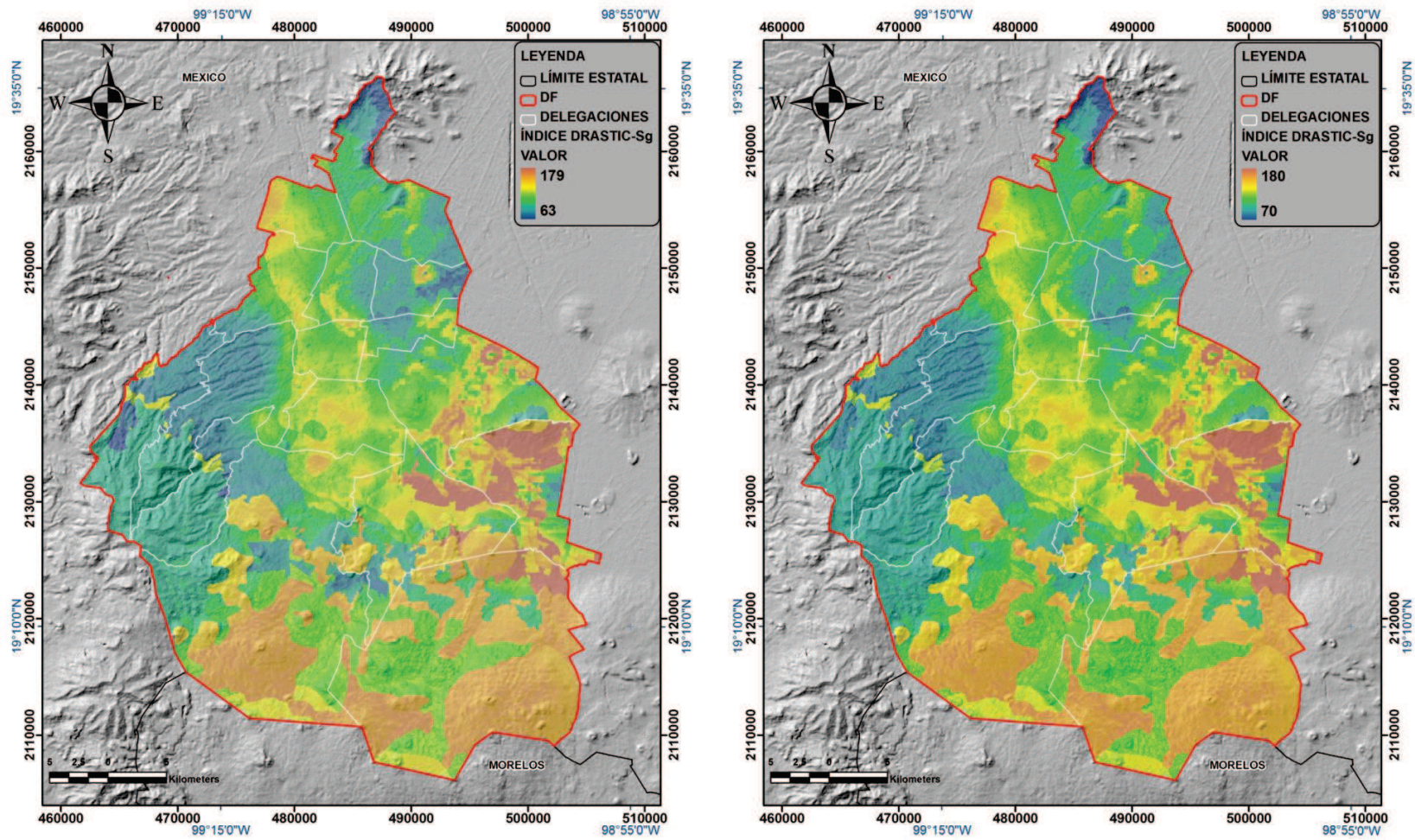


Figura 5.27. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg considerando un suelo tipo feozem bajo la zona urbana (sección 5.3). (Derecha) Mapa que muestra la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg considerando ausente el suelo debajo de la zona urbana. En ambos mapas, los tonos azules representan zonas de baja vulnerabilidad y los rojos refieren zonas de alta vulnerabilidad.

5.7.1 Impacto a la zona vadosa Ir

El modelo DRASTIC-Sg presentado anteriormente (sección 5.3) se obtuvo considerando al acuífero de la Ciudad de México como un acuífero libre. Para efectos del análisis de sensibilidad, se consideró que el acuífero de la Ciudad de México es estrictamente un acuífero semiconfinado, de manera que se cambió el parámetro impacto a la zona vadosa en el área que ocupa el acuitardo superior, entendiéndose que en esta área el acuitardo arcilloso funciona como un filtro protector de contaminantes debido a su mínima conductividad hidráulica y su espesor variable aproximado de 2 m hasta 110 m según los cortes litológicos (DGCOH, 1994) en el DF. Para definir el área de extensión del acuitardo se consideró el límite del Lago en 1519 (Santoyo-Villa *et al.*, 2005) dado que es la zona donde se tienen los mayores espesores del acuitardo según los cortes litológicos (DGCOH, 1994). Asimismo, en esta zona se asignó la valoración numérica para el impacto a la zona vadosa de 1 unidad como lo recomienda Aller (1987) para una capa confinante (Figura 5.28).

Con el cambio anteriormente mencionado, se llevó a cabo el álgebra de mapas para obtener nuevamente el índice DRASTIC-Sg. En la Figura 5.29 se muestra el índice DRASTIC-Sg obtenido en la sección 5.3 (Izquierda) y el índice DRASTIC-Sg con el cambio del impacto a la zona vadosa (Derecha), que se encuentra de 66 a 170 unidades y donde se observa que se conserva la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg, es decir, que tanto las zonas de baja vulnerabilidad como las zonas de alta vulnerabilidad son prácticamente las mismas a pesar del cambio en el parámetro impacto a la zona vadosa. Lo anterior se debe a que el acuitardo arcilloso, modelado como una capa confinante y uniforme, modifica solamente algunos puntos de la configuración del impacto a la zona vadosa de la sección 5.1.6, particularmente en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac, por lo cual no tiene mayor influencia en la variación espacial del índice DRASTIC-Sg.

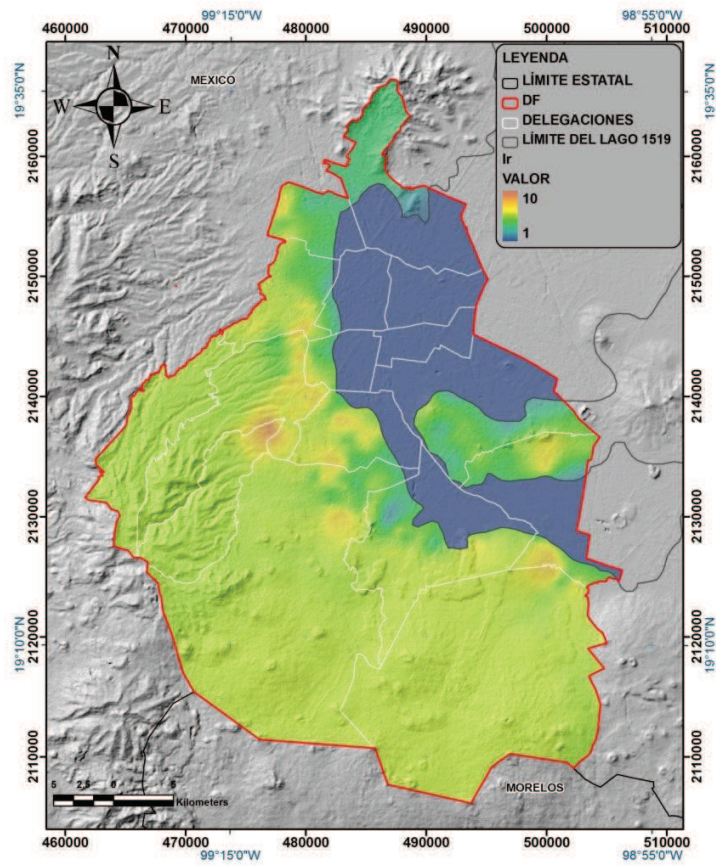


Figura 5.28. Mapa de vulnerabilidad relativa del impacto a la zona vadosa. En tonos azules se muestran las categorías de baja vulnerabilidad y en tonos rojos las categorías de alta vulnerabilidad.

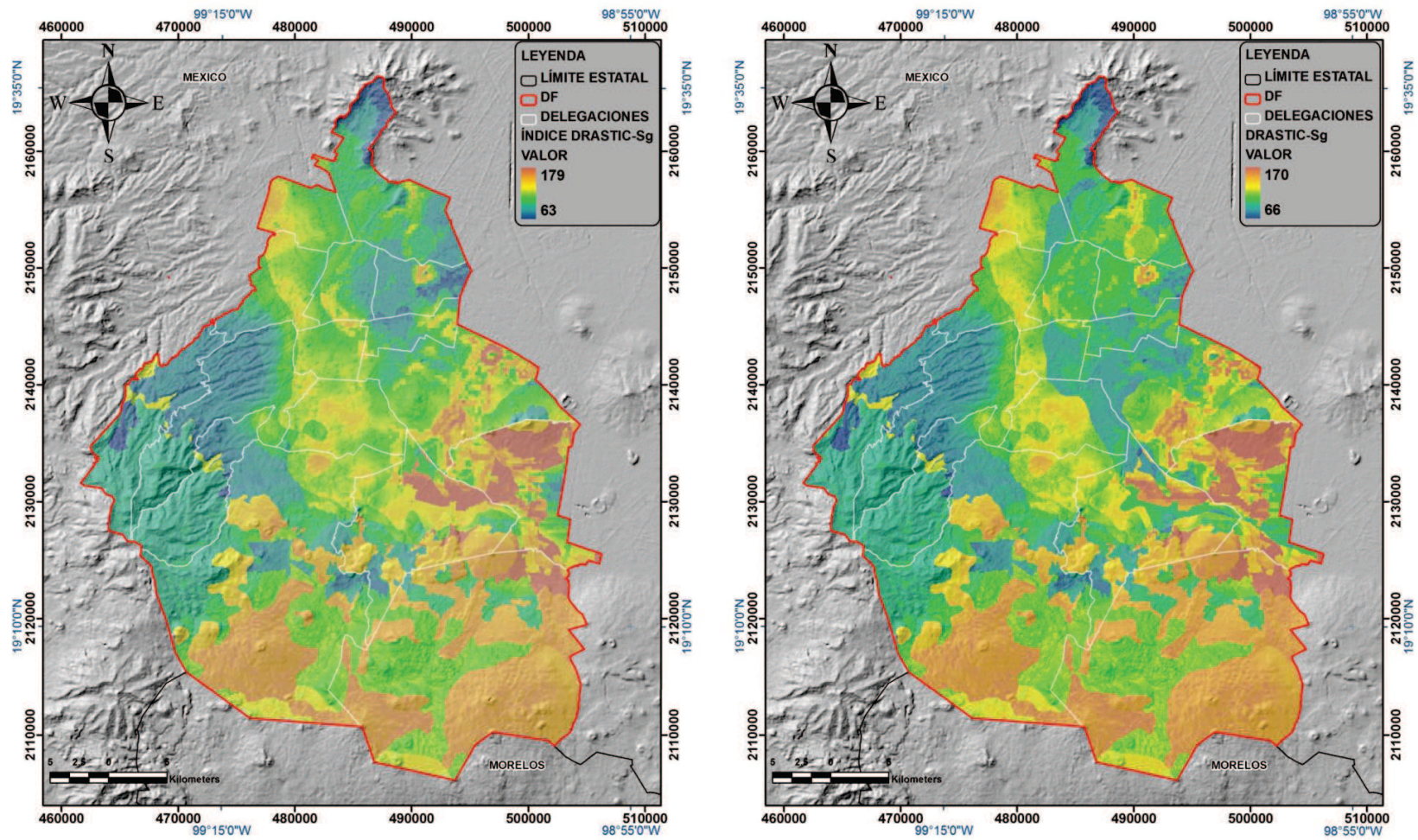


Figura 5.29. (Izquierda) Mapa que muestra la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg considerando un suelo tipo feozem bajo la zona urbana. (Derecha) Mapa que muestra la configuración espacial del índice DRASTIC-Sg considerando ausente el suelo debajo de la zona urbana. En ambos mapas, los tonos azules representan zonas de baja vulnerabilidad y los rojos refieren zonas de alta vulnerabilidad.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 Hidrogeología

El sistema acuífero de la Ciudad de México consiste de cuatro unidades hidroestratigráficas: acuitardo superior en materiales lacustres Cuaternarios, acuífero superior en rocas volcánicas y materiales piroclásticos Cuaternarios y Plio-Cuaternarios, acuífero inferior en materiales piroclásticos y aluviales del Plioceno-Oligoceno y acuífero en rocas carbonatadas Cretácicas.

El acuífero de la Ciudad de México es uno de los más complejos pues reside en diferentes litologías como arcillas, arenas, cenizas volcánicas, conglomerados, tobas, brechas volcánicas, basaltos, piroclastos, escorias y gravas. Sus niveles piezométricos oscilan entre 30 y 180 m de profundidad. Las menores profundidades se encuentran en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y Tláhuac mientras que las mayores profundidades se localizan en las sierras. Los valores de conductividad hidráulica determinados mediante el método de Rushton se encuentran entre 0.20 a 20 m/d. Las mayores conductividades se localizan en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin asociándose al medio fracturado mientras que las menores conductividades se asocian al medio granular localizado en la planicie lacustre.

El acuitardo arcilloso además de haber disminuido su espesor por la consolidación inducida a causa del bombeo excesivo, se ha fracturado y fallado afectando a la infraestructura urbana del Distrito Federal. Lo anterior ha evidenciado que el acuífero de la Ciudad de México, que sirve como principal fuente de abastecimiento a la metrópoli, sea más vulnerable a la contaminación derivada de las actividades antropogénicas que en ella se desarrollan.

6.1.2 Parámetros de vulnerabilidad relativa

Con respecto a la profundidad del agua subterránea D_r , se distinguió que la zona de mayor vulnerabilidad, con categorías de 7 a 9, se encuentra en las delegaciones Tláhuac, Iztapalapa, Xochimilco, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc y Venustiano Carranza. Mientras que la categoría de vulnerabilidad 1 se aprecia en las zonas serranas.

Con el parámetro recarga potencial R_r , se encontró que las sierras Santa Catarina y Chichinautzin poseen la mayor vulnerabilidad con categorías 8 y 9, lo que se debe a la alta conductividad hidráulica del suelo, la topografía relativamente suave y las altas láminas de precipitación, respaldadas en el historial meteorológico de 71 estaciones (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) instaladas en el Distrito Federal (sección 4.3.2, Figura 4.4). Mientras que la zona de menor vulnerabilidad es la que corresponde a la mancha urbana pues se considera que el concreto asfáltico minimiza la infiltración directa por precipitación. En esta última zona, se presenta un volumen considerable de recarga por fugas del sistema de drenaje, pérdidas por conducción de la red de agua potable y drenado vertical del acuitardo arcilloso, que se excluye en la determinación de la recarga potencial por estar fuera del alcance de este estudio.

En relación a la litología del acuífero A_r , se observó que la zona de menor vulnerabilidad se ubica en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Iztapalapa y Tláhuac donde los materiales son principalmente arcillosos y tienen mayor superficie reactiva para atenuar contaminantes. Por otro lado, la categoría de mayor vulnerabilidad se localiza en las delegaciones Tlalpan, Xochimilco, Coyoacán, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Azcapotzalco, donde la litología posee mayor conductividad hidráulica y tiene menor superficie reactiva para la atenuación de contaminantes.

Con respecto al tipo de suelo S_r , se encontró que la zona de menor vulnerabilidad que se asocia a suelos relativamente más arcillosos, se localiza en parte de las delegaciones Venustiano Carranza, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. Mientras

que la zona de mayor vulnerabilidad corresponde a suelos más arenosos que se encuentran en gran parte de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, en las delegaciones Tlalpan, Milpa Alta, Tláhuac e Iztapalapa.

En la determinación del parámetro topografía T_r , se distinguió que las zonas de menor vulnerabilidad son las sierras, con categorías de 1 a 5 y que se relacionan con pendientes del 6% a más de 18% donde los contaminantes adquieren mayor velocidad de escurrimiento. Por otro lado, en la planicie lacustre se diferenciaron las zonas de vulnerabilidad 9 y 10 que corresponden a pendientes menores al 6% donde los contaminantes tienden a acumularse e infiltrarse en el subsuelo.

Con el parámetro impacto a la zona vadosa I_r , se observó que las categorías de menor vulnerabilidad (1-2) se encuentran en las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa y Tláhuac donde la zona vadosa se constituye de material arcilloso que posee conductividad hidráulica mínima y mayor capacidad de atenuación de contaminantes. Mientras que la zona de mayor vulnerabilidad (8-10) se localiza en las delegaciones Magdalena Contreras y Álvaro Obregón, cuya zona vadosa se constituye por intercalaciones de conglomerado, grava, arena y basalto que poseen mayor conductividad hidráulica y con ello menor capacidad de atenuación de contaminantes.

En relación a la conductividad hidráulica C_r , se determinó que la zona menos vulnerable (categoría 1) se localiza en la planicie lacustre y las sierras de Las Cruces y Guadalupe, donde la conductividad hidráulica es menor a 4.07 m/d. Mientras que la parte más vulnerable con categoría 4, se ubica en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina así como al NW de la delegación Azcapotzalco con conductividad hidráulica mayor a 12.22 m/d.

Con respecto al gradiente de subsidencia S_{gr} , se identificó que la zona de menor vulnerabilidad corresponde a las sierras y una parte de la planicie lacustre que suman el 90% del área del Distrito Federal. Dicha zona posee un gradiente de subsidencia menor a $3.5 \cdot 10^{-3}$ m/m. Por otro lado, la zona de mayor vulnerabilidad con categorías 9-10, se encuentra al N de la delegación Venustiano Carranza, al

NE de Iztapalapa y gran parte de Tláhuac donde se presenta un gradiente de subsidencia mayor a $14 \cdot 10^{-3}$ m/m. Asimismo, se identificó un máximo de vulnerabilidad relativa al gradiente de subsidencia en la delegación Iztapalapa que puede relacionarse con la mayor concentración de habitantes (1,815,786) y, por ende, con el mayor consumo de agua con respecto a las delegaciones restantes.

6.1.3 Mapa del índice DRASTIC-Sg

Se determinó el índice DRASTIC-Sg en el acuífero de la Ciudad de México en el área del DF, donde obtuvo un intervalo de 63 a 179 unidades. Asimismo, los valores altos del índice se localizan a lo largo de la Calzada Ignacio Zaragoza, la Calzada Ermita Iztapalapa y Periférico Oriente Canal de Garay, en la delegación Iztapalapa; Av. Tláhuac-Eje 10 Sur Carretera a Santa Catarina y carretera Tláhuac-Chalco, en la delegación Tláhuac; sobre el Canal de Chalco, en el límite de las delegaciones Tláhuac y Xochimilco; Av. Oceanía en los alrededores del Peñón de Los Baños y el Aeropuerto Internacional, en la delegación Venustiano Carranza; en la carretera Oaxtepec-Morelos en la delegación Milpa Alta; la carretera Federal México-Cuernavaca y el Circuito Ajusco, en la delegación Tlalpan.

6.1.4 Zonas de vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México

Se logró establecer tres (baja, intermedia y alta) y cinco zonas de vulnerabilidad (muy baja, baja, intermedia, alta y muy alta) para el acuífero de la Ciudad de México en la zona del Distrito Federal. En ambas clasificaciones, la zona de alta vulnerabilidad se observa en la Calzada Ignacio Zaragoza en las colonias San Lorenzo Xicoténcatl, Ejército de Oriente, José María Morelos y Pavón, Álvaro Obregón y parcialmente en Santa Martha Acatitla, en la delegación Iztapalapa; en el Eje 10 Sur Carretera a Santa Catarina, en las colonias 3 de Mayo, Selene 1ra Sección y Deportiva C. e. t. N° 1, en la delegación Tláhuac; en la carretera Tláhuac-Chalco en las colonias Las Puertas, El Triángulo, Santa Cecilia, La Asunción y 1ra Camino Real, en la delegación Tláhuac; en el Canal de Chalco, en la colonia Tenochtitlan y Los Reyes, en el límite de las delegaciones Tláhuac y

Xochimilco; en la carretera a Oaxtepec-Morelos en la colonia Tepeyeca, en la delegación Xochimilco.

Por otro lado, una de las desventajas de la metodología radica en que la delegación Álvaro Obregón se identifica como zona de baja vulnerabilidad, es decir, que ignora la presencia de cavernas con tendencia a colapsarse, que aumentan la permeabilidad secundaria de la zona no saturada y con ello la conductividad hidráulica, por lo que se recomienda considerarla como zona de alta vulnerabilidad.

Asimismo, las zonas de vulnerabilidad permiten diferenciar aquellas áreas que necesitan estudios sencillos donde tal vez sea suficiente definir la dirección de flujo del agua subterránea (zonas de baja vulnerabilidad), de aquellas que requieren hidrogeológicos a detalle (zonas de vulnerabilidad intermedia) que incluyan el monitoreo de pozos y suelos a diferente profundidad y que permitan descartar la posibilidad de esparcir cualquier sustancia contaminante. Además, también distinguen aquellas áreas (zonas de alta vulnerabilidad) que necesitan protección y acción inmediata para disminuir los factores que evidencian su vulnerabilidad. Por ejemplo, se puede disminuir el caudal de extracción en zonas con alto gradiente de subsidencia e incluso hacer efectivas las iniciativas de recarga artificial para mitigar los efectos; en zonas de recarga potencial se debe dar seguimiento al programa de protección de las áreas naturales protegidas del Distrito Federal o incluso restringir estrictamente el acceso para evitar asentamientos y que el área urbana aumente.

6.1.5 Comparación entre los modelos DRASTIC y DRASTIC-Sg

Se determinaron los índices DRASTIC y DRASTIC-Sg con intervalos de 59 a 158 y 63 a 179 unidades, respectivamente. Se observó que al añadir la variable Sgr, el índice aumentó 4 unidades en las zonas relativamente estables, es decir, aquellas que no experimentan subsidencia; mientras que en las zonas afectadas por hundimientos diferenciales el índice se incrementó hasta 40 unidades; en otras palabras el método DRASTIC subestima vulnerabilidad en áreas afectadas por

subsistencia y esta subestimación se corrige satisfactoriamente con DRASTIC-Sg. Este aumento se reflejó en la puntuación del índice en la Calzada Ignacio Zaragoza, en las delegaciones Iztapalapa e Iztacalco; en la Calzada Ermita Iztapalapa y Eje 5 Sur, en la delegación Iztapalapa; en Av. Oceanía en los alrededores del Peñón de Los Baños y el Aeropuerto Internacional, en la delegación Venustiano Carranza; y en la Av. Ing. Eduardo Molina en la delegación Gustavo A. Madero. Estas zonas poseen un gradiente de subsidencia elevado como consecuencia de la disminución del espesor (y/o consolidación) del acuitado superior debido a la extracción intensiva del agua subterránea. Lo anterior, demuestra que el modelo DRASTIC-Sg es más eficiente que el modelo DRASTIC (Aller, 1987) para evaluar la vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México en la extensión del Distrito Federal.

Asimismo, el modelo DRASTIC-Sg representa una forma práctica de evaluar la vulnerabilidad de acuíferos con subsidencia asociada a depósitos granulares donde se lleven a cabo estudios tipo SAR que permitan delimitar un gradiente de subsidencia. Además, reduce costos derivados del trabajo de campo para la distinción de zonas propensas al desarrollo y/o propagación de fracturas y fallas así como para la determinación de los parámetros hidrogeológicos necesarios.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La metodología DRASTIC-Sg provee una manera de identificar aquellas zonas que requieren estudios hidrogeológicos a mayor detalle previos a la ubicación de cualquier infraestructura urbana así como la re-ubicación y la rehabilitación de pozos de extracción de agua subterránea.

A partir de los resultados de la metodología DRASTIC-Sg pueden desarrollarse mapas de riesgo vinculando las zonas de vulnerabilidad con el concepto de perímetro de protección y la modelación numérica de transporte de solutos. Los perímetros de protección se definen a partir del área de captación de los pozos de abastecimiento, donde se restringen aquellas actividades económicas que puedan

contaminar al acuífero e incluso que afecten al caudal utilizado para el abastecimiento a la población (Moreno Merino *et al.*, 2001).

Para la delimitación de los perímetros de protección se utilizan métodos hidrogeológicos, por ejemplo el método de Wyssling (1979), el método de Jacobs y Bear (Bear, 1979). Sin embargo, estas metodologías manejan una serie de simplificaciones que no reflejan el comportamiento real de los acuíferos, pues se ha visto que son heterogéneos, anisótropos, con espesores variables, de flujo tridimensional y que además varían tanto en espacio como en tiempo. Estas características pueden abordarse a través de los modelos matemáticos o numéricos, ya que simplifican determinados procesos, previamente conceptualizados, por medio de un conjunto de ecuaciones donde las propiedades físicas son expresadas como constantes o coeficientes y las medidas potenciales del sistema como variables (Konikow, 1996). Uno de los programas más utilizados para modelación matemática del flujo de aguas subterráneas es MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) el cual utiliza diferencias finitas en una malla rectangular que divide al sistema en celdas donde se especifican las propiedades del acuífero así como la ubicación de pozos, ríos, etc.

Por otro lado, una vez que se cuenta con el modelo de flujo en MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988), el problema de advección, dispersión y sorción se aborda a través del programa MODPATH (Pollock, 1990) que permite obtener la trayectoria de una partícula, su tiempo de tránsito y con esto, las zonas de captura y perímetros de protección para diferentes tiempos en estados estacionario y transitorio. También se han propuesto modelos analíticos como el denominado WhAEM (USEPA, 2000) el cual permite la delimitación de zonas de protección con radio fijo, en pozos con flujo uniforme, en acuíferos con flujo, propiedades y recarga constantes. Este tipo de modelos analíticos queda limitado porque no consideran la variabilidad de la permeabilidad y el nivel piezométrico, la resistencia al flujo hacia y desde las aguas superficiales y el comportamiento multi-acuífero.

Estudios recientes (Arce *et al.*, 2013) han encontrado diferencias notables en el modelo geológico del subsuelo de la Ciudad de México y cuestionan el funcionamiento del sistema acuífero. Por esta razón, se piensa que la mejor manera de abordar el problema de los hundimientos diferenciales puede realizarse a través del análisis y simulación de la consolidación del sistema acuífero mediante las aproximaciones de la teoría convencional de flujo del agua subterránea (Jacob, 1940, 1950) o la teoría lineal de poroelasticidad (Biot, 1941). La teoría convencional de flujo del agua subterránea considera solo la deformación vertical de la matriz, es decir, no asume la deformación horizontal, mientras que la teoría lineal de poroelasticidad describe la deformación 3D de la matriz (Galloway, 2011).

Desde la década de los 70's se desarrollaron modelos numéricos para simular y predecir la consolidación del sistema acuífero con base en el modelo de drenaje en el acuitardo (Helm, 1972, 1975 y 1976; Witherspoon y Freeze, 1972; Gambolati y Freeze, 1973). El modelo de drenaje en el acuitardo se basa en la idea que cuando se forman los sistemas acuíferos la liberación del agua del almacenamiento en acuitardos provee agua, que los acuíferos la transmiten a los pozos y que el flujo en los acuitardos es principalmente vertical debido a la diferencia de conductividad hidráulica entre acuitardos y acuíferos. Para simular este comportamiento se crearon los modelos COMPAC (Helm, 1984, 1986), Interbed Storage Package IBS versión 1 (Leake y Prudic, 1991), IBS versión 2 (Leake, 1990) y SUB-WT Package (Leake y Galloway, 2007). Los modelos IBS1, IBS2 y SUB-WT se aplican a través de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) en sus versiones 1988, 2000 y 2005, respectivamente.

También se utilizan modelos de poroelasticidad basados en soluciones numéricas de elemento finito abordadas mediante los programas BIOT2D (Hsieh, 1996) y el modelo de desplazamiento granular GMD (Burbey y Helm, 1999). Éste último utiliza una aproximación iterativa en cada intervalo de tiempo para resolver numéricamente el campo de desplazamiento que luego se utiliza para calcular las cargas en MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988).

REFERENCIAS

- Aguilar-Pérez, L. A.; M. A. Ortega-Guerrero; J. Lugo-Hubp; D. C. Ortiz-Zamora (2006). Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 23, número 3, p. 247-261.
- Aguayo-Camargo, J. E.; S. Marín-Cordova; F. Sánchez-Díaz (1989). Evolución geológica de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Tópicos geológicos de la Cuenca del Valle de México. Memoria de simposio*, p. 25-41.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Morán-Zenteno, D., Alba-Aldave, L. (2002a). Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, volumen 118, p. 1-14.
- Allan, J. (1986). Geology of the Colima and Zacoalco grabens, SW Mexico: late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, volumen 97, p. 473-485.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr H., J.; Hackett, G. (1987). DRASTIC: a standatized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Dublin, Ohio. 622 p.
- Al-Zabet, T. (2002). Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*, volumen 43, p. 203-208.
- Anane, M.; B. Abidi; F. Lachaal; A. Limam; S. Jellali (2012). GIS-based DRASTIC, pesticide DRASTIC and the susceptibility index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. *Hydrogeology Journal*, published on line.
- Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo, I.; Vias, J.; Neukum, C.; Sinreich, M.; Jimenez, P.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Perles, M. J. (2006). Karst groundwater protection: first application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (southern Spain). *Science of the Total Environment*, volumen 357, p. 54–73.
- Arce, J.L.; Layer, P.W.; Casique, E. Morales ; Benowitz, J.A.; Rangel, E.; O. Escolero (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.09.004.
- Assaf H. y Saadeh M. (2007). Geostatistical assessment of groundwater nitrate contamination with reflection on DRASTIC vulnerability assessment: the case of the upper Litani Basin, Lebanon. *Water Resource Manage Springer-Verlag*.

Auge, M. (1995). Primer Curso de Posgrado de hidrogeología Ambiental. Buenos Aires. UBA, p. 1-65.

Ávila-Olivera, J.A., Farina, P., Garduño-Monroy, V. H. (2010) Land subsidence monitored by satellite interferometry in Mexican cities. Eighth International Symposium on Land Subsidence. Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development. Poster S4.4. October 2010 Juriquilla, Querétaro, Mexico.

Batelaan, O. y F. De Smedt (2005). GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, volumen 337, p. 337-355.

Bautista, F.; A. J. Zinck; Crame, S. (2009). Los suelos de Latinoamérica: retos y oportunidades de uso y estudio. *Boletín de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica* volumen 2, número 3.

Bear J. y M. Jacob (1965). On the movement of water bodies injected into aquifers: *Journal of Hydrogeology*, volumen 3, p. 37-57.

Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, volumen 12, p. 155–164.

Bloomfield, K. (1975). A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, volumen 64, p. 476-497.

Blue Marble Geographics, (2009). Global Mapper version 10.02. Copyright 2002-2009.

Boughriba, Mimoun; Alae-eddine Barkaoui; Yassine Zarhloule; Zakariae Lahmer; Boubker El Houadi; Massimo Verdoya (2009). Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geosciences*, volumen 3, número 2 , p. 207-220.

Bouwer H.; R.C. Rice (1976). A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, volumen 12, número 3, p. 423–428.

Burbey, T.J. y D. C. Helm (1999). Modeling three-dimensional deformation in response to pumping of unconsolidated aquifers. *Environmental and Engineering Geoscience*, volumen 5, p. 199–212.

Cabral-Cano, E., Díaz Molina, O., Delgado-Granados, H. (2011). Subsistencia y Mapas de Peligro por Fallamiento Superficial: Un Ejemplo en el área Nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (ISSN 1405-3322), volumen 63, número 1, p. 53-60.

Cabral-Cano, E., Dixon, T., Díaz-Molina, O. (2007). InSAR derived horizontal subsidence gradient as a tool for hazard assessment in urban areas. *Eos Trans. AGU*, 88(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract G43B-13.

Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., DeMets, Cigna, C., Díaz-Molina, F. (2010). Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico. *International Association of Hydrological Sciences, Publication Series* (ISBN 978-1-907161-12-4), volumen 339, p. 255-259.

Cabral-Cano, E.; Díaz-Molina, O.; Delgado-Granados, H. (2010b). Subsistencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen 63, número 1, p. 53-60.

Cabral-Cano, E.; T. H. Dixon; F. Miralles-Wilhelm; O. Díaz-Molina; O. Sánchez-Zamora; R. E. Carande (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1556-1566.

Calderhead, A.I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., Garfias J. (2010) Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, volumen 34, p. 83–97.

Carrasco Nuñez, G (1985). Estudio geológico del volcán Popocatepetl. Tesis de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Carreón-Freyre, D. C. (2011) Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Ciudad de México, Distrito Federal. EISOLS, Eighth International Symposium on Land Subsidence. 17-22 octubre, Querétaro, México.

Carruth, R.; L., Pool; Donald R.; Anderson, C. E. (2007). Land Subsidence and Aquifer-System Compaction in the Tucson Active Management Area, South-Central Arizona, 1987–2005. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Chieh-Hung, Chen; Chung-Ho, Wang; Ya-Ju, Hsu; Shui-Beih, Yu; Long-Chen, Kuo (2010). Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. *Engineering Geology*, volumen 115, p. 122–131.

Chih-Tung, Chen; Jyr-Ching, Hu; Chia-Yu Lu; Jian-Cheng Lee; Yu-Chang Chan. (2007) Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. *Engineering Geology*, volumen 95, p. 30–47.

Cigna F., Cabral-Cano E., Osmanoglu B., Dixon T.H., Wdowinski S. (2011). Detecting subsidence-induced faulting in Mexican urban areas by means of Persistent Scatterer Interferometry and subsidence horizontal gradient mapping. In: *IEEE International, Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011*

(ISSN: 2153-6996 ISBN: 978-1-4577-1005-6), Vancouver, Canada. p. 2125-2128. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049585.

Civita M. y De Maio (1997). SINTACS. Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografi a della Vulnerabilit  Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione. Pitagora Editrice Bologna, p. 191.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1953). Boletín de Mecánica de Suelos número 1, México, D.F.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1958). Boletín de Mecánica de Suelos número 2, México, D.F.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1961). Boletín de Mecánica de Suelos número 3, México, D.F.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1965). Boletín de Mecánica de Suelos número 4, México, D.F.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1967). Boletín de Mecánica de Suelos número 5, México, D.F.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1970). Boletín de Mecánica de Suelos número 6, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea ac ifero (0901) zona metropolitana de la Cd. de México. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, 29 de agosto.

Comisión Nacional del Agua-Subdirección General Técnica (2007). Subregiones Hidrológicas, escala 1:250,000. República Mexicana. México, D.F.

Corliss, J. B., and Meade, R. H. (1964) Clay minerals from an area of land subsidence in the Houston-Galveston Bay area, Texas, in Geological Survey Research. U.S. Geological Survey Professional Paper 501-C, p. C79-C81.

Costa, J. E.; Baker, V. R. (1981). Surficial Geology: Building with the Earth. Wiley, New York, N.Y., p. 367-370.

Cressie, N. (1991). Statistics for Spatial Data, John Wiley and Sons, New York, p. 900, ISBN 0-471-84336-9.

Cruickshank, C.; I. Herrera; R. Yates; J. P. Hennart; D. R. Balarezo; R. Maga a (1979). Modelo de predicción del hundimiento del Valle de México. Estudio elaborado para el DDF.

Cusimano G.; M. De Maio; L. Gatto; S. Hauser; a. Pisciotta (2003). Application of SYNTACS Method to the aquifers of Piana di Palermo, Sicily, Italy. Geofísica Internacional, volumen 43, número 4, p. 661-670.

Davis, A. D.; A. J. Long; M. Wireman (2001). KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology* volumen 42, p. 65-72.

De Cserna, Z.; M. De la Fuente-Duch; M. Palacios-Nieto; L. Triay; L. Mitre-Salazar; R. Mota-Palomino (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, número 104.

Del Castillo, R. (1978). El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México. *Simposio SMMS*.

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología, UNAM*, volumen 2, p. 172-187.

Denny, S. C.; D. M. Allen; J. M. Journeay (2006). DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* volumen 15, p. 483-493.

Departamento del Distrito Federal (1984). Actividades geohidrológicas en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica volumen I, II, III. Elaborado por Lesser y Asociados S. A., México, DF.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH (1983). Pruebas de bombeo y mediciones de caudales de extracción en el valle de México. DGCOH, Reporte técnico realizado por Lesser y Asociados S.A., México, DF.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH (1992). Información piezométrica para el periodo comprendido entre 1984 y 1992, información de pruebas de bombeo y registros de gastos de extracción. DGCOH, reporte interno, México, DF.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH (1993). Estudio geohidrológico de la porción suroriental de la Cuenca de México. DGCOH. Reporte técnico realizado por Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería S.A. México, DF.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH (1994). Registros litológicos, diseño constructivo, niveles y gastos de pozos productores. DGCOH, México, DF.

Doerfliger, N.; F. Zwahlen (1997). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. Gunay & Johnson. *International Symposium on Karst Waters and Environment Impacts*. Antalya, Turkey. Balkema, p.117-123. Rotterdam.

Douglass, Mike (2005). Globalization, Mega-projects and the Environment: Urban Form and Water in Jakarta. *International Dialogic Conference on Global Cities*:

Water, Infrastructure and Environment The UCLA Globalization Research Center – Africa May 16-19.

EISOLS (2010). Abstracts of the eighth international symposium on land subsidence. Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development. Eighth International Symposium on Land Subsidence. 17-22 octubre, Querétaro, México.

El-Naqa, Ali; Nezar Hammaouri; Mustafa Kuisi (2006). GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 23, número 3, p. 277-287.

ESRI Inc. Arc Map version 9.3.1 (2008). ArcGIS Desktop 9.3.1. Copyright 1999-2008.

EVREN S. A. (1998). Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la comunidad valenciana por evaluación de recursos naturales. Universitat Politècnica de València y Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme y Transports, Valencia.

Ferretti A, Prati C, Rocca F (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing* volumen 38, número 5, p. 2202–2212.

Ferretti A, Prati C, Rocca F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing* volumen 39, número 1, p. 8–20.

Finch, J. W. (1997). Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model-sensitivity tol and surface parameters. *Journal of Hydrology*, volumen 211, p. 112-125.

Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Committe on Hydrogeology Research. Proceed and information, volumen 38, p. 69-86. The Hague.

Fries, C. Jr. (1960). Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, número 60, p. 236.

Fries, Jr. (1962). Resumen de la geología de la hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14Q-c (11). Esc. 1:100000. Instituto de Geología, UNAM, México, DF.

Frind, E. O.; G. B. Matanga (1985). The dual formulation of flow for contaminant transport modeling. 1 Theory. *Water Resources Research*, volumen 21, número 2, p. 159-169.

Fritch, T. G.; Mcknight, C. L.; Yederman, J. C.; Arnold, J. G. (2000). An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy Aquifer, Central Texas, USA, using GIS and

a modified DRASTIC approach. *Environmental Management*, volumen 25, número 3, 337-345 p.

Galloway D. J. y Hoffmann, J. (2006). The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, volumen 15, p. 133-154.

Galloway D.L. y Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, volumen 19, p.1459-1486.

Gambolati G. y R. A. Freeze (1973). Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 1: theory. *Water Resources Research*, volumen 9, número 3, p. 721–733.

Garrett, P.; Williams, J. S.; Rossoll, C. F.; Tolman, A. L. (1989) Are ground water vulnerability classification systems workable? In: National Ground Water Association Columbus Proceedings of the FOCUS Conference on Eastern Regional Ground-Water Issues, Kitchener, Ontario, Canada, p. 329–343.

Giraldo, R.; D. Ospina; N. Méndez. 2001. Design of a Sampling Network for an Estuary in the Colombian Caribbean. *Rev. Acad. Col. Cienc.*, volumen 25, número 97, p. 509-518.

Gobierno del Distrito Federal (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones: *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, volumen II, 103-BIS, p. 11–39.

Gobierno del Distrito Federal y Colegio de México (2000). *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. Coordinador G. Garza; C. M. Editorial Literal S de RL.

Gogu R.C.; A. Dasargues (2000). Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. *Hydrogeology Journal*, volumen 8, número 3, p. 337–345.

Gogu, R.C. y Dassargues, A. (2001). Intrinsic vulnerability maps of a karstic aquifer as obtained by five different assessment techniques: comparison and comments. 7th Conference on Limestone, Hydrology and Fissured Media, 20–22 September 2001, Besançon, France.

Golden Software Inc., (2011). Surfer version 10.1.561 (32 bit) Mar 1 2011. Surface Mapping System. Copyright 1993-2011.

Goldscheider, N.; Brechenmacher, J.; Hötzl, H.; Neukum, C. (2004). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST Action 620). Report EUR 20912, European Commission, Directorate XII Science, Research and Development, Brussels, p. 297.

Gómez-Tuena, Arturo; Orozco-Esquivel, Ma. Teresa; Ferrari, Luca (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad*

Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, número 3, p. 227-283.

Greyne, R. V.; Jr. Fries; K. Sergerstrom; F. R. Black; F. I. Wilson (1963). Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, CRNR, México, DF.

Gringarten, E. y C. V. Deutsch (2001). Teacher's aide: variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*, volumen 33, número 4, p. 507–534.

Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (2012). Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y de las fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Informe técnico CONACYT-GDF.

Hammourl, N. y A. El-Naqa (2006). GIS based hidrogeological vulnerability mapping of groundwater resources in Jerash Area-Jordan. *Geofísica Internacional*, volumen 47, número 2, p. 85-97.

Hein A. (2004). Processing of SAR data. Fundamentals, Signal Processing, Interferometry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Helm, D. C. (1972) Simulation of aquitard compaction due to changes in stress. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, volumen 53, número 11, p. 979, abstracts.

Helm, D. C. (1975) One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, Calif. 1: constant parameters. *Water Resources Research*, volumen 11, número 3, p. 465–478.

Helm, D. C. (1976) One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, Calif. 2: stress-dependent parameters. *Water Resources Research*, volumen 1, número 3, p. 375–391.

Helm, D. C. (1986). COMPAC: a field-tested model to simulate and predict subsidence due to fluid withdrawal. *Australasian Geomechanics Computing Newsletter*, volumen 10, p. 18–20.

Helm, D.C. (1984). Latrobe Valley subsidence predictions: the modeling of time-dependent ground movement due to groundwater withdrawal. Joint Report of Fuel Department and Design Engineering and Environment Department, State Electricity Commission of Victoria, Melbourne.

Herlinger, R.; A. P. Viero (2006). Groudwater vulnerability assessments in coastal plain of Rio Grande do Sul State, Brazil, using DRASTIC and adsoption capacity of soils. *Environment Geology*, volumen 52, p. 819-829.

Herrera-Revilla, I. y A. Cortés Silva (1989). El sistema acuífero de la Cuenca de México. Ingeniería Hidráulica en México. Nota técnica, Instituto de Geofísica, UNAM.

Herrera-Zamarrón, G; Cardona-Benavides, A.; Escalante-Sandoval, C.; González-Hita, L.; Gutiérrez-Ojeda, C; Hernández-Laloth, N.; López-Hernández, R.I.; Sánchez-Díaz, L.F.; Báez-Durán, J.A.; De la Cruz-Bartolón, J. Estudio para obtener la disponibilidad del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), contrato número 06-CD-03-10-0267-1-05., 2005, p. 300.

Holzer, T. L. (1984). Man induced land subsidence. Geological Society of America, Washington, DC, p. 232.

Hsieh, P.A. (1996). Deformation-induced changes in hydraulic head during groundwater withdrawal. Ground Water, volumen 36, número 6, p. 1082-1089.

Hvorslev, M.J. (1951) Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterways Exp Stat Corps Eng, US Army, Vicksburg, Mississippi, Bull, volumen 36, p. 50.

Ibe, K. M.; G. I. Nwankwor; S. O. Onyekuru (1999). Environmental Monitoring and Assesment. Kluwer Academic Publishers, Netherlands; volumen 67, p. 323-360.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2008). Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III versión II. 1 CD.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua (2008). Banco Nacional de Datos Aguas Superficiales BANDAS.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Principales resultados del censo de población y vivienda 2010. Distrito Federal. INEGI, México, p. 96.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010b). Marco geoestadístico Nacional versión 5.0.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2004). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. Edificio Sede Avolumen Héroe de Nacozari Sur número 2301 Fracc. Jardines del Parque, CP 20270 Aguascalientes, Ags.

Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1995). Edafología. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México. (www.conabio.gob.mx/informacion/gis/)

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Jacob, C. E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer. American Geophysical Union, p. 574–586.

Jacob, C. E. (1950) Flow of ground water. In: Rouse H (ed), Engineering hydraulics: Proceedings of the Fourth Hydraulics Conference, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, IW, 12–15 June 1949.

Juárez-Badillo, E. y Figueroa-Vega, G.E. (1984). Stresses and displacements in an aquifer due to seepage forces (one-dimensional case): Journal of Hydrology, volumen 73, p. 259-288.

Kabera, T. y Zhaohui, L. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater in shallow aquifer in Yuncheng Basin, Shanxi, China. Journal of Applied Sciences, volumen 3, p. 195-205.

Kalinski, R.J.; Kelly, W.E.; Bogardi, I.; Ehrman, R.L.; Yamamoto, P.O. (1994). Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. Ground Water, volumen 32, número 1, p. 31–34.

Kasenow, M. (2001) Applied ground-water hydrology and well hydraulics. 3rd edition. Water Resources Publications, Denver, Colorado, USA, p. 835.

Konikow, L. F. (1996). Numerical models of groundwater flow and transport. In: Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, International Atomic Energy Agency Rept. IAEA-TECDOC-910, Vienna, Austria, p. 59-112.

Krige, D. G. 1951. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, volumen 52, p. 119-139.

Leake, S. A. (1990). Interbed storage changes and compaction in models of regional ground-water flow. Water Resources Research, volumen 26, número 9, p. 1939–1950.

Leake, S.A. y D. L. Galloway (2007). MODFLOW ground-water mode: user guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT) for water-table aquifers. USGS Tech and Methods Rep 6–A23.

Leake, S.A. y D.E. Prudic (1991). Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model. US Geol Surv Tech Water Resour Invest, book 6, chap. A2.

Lee, F.; Lo, K.; Lee, S. (1988). Tension crack development in soils. Journal of Geotechnical Engineering, volumen 114, número 8, p. 915-929.

Lesser y Asociados (1992). Hidrología subterránea en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. DDF. Ingeniería Hidráulica en México, enero-abril.

Lesser y Asociados S. A. (1997). Balance de agua subterránea del acuífero de la Ciudad de México.

Lesser y Asociados S. A. (2000). Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del Valle de México y actualización de balance hidrogeológico. Sinopsis de la piezometría del Valle de México año 2000. Departamento del Distrito Federal, Contrato número 0-07-CO-04-1-0328, 51 p.

Lesser y Asociados S. A.; Dirección General De Construcción y Operación Hidráulica-DDF (1998). El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. Ingeniería Hidráulica en México, volumen XIII, número 3, p. 13-18.

Leyva Suárez, E. (2010). Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al Acuífero de la zona Metropolitana de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Instituto de Geología, UNAM.

López-Martínez, F. (2007). Metodología de evaluación de riesgos y vulnerabilidad de suelos por actividades no industriales en el Distrito Federal. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatengo, Sección de Posgrado e Investigación, Tesis de Maestría.

López-Quiroz, P.; Doin, M. P.; Tupin, F.; Briole, P.; Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. Journal of Applied Geophysics, volumen 69, p. 1-15.

López-Ramos, E. (1979). Geología de México. Tomo II, 2da edición.

Marfai, Muh Aris; King, Lorenz. (2007) Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. Environment Geology, volumen 53, p. 651-659.

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 HYD.

Marsal, Raul J., and Mazari, Marcos. (1959) El Subsuelo de la Ciudad de México. Primer Panamericano, Congreso de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 614 p. (2d ed., is bilingual in Spanish and English.)

Marsden, S.; S. N., Davis (1967). Geological subsidence. Scientific American, volumen 216, p. 93-100.

Martin Del Pozo, A. L. (1982). Monogenetic vulcanism in sierra Chichinautzin, Mexico. Bulletin of Volcanology, volumen 45, número 1, p. 9-24.

Mazari-Hiriart, M.; G. Cruz-Bello; L.A. Bojórquez-Tapia; L. Juárez-Marusich; G. Alcantar-López; L. E. Marín; E. Soto-Galera (2006). Groundwater vulnerability assessment for organic compounds: fuzzy multicriteria approach for Mexico city. Environmental Management volumen 37, número 3, p. 410-421.

McDonald M. C. y A. W. Harbaugh (1998). A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. Unites States Geological Survey Techniques of water resources investigation, book 6, chapter A.1, p. 586.

McGrath, D.; C. Zhang; O. T. Carton (2002). Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland. *Environmental Pollution*, volumen 127, p. 239-248.

McLaren, R. G. (1988). A 2-D steady-state flow in cross section. Waterloo Centre of Groundwater Research. University of Waterloo.

McLay, C.D.A; Dragden, R.; Sparling, G.; Selvarajah, N. (2001). Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollution*, volumen 115, p. 191–204.

Meade, R. H. (1967) Petrology of sediments underlying areas of land subsidence in central California. U.S. Geological Survey Proffesional Paper 497-C, p. 83.

Melloul, A. J. y Collin, M. (1997). A proposed index of aquifer water-quality assessment: the case of Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, volumen 54, p. 131-142.

Merchant J., (1994). GIS-Based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* , volumen 60, número 9, p. 1117–1127.

Mooser, F. (1992). Nuevo Mapa Geológico del Sur-Poniente del Valle de México. *Simposium Experiencias Geotécnicas en la Zona Poniente del Valle de México*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, p. 5-15.

Mooser, F.; M. E. A. Nairn; F. W. J. Negendank (1974). Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneus rocks: VIII a paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the valley of Mexico. *Geologische Rundschau*, volumen 63, p. 451-483.

Mooser, R.; Montiel, A.; Zúñiga, A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. *Estratigrafía tectónica regional y aspectos geotérmicos [New geological map for the Basins of Mexico, Toluca and Puebla]*. Comisión Federal de Electricidad, Mexico City.

Moreira, A.; Prats-Iraola, P.; Younis, M.; Krieger, G.; Hajnsek, I.; Papathanassiou P, K. (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*.

Moreno Merino, L.; C. Martínez Navarrete; J. A. López Geta; P. Navarrete Martínez (1991). *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. IGME, Madrid, p. 289.

Murat, volumen; A. Rivera; J. Pouliot; M. Miranda-Salas; M. M. Savard (2003). Aquifer vulnerability mapping and GIS: A proposal to monitor uncertainty associated with spacial data processing. *Geofísica Internacional*, volumen 43, número 4, p. 551-565.

National Aeronautics and Space Administration (2011). Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2). Land Processes Distributed Active Archive Center. <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>

Ortega-Guerrero, A. (1989). Las condiciones de frontera hidráulicas naturales en la Cuenca de México, usando modelado matemático. *Geofísica Internacional*, volumen 28, número 2, p. 283-295.

Ortega-Guerrero, A. y R. N. Farvolden (1989). Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, volumen 110, p. 271-294.

Osmanoglu, B.; T. H. Dixon; S. Wdowinski; E. Cabral-Cano; Y. Jianga (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, volumen 13, p. 1–12.

Panagopoulos, G. P.; A. K. Antonakos; N. J. Lambrakis (2005). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hidrogeology Journal*, volumen 14, p. 894-911.

Pasquaré, G.; Garduño, volumen; Tibaldi, A.; Ferrari, M. (1988). Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, volumen 146, p. 353-364.

Pérez-Cruz, G. (1988). Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México. Tesis de M.I. Inédita. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, DF.

Poland, J. F. (1968) Compressibility and clay minerals of sediments in subsiding ground-water basins, southwestern United States. *Geological Society of America 81st Ann. Mtg. Prog.*, Mexico City, Geological Society of America Special Paper 121, p. 241.

Poland, J. F. (1984). Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: Paris, France, UNESCO Studies and Reports in Hydrology, p. 305.

Pollock, D. W. (1994). User's guide for Modpath, Modpath-plot, V-3.0. A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the USGS finite difference groundwater flow model. USGS open file report 94-464, p. 234.

Raj-Pathak, Dhundi; Akira Hiratsuka; Isao Awata; Lounan Chen (2007). Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu Valley using GIS-based DRASTIC model. *Environmental Geology*, Springer-Verlag.

Ramos-Leal, J. A. (2005). Curso de vulnerabilidad acuífera e índices de calidad del agua. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.; División de Geociencias Aplicadas. San Luis Potosí, México.

Ramos-Leal, J. A.; C. Noyola Medrano; F. O. Tapia Silva (2010). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. *Environmental Earth Sciences*, volumen 61, p. 1309–1320.

Rathod, K.S., Rushton, K.R. (1991). Interpretation of pumping from two-zone layered aquifers using a numerical model. *Groundwater*, volumen 29, número 4, Julio-Agosto.

Reséndiz, D.; G. Springall; J. M. Rodríguez; R. Esquivel. (1970). Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la Ingeniería de Cimentaciones en la Ciudad de México. *Memorias de la V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Sociedad Mexicana de Suelos, México.

Robin, C. y C. Boudal (1987). A gigantic Bezymianny-Type event at the beginning of modern volcano Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, volumen 31, p. 115-130.

Rodríguez, R.; Armienta, A.; Morales, P.; Silva, T. y Hernández, H. (2006). Evaluación de Vulnerabilidad Acuífera del valle de Irapuato Gto. JAPAMI, CONCyTEG, IGF UNAM. Reporte Técnico il. p. 90.

Rosen, L. (1994). A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Ground Water*, volumen 32, p. 278–285.

Rushton, K.R. y Rathod, K.S. (1988). Causes of non-linear step pumping test responses. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, volumen 21, p.147–158.

Rushton, K.R., Redshaw, S.C. (1979). *Seepage and groundwater flow*. Wiley, Chichester, p. 332.

Sánchez-Díaz, L. F. y Gutiérrez-Ojeda, O. C. (1997). Overexploitation effects of the groundwater system of Mexico City. UK, Balkema, *Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment*, p. 353-357.

Santoyo-Villa E.; Ovando, E.; Mooser, F.; León-Plata, E. (2005). Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México. TGC Ingeniería.

Sarychikhina, Olga; Glowacka, Ewa ; Suárez Vidal, Francisco; Mellors, Robert; Ramírez Hernández, Jorge (2010). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen 63, número 1, p. 1-13.

Schlaepfer, J. C. (1968). Resumen de la geología de la Hoja México, Distrito Federal y estados de México y Morelos. Hoja México 14Q-h (5). Esc. 1:100000. Instituto de Geología, UNAM, México, DF.

Sergestrom, K. (1961). Geología del SW del estado de Hidalgo y del NE del Estado de México. Bol Asoc. Mex. Geol. Petrol, volumen XIII, números 3 y 4.

Shirazi, S. M.; H.M. Imran; S. Akib (2012). GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review. Journal of Risk Research, volumen 15, número 8.

Smith, W. H. F.; P. Wessel (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. Geophysics, volumen 55, número 3, pp 293-205.

Soegel, U. (2010). Radar Remote Sensing for urban areas. Springer, p. 294.

Solano Rojas, D.; Cabral Cano, E.; Hernández Espriú, A.; Cigna, F.; Wdowinski, S. Osmanoglu, B.; Falorni, G.; Bohane, A.; Colombo, D. (2012). Mapas de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia en las ciudades de México y Morelia, SE25-9. Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal., 28 Noviembre-2 Diciembre 2012. Resúmenes p. 292.

Soto-Galera, E.; M. Mazari-Hiriart; L. A. Bojorquez-Tapia (2000). Entidades de la zona metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. Investigaciones Geográficas (Mx), diciembre, número 43, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México, p. 60-75.

Srinivasamoorthy, K.; K. Vijayaraghavan; M. Vasanthavigar; volumen S. Sarma; R. Rajivgandhi; S. Chidambaram; P. Anandhan; R. Manivannan (2009). Assessment groundwater vulnerability in Mettur región, Tamilnadu, India using drastic and GIS techniques. Arabian Journal of Geosciences, volumen 4, números 7-8, p. 1215-1218.

Steele, K. W. (1971). Paleomagnetic directions from the Iztaccíhuatl volcano. Earth and Planetary Science Letters , volumen 11, p. 211-218. North Holland Publishing Co.

Támez, E.; E. Santoyo; F. Mooser; C. Gutiérrez (1987). Manual de diseño geotécnico, volumen 1, Metro en Cajón. México: Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, Departamento del Distrito Federal.

Terzaghi, K. 1925. Principles of soil mechanics: IV, Settlement and consolidation of clay. Engineering News-Record, p. 874-878.

Thornthwaite, C. W. y Mather, J.R. (1955). The water balance. Publications in Climatology, volumen 8, número 1, p. 1-104.

Thornthwaite, C. W. y Mather, J.R. (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publications in Climatology, volumen 10, número 3, p. 185-311.

Tomás, R. (2009). Estudio de la subsidencia de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial (DInSAR) avanzada. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

Tomás, R.; G. Herrera; J. M. López-Sánchez; J. J. Mallorquí y J. Mulas. (2010) Monitorización de la subsidencia del terreno de la Vega Media del río Segura mediante Interferometría SAR Diferencial Avanzada. Ingeniería Civil, p. 158.

Tomás, R.; Lopez-Sanchez, J.M.; Delgado, J. (2005). Técnicas de ingeniería cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y movimientos de ladera: principales características y análisis comparativo. CD Proceedings. XVII Ingeggraf-XV ADM internacional Congreso. Sevilla, Spain.

Tripet, J. P.; N. Doerflinger; F. Zwahlen (1997). Vulnerability mapping in karst áreas and its uses in Switzerland. Hidrogeologie, volumen 3, p. 15-57.

Uddameri, V. y Honnugar, V. (2005). Combining rough sets and GIS techniques to asses aquifer vulnerability characteristics in the semi-arid South Texas. Environment Geology, volumen 51, p. 931-939.

United States Environmental Protection Agency (2000). Working with WhAEM 2000. Source Water Assesment for a Glacial Outwash Wellfield, Vincennes, Indiana. Technical report EPA-600/R-00/022. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D. C.

Valencia Guzmán, N. I. (2008). Análisis de formación y propagación de grietas en suelos debidas a la extracción del agua subterránea: el caso de Chalco, Estado de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Van Stempvoort, D.; L. Ewert; L. Wassenaar (1995). AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report No. 114, National Hydrology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada.

Vargas, C.y Ortega-Guerrero, A. (2004). Fracture hydraulic conductivity in the Mexico city clayey aquitard: Field piezometer rising-head test. Hydrogeology Journal, volumen 12, p. 336-344.

Vázquez Sánchez, E. y Jaimes Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. Revista de la Unión Geofísica Mexicana, Instituto de Geofísica, UNAM, volumen 28, número 2, p. 133-190.

Vázquez-Sánchez, E. (1995). Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de maestría, Posgrado en Geofísica, UNAM.

Vías, J. M.; B. Andreo; M. J. Perles; F. Carrasco (2004). A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. Environment Geology, volumen 47, p. 586-595.

Vrba J.; Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists. International contributions to hydrogeology , volumen 16, Heise, Hannover.

Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. Proc 2003 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium, volumen 7, p. 4362–4364.

Witherspoon, P.A. y Freeze, R. A. (1972). The role of aquitards in a multiple-aquifer system. *Geotimes*, volumen 17, número 4, p. 22–24.

Worrall, F.; Kolpin, D. W. (2003). Aquifer vulnerability to pesticide pollution-combing soil, land-use and aquifer properties with molecular descriptors. *Journal of Hydrology*, volumen 293, p. 191-204.

Wyssling, L. (1979). Eine neue formel zur Berechnung der Zuflussdauer des Grundwassers zu einem Grundwasser pumpwerk. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, volumen 72, p. 401-406. Basel.

Xiao-Qing Shi, Yu-Qun Xue, Shu-Jun Ye, Ji-Chun Wu, Yun Zhang, Jun Yu (2007). Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environment Geology*, volumen 52, p. 27–40.

Yuill, B.; Lavoie, D.; Reed, D.J. (2009). Understanding subsidence processes in coastal Louisiana. *Journal of Coastal Research*, Special Issue number 54, p. 23–36. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Zawadsky, A. (1996). Investigations regarding the origin and hydrologic activity of a large sediment-filled fissure in fractured lacustrine clay near Mexico City. MSc Thesis, University of Waterloo, Dept. of Earth Sciences. Ontario, Canada.

Zektser S., Igor; Sergey P. Pozdniakov; Michael Szpakiewicz; Liliya M. Rogachevskaya (2003). Regional assessment of groundwater vulnerability in the Snake river plain aquifer basin, USA. *Geofísica Internacional*, volumen 43, número 4, p. 697-705.

Zektser, S., Loáiciga, H. A., Wolf, J. T. (2004) Environmental impacts of groundwater overdraft: selected case studies in the southwestern United States. *Environmental Geology*, volumen 47, p. 396–404.

Zhang, C.S. y O. Selinus (1998). Statistics and GIS in environmental geochemistry—some problems and solutions. *Journal of Geochemical Exploration*, volumen 64, p. 339–354.

Zhang, C.S.; S. Zhang; L. C. Zhang; Wang, L.J. (1995). Background contents of heavy metals in sediments of the Changjiang River system and their calculation methods. *Journal of Environmental Sciences*, volumen 7, número 4, p. 422–429.