



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1D (Profundidad al nivel estático)

5.2 R (Recarga)

5.3 A (Medio acuífero)

5.4 S (Suelos)

5.5 T (Topografía)

5.6 I (Impacto a la Zona Vadosa)

5.7 C (Conductividad hidráulica)

5.8 Índice DRASTIC

5.9 Índice normalizado y zonas de vulnerabilidad

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 D (Profundidad al nivel estático)

Como se observa en la Figura 5.1 la profundidad del nivel estático se encuentra en el rango de vulnerabilidad de 1 a 8. La zona más vulnerable del área de la Ciudad de México es la que se encuentra en el norte en la planicie dentro de las delegaciones de Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y Cuauhtémoc, donde el nivel potenciométrico se encuentra a menos de 50 m de profundidad correlacionable con un índice de vulnerabilidad alto (7-8). En la zona oriental de la ciudad, en la delegación Tláhuac encontramos otra zona de alta vulnerabilidad causada por niveles piezométricos menores a los 40 m.

Las áreas con menor índice de vulnerabilidad (1-2) a la contaminación se encuentran en los altos topográficos al sur y oeste de la ciudad en las sierras de Chichinautzin y Las Cruces, esto es por la gran profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico, más de 150 metros. En el análisis de este parámetro se observa una clara correlación entre la disminución de la vulnerabilidad conforme aumenta la pendiente topográfica y la profundidad del nivel potenciométrico.

El área que ocupan cada uno de los distintitos índices de vulnerabilidad en el Distrito Federal se muestran en la Gráfica 5.1, aquí se observa que predomina la vulnerabilidad muy baja (1-2) con un área de 58.5%, seguida de la vulnerabilidad media (5-6) que ocupa el 24.1% del área. La vulnerabilidad baja (3-4) y alta (7-8) ocupan una extensión menor de 11.3% y 6.2% del total respectivamente.

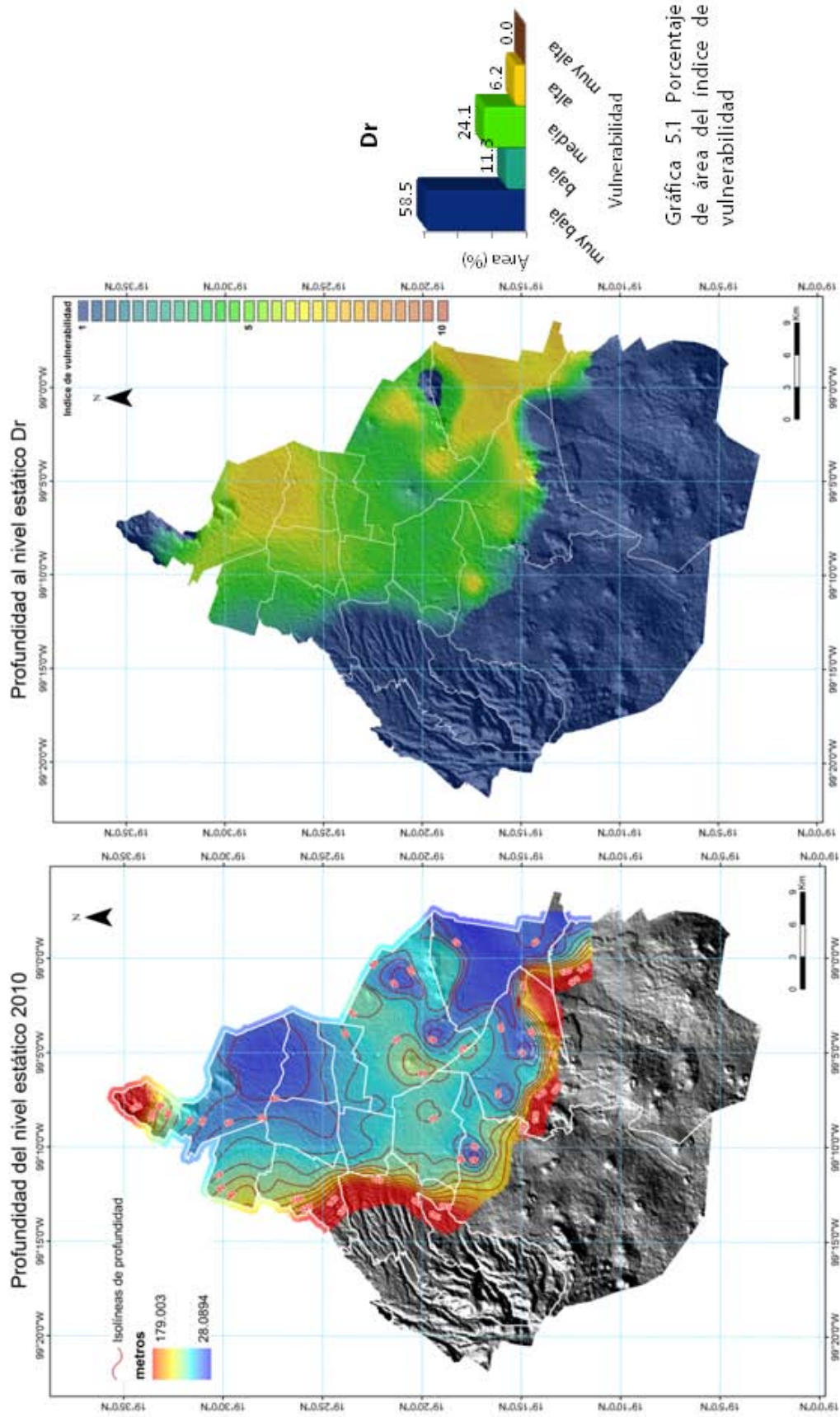


Figura 5.1 Profundidad del nivel estático para el 2010 y vulnerabilidad de la profundidad al nivel estático.

5.2 R (Recarga)

En general, la recarga en la Ciudad de México varía entre los 100 mm/año y los 460 mm/año. A la menor recarga corresponde un índice de vulnerabilidad muy bajo (1-2), que representa un 82.5% del área total. Se localiza en las zonas planas de la ciudad donde predominan las arcillas con baja permeabilidad, lo que ocasiona que no exista flujo descendente hacia el acuífero (Figura 5.2).

A diferencia de la vulnerabilidad relativa del nivel piezométrico, la recarga presenta altos valores de vulnerabilidad en los altos topográficos donde existen litologías permeables, como los basaltos de la Sierra del Chichinautzin que son las principales áreas de recarga del acuífero de la ciudad con láminas de recarga superiores a los 350 mm/año. A diferencia de la sierra de Chichinautzin, la sierra de Las Cruces presenta valores de vulnerabilidad muy bajos (1-2) y bajos (3-4) ya que la recarga no supera los 150 mm/año y la litología presente en la zona no permite una gran infiltración, esto se ve reflejado en la densidad de cañadas que existen en el área.

El índice de vulnerabilidad llega hasta niveles altos (7-8) y muy altos (9-10) en las delegaciones de Milpa Alta, Tlalpan, Coyoacán, Álvaro Obregón y algunas zonas de Xochimilco, Iztapalapa y Tláhuac donde existen tasas de infiltración altas. En general, la recarga del acuífero de la Ciudad de México se estimó en $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponden a un coeficiente de infiltración de 5.8%.

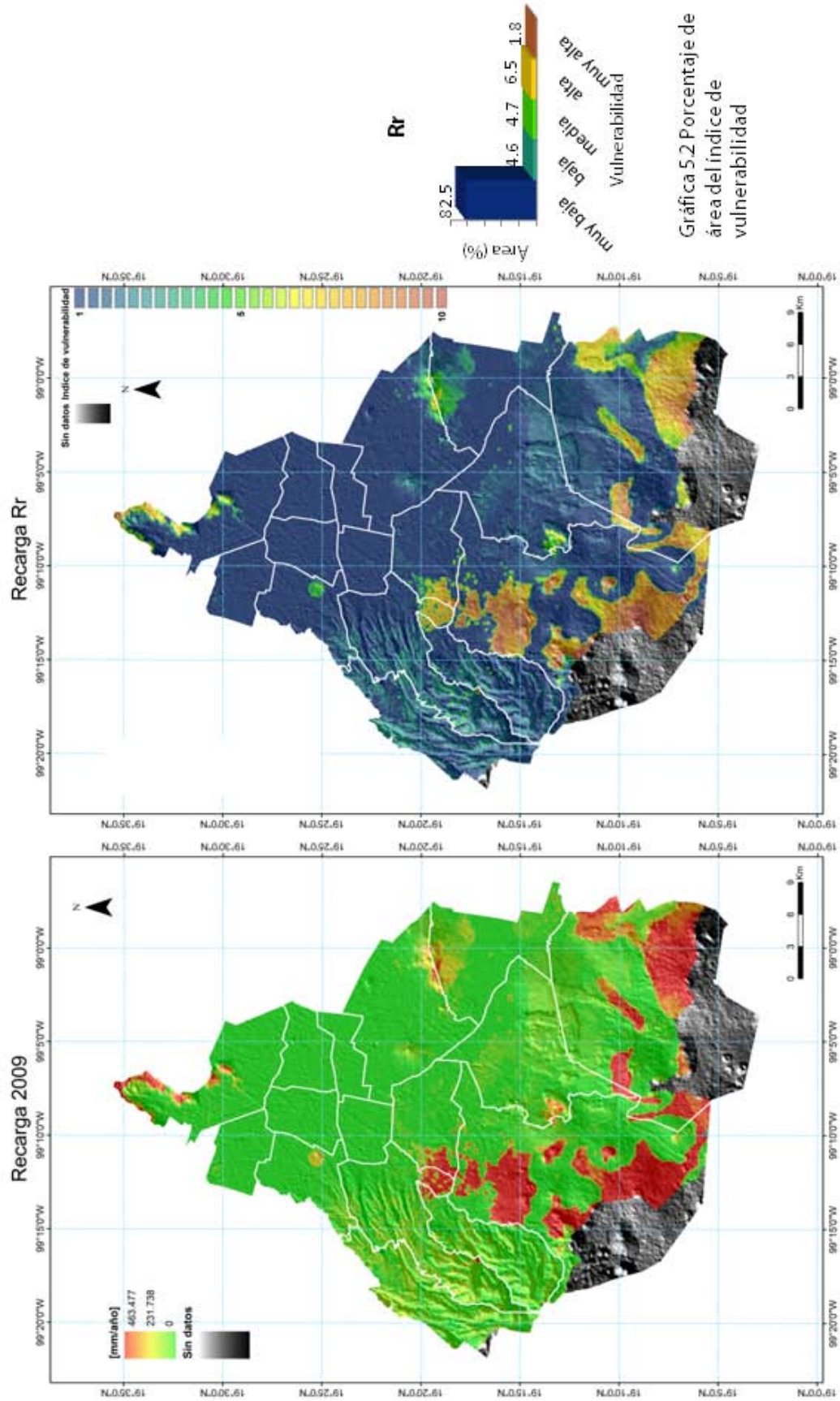


Figura 5.2 Distribución de la recarga, 2009 y vulnerabilidad de la recarga.

5.3 A (Medio acuífero)

El índice de vulnerabilidad del parámetro del medio acuífero se observa en la Figura 5.3. Se ve afectado por el tipo de litología en la que se emplaza el acuífero. En el caso del Distrito Federal, las zonas con mayor índice se ubican en litologías de gravas, escorias, piroclastos y arena/grava que proveen muy poca protección al acuífero; estas áreas se encuentran principalmente en las delegaciones de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Coyoacán y parte de Cuauhtémoc y Benito Juárez.

En contraste con estas zonas vulnerables podemos observar que las áreas menos vulnerables se encuentran donde existen los mayores espesores de arcilla en las delegaciones de Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Tláhuac, Xochimilco e Iztapalapa. El sur de la ciudad presenta vulnerabilidades moderadas ya que en esta zona predominan los basaltos de la Sierra del Chichinautzin; esta situación se repite en la sierra de Las Cruces a causa de la abundancia de rocas volcánicas. La vulnerabilidad media predomina en área sobre las demás con un 54.8% del área total del Distrito Federal, posteriormente prevalece la baja con 30.8%.

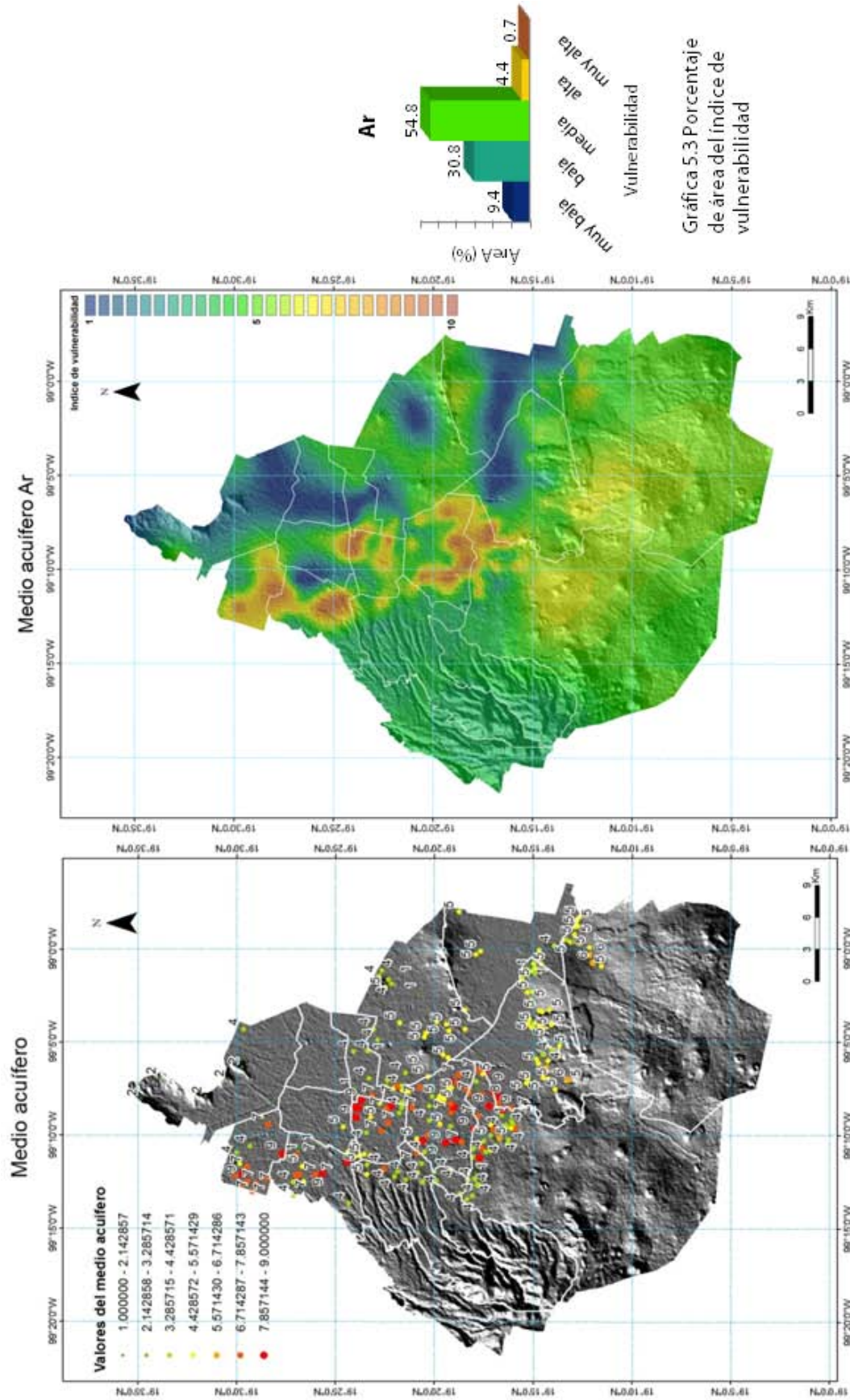


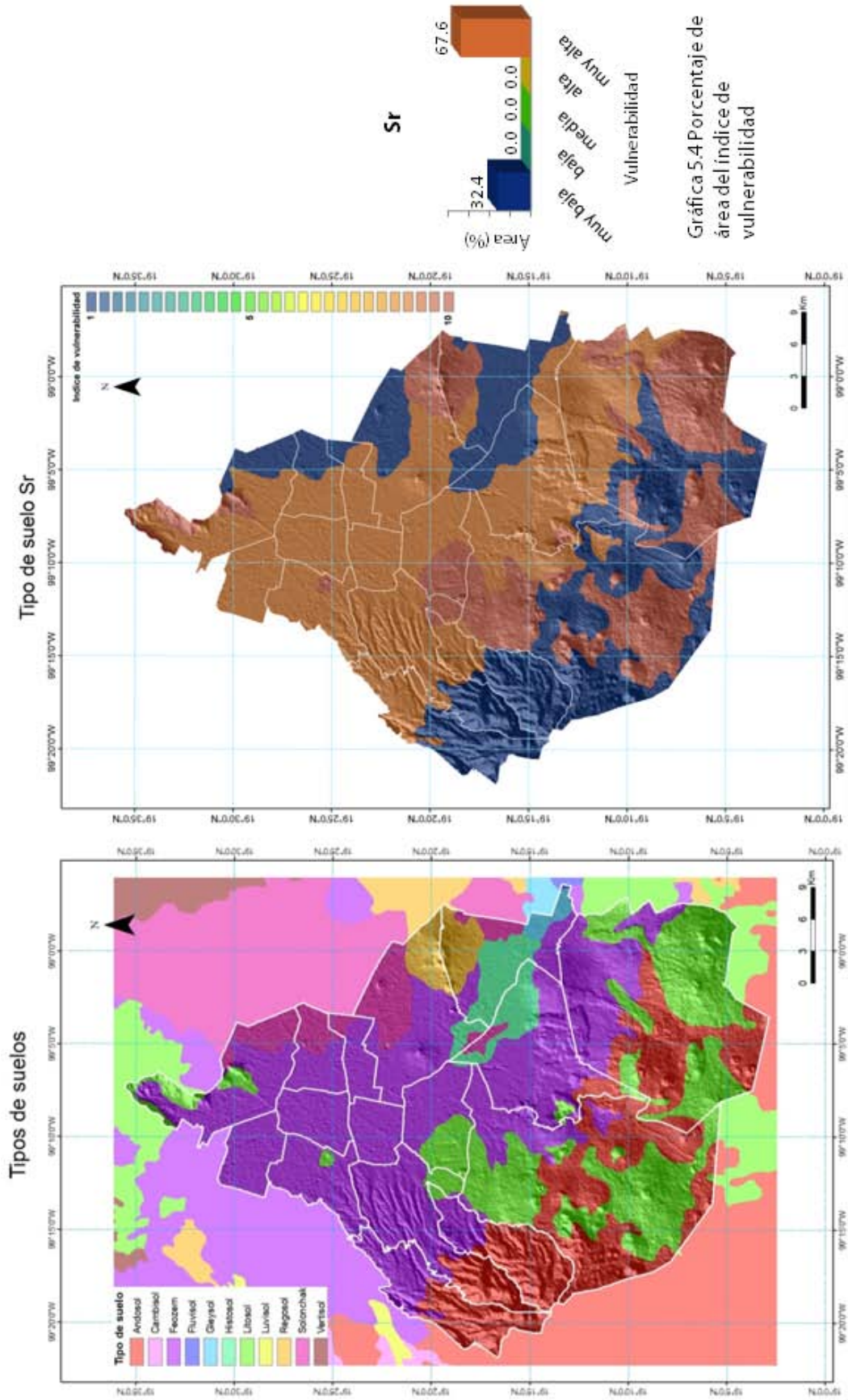
Figura 5.3 Valores de vulnerabilidad asociados a pozos con corte litológico y vulnerabilidad del medio acuífero

5.4 S (Suelos)

Los suelos en la Ciudad de México son de vulnerabilidad muy alta en general como se observa en la Figura 5.4. Estos suelos cubren la mayor parte del norte, centro y sur del Distrito Federal sumando un 67.6% de la superficie total.

La vulnerabilidad muy baja representa un 32.4% del área total y se localiza en la parte sur-oeste de la Sierra de las Cruces, en algunas zonas de Tlalpan y Milpa Alta, en estas áreas el tipo de suelo que predomina es el Andosol. En las delegaciones de Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero se observan otras áreas con muy baja vulnerabilidad en las que predominan los Histosoles y el Solonchak.

Las áreas que presentan la vulnerabilidad más alta se encuentran en Milpa Alta, Tlalpan, el oeste de Coyoacán, al este de Tláhuac e Iztapalapa, y en una pequeña porción de Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo. El suelo que se encuentra en estas delegaciones es el Litosol. El resto del Distrito Federal encontramos Feozem, que representa una alta vulnerabilidad a causa de la alta permeabilidad y porosidad que posee.



Gráfica 5.4 Porcentaje de área del índice de vulnerabilidad

Figura 5.4 Distribución espacial de los suelos del DF (INEGI, 2007) y vulnerabilidad de los suelos.

5.5 T (Topografía)

Respecto a la topografía, los valores ubicados en los altos topográficos son los que representan la menor vulnerabilidad, la mayoría de ellos repartidos en el sur y oeste del área a lo largo de las sierras de Chichinautzin y de Las Cruces respectivamente (Figura 5.5). También encontramos puntos aislados en el este de la Ciudad pertenecientes a la Sierra de Santa Catarina, y al norte, pertenecientes a la Sierra de Guadalupe. Esta vulnerabilidad muy baja ocupa un 25.4% del área total.

El resto de la Ciudad posee valores de vulnerabilidad altos que alcanzan a ocupar el 31.3% del área del Distrito Federal. La alta vulnerabilidad se presenta en zonas planas correspondientes al área que solían ocupar los lagos prehispánicos.

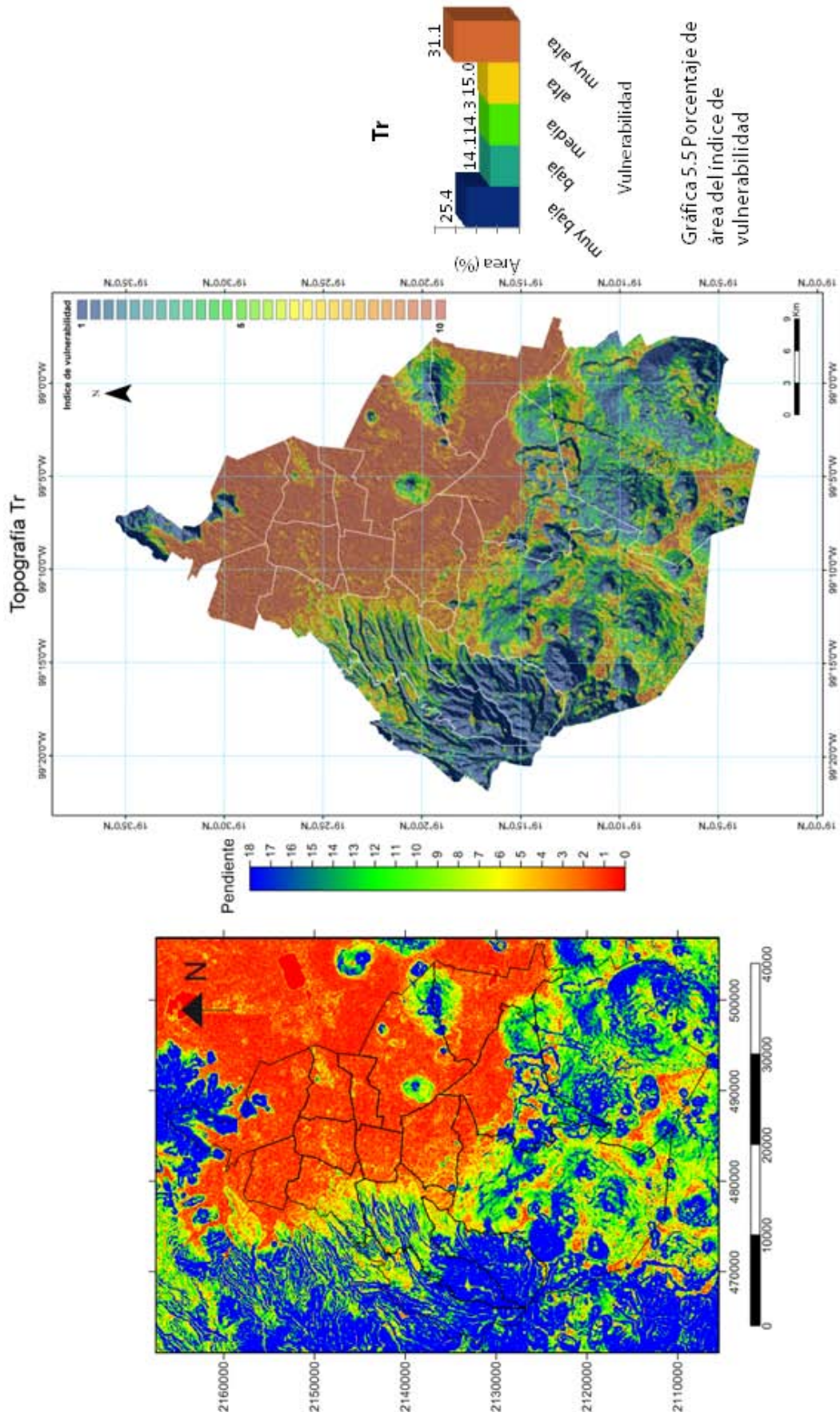


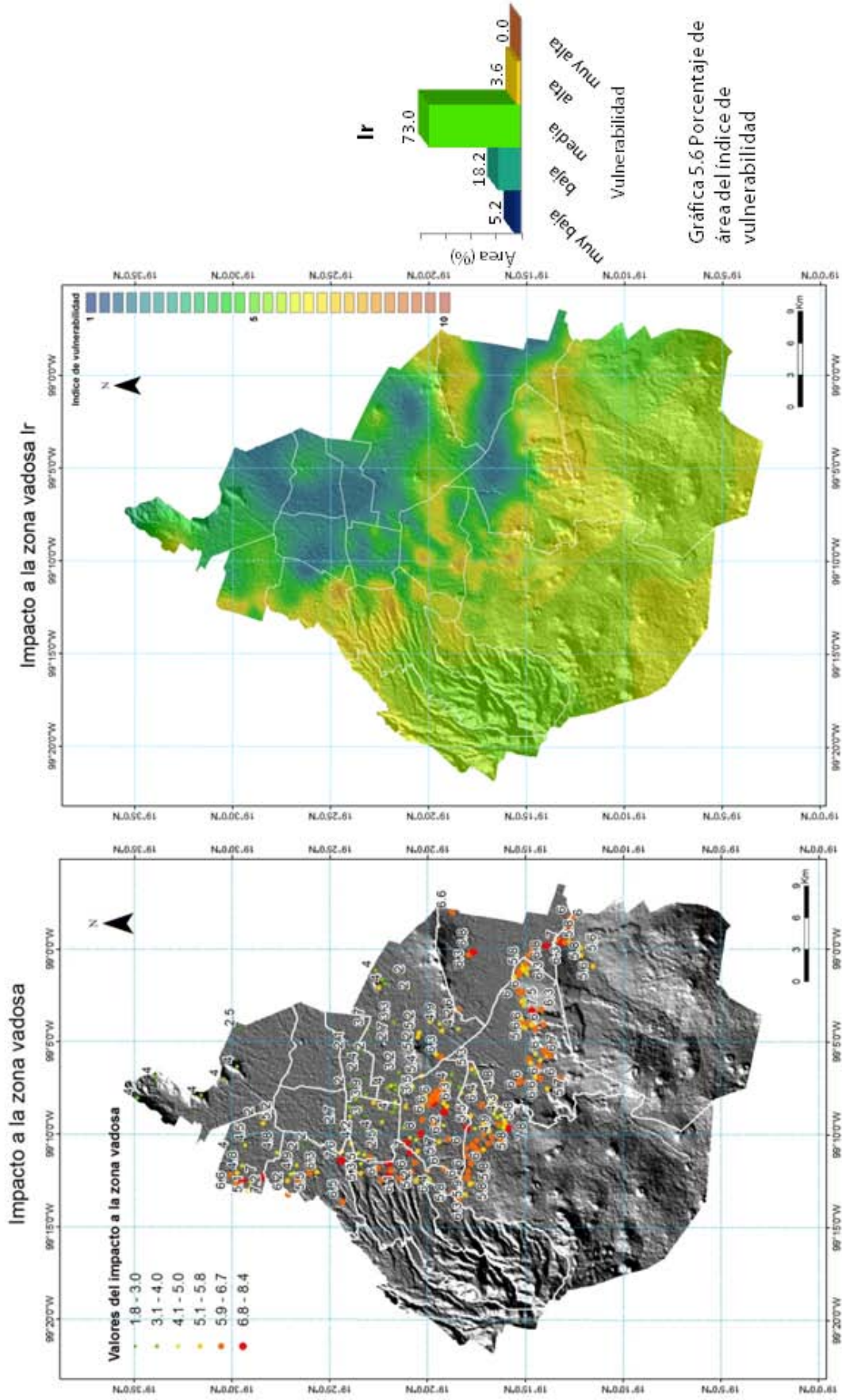
Figura 5.5 Pendiente topográfica de la Ciudad de México y valores de vulnerabilidad de la pendiente.

5.6 I (Impacto a la Zona Vadosa)

Este parámetro refleja la vulnerabilidad del material geológico que ocupa los primeros metros desde la superficie hasta el nivel estático. Las zonas que presentan menor vulnerabilidad son aquellas donde se encuentra la mayor potencia de arcillas, esto es a causa de la baja permeabilidad de este tipo de depósitos. Los valores de permeabilidad se encuentran en el rango de 8×10^{-3} hasta 8×10^{-7} (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004).

El 73% del área del Distrito Federal presenta vulnerabilidad media y se encuentra en las zonas altas en el sur y oeste, esto se debe a que predominan litologías como las tobas, arenas, basaltos y conglomerados (Figura 5.6).

Las zonas de vulnerabilidad alta (3.6% del área total) se encuentran en las zonas de transición entre las zonas planas y los altos topográficos, aquí se encuentran litologías como gravas y arenas derivadas de la erosión que tiene lugar en los altos topográficos.



Gráfica 5.6 Porcentaje de área del índice de vulnerabilidad

Figura 5.6 Valores de vulnerabilidad asociados a pozos con corte litológico y vulnerabilidad de la zona vadosa.

5.7 C (Conductividad hidráulica)

Por último, en el mapa Cr observamos únicamente índices de vulnerabilidad muy baja (1-2) y baja (3-4) debido a que los valores de conductividad hidráulica que fueron interpretados, se encuentran en el intervalo de 0.5 a 20.7 m/d. La vulnerabilidad más baja se encuentra distribuida en el occidente de la Ciudad, principalmente en la Sierra de las Cruces en las delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Magdalena Contreras (Figura 5.7).

Al sur se observa un ligero aumento de la conductividad en las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta por la presencia de los basaltos de la Sierra del Chichinautzin (>7 m/d) que poseen una mayor conductividad que los materiales volcánicos de la Sierra de las Cruces (<1 m/d).

En las porciones centrales de Benito Juárez y Coyoacán se observa un ligero aumento del índice de vulnerabilidad a causa de la presencia de arenas y gravas que poseen una mayor conductividad hidráulica. Este aumento de conductividad también se observa en el área de la Sierra de Santa Catarina, en este caso por la presencia de material volcánico.

De los valores calculados por el método de Rushton podemos destacar que se obtuvieron valores de 0.16 m/día a 60 m/día. El rango de valores obtenidos en las reinterpretaciones de Vázquez (1987) es de 0.70 m/día a 319.68 m/día., por otro lado, las obtenidas por métodos estándar varían de 0.07 m/día a 18.99 m/día. El Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería realizó una reinterpretación de los datos proporcionados por el SACM (2005) con lo que se obtuvieron valores mínimos y máximos de 0.41 m/día y 45.60 m/día.

En la Tabla 5.1 se muestran los valores finales de conductividad hidráulica que se utilizaron para las configuraciones del parámetro Cr.

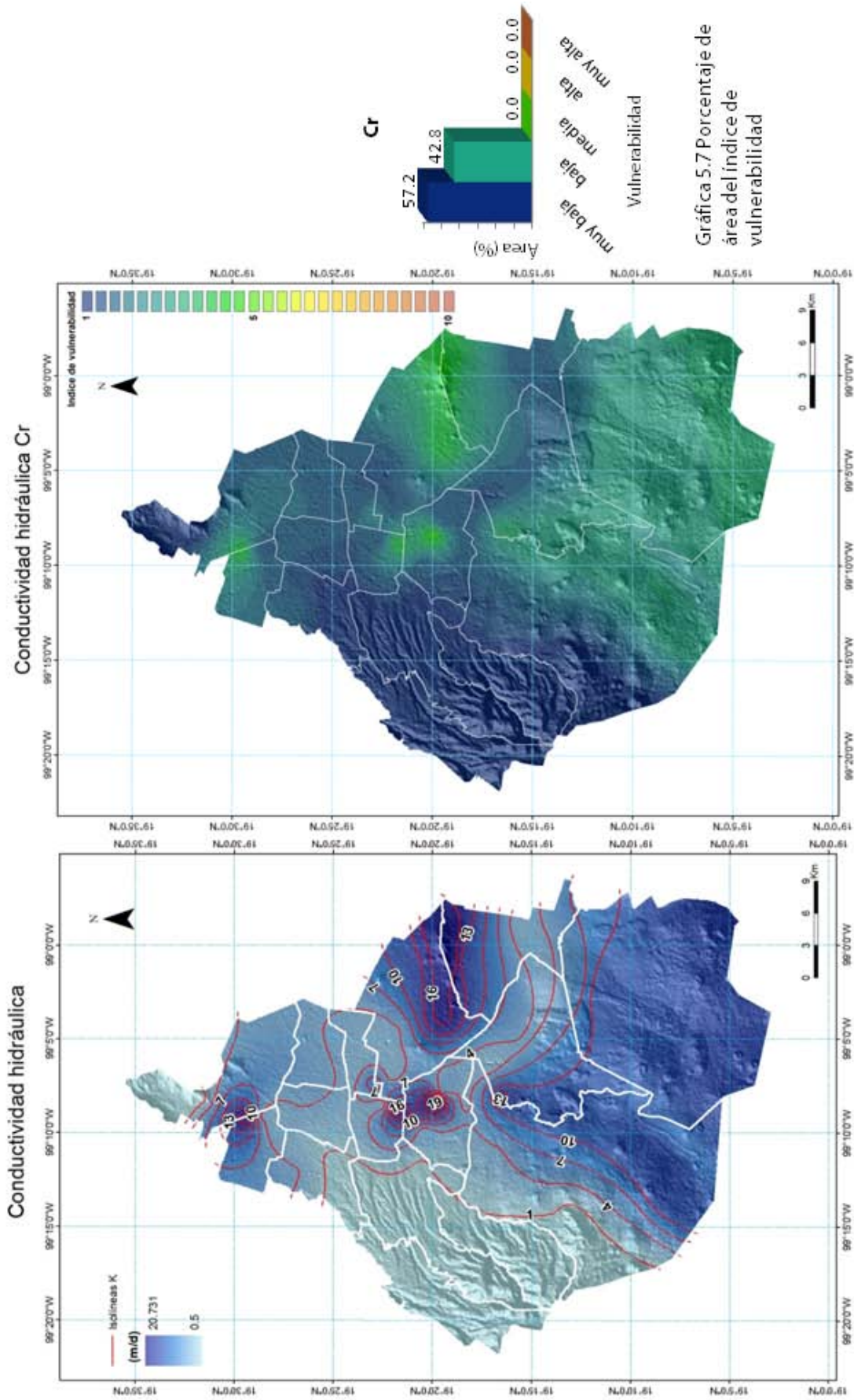


Figura 5.7 Conductividad hidráulica del 2010 y vulnerabilidad asignada a la conductividad hidráulica.

Clave	Nombre de Pozo	X	Y	K (m/d)	T (m ² /d)
8	Agrícola Oriental 6	492005	2143268	14.76	1579.00
18	Altavista	479022	2139290	0.90	123.00
21	Arenal San Ángel	480867	2139378	1.84	1813.00
36	Castañeda 6	478677	2141443	2.32	353.00
38	Ciudad Deportiva 2	490398	2145310	2.92	377.00
69	Jardines del Pedregal 5	477248	2135365	20.18	3758.00
74	La Cienega	482539	2137993	6.52	717.00
76	La Pirulera	478870	2150360	4.09	514.00
92	La Moderna	485806	2144537	11.07	1485.00
119	Portales	484601	2141067	52.37	2800.00
141	San Martin Xochinahuac 2	478706	2156331	2.92	980.00
148	Santa Ursula Xitla	481273	2131506	58.12	1553.00
161	Trabajadores del Hierro	484111	2153792	25.43	2430.00
193	Ortiz Rubio	485040	2142278	18.76	875.00
194	Country Club	485129	2139839	2.64	492.00
Izt-8	Iztapalapa 8	495991	2139160	3.20	459.00
Per-3	Periférico 3	485006	2134778	2.13	337.00
Per-9	Periférico 9	486058	2131329	1.49	216.00
SC-12	Santa Catarina 12	492786	2136963	4.28	248.00
SL-15	San Luis 15	492988	2129012	1.84	147.00
Xot-2B	Xotepingo 2B	485650	2137357	4.19	683.00

Tabla 5.1 Parámetros hidráulicos de la Ciudad de México

En la Figura 5.8 se muestra un mosaico en el que se compilan los índices de vulnerabilidad de las variables que componen al método DRASTIC.

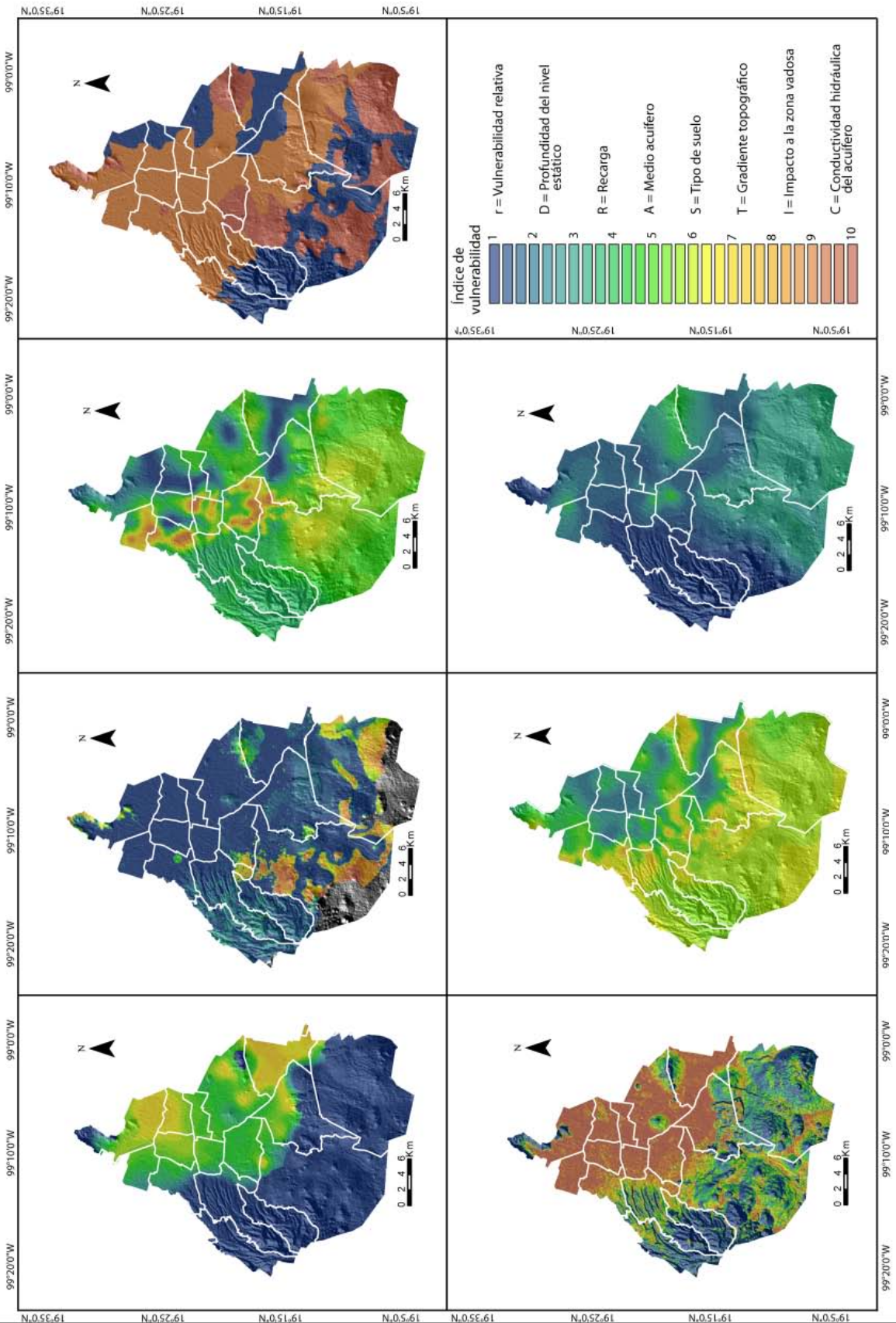


Figura 5.8 Mosaico de las variables del Índice DRASTIC

5.8 Índice DRASTIC

Utilizando el álgebra de mapas con la Ecuación 1 ($D_i=5D_r+4R_r+3A_r+2S_r+1T_r+5I_r+3C_r$) se generó el índice DRASTIC de la Ciudad de México que se observa en la Figura 5.9. Este índice presenta valores en un rango de 54 a 153. Cabe mencionar que el índice DRASTIC original (Aller et al., 1987) contempla valores un mínimo de 23 y un máximo de 230 tomando en cuenta las condiciones de menor y mayor vulnerabilidad de un acuífero, respectivamente.

Índice DRASTIC

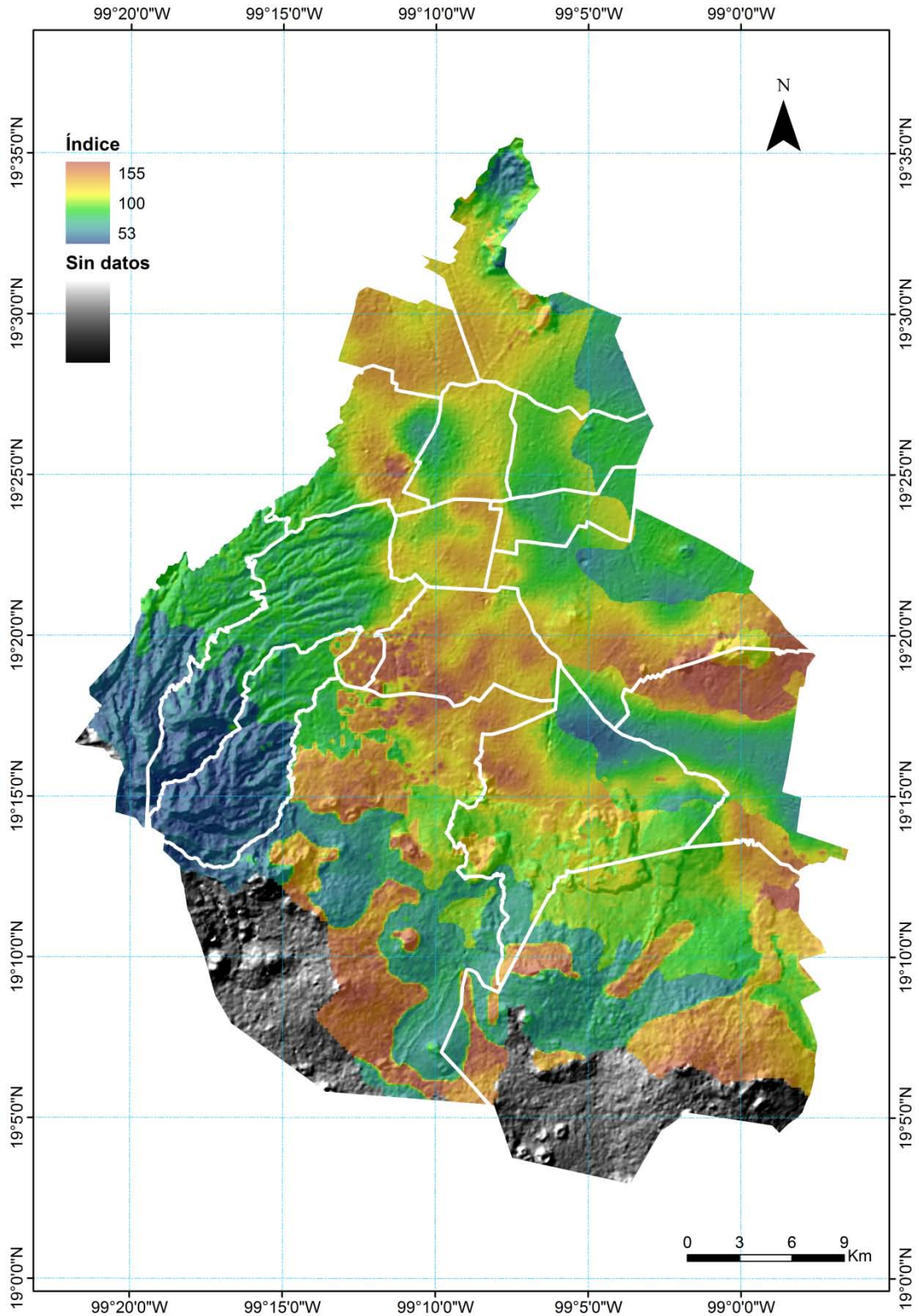


Figura 5.9. Variación espacial del Índice DRASTIC del acuífero de la Ciudad de México

Los mayores índices (>110) se presentan en las delegaciones de Miguel Hidalgo (69-130), Coyoacán (83-153), Tlalpan (máximo de 145), en la zona sur de Iztapalapa (61-137), Milpa Alta (64-139), al oeste de Xochimilco (57-122) y en la zona norte de Tláhuac (62-137). Los índices menores a 100 se encuentran en las delegaciones de Álvaro Obregón (54-124), Cuajimalpa (54-92), Magdalena Contreras (54-115) y en una gran área de Tlalpan (mínimo de 55).

Los altos índices estimados en las delegaciones de Tlalpan, el sur de Xochimilco y Milpa Alta se deben a que la profundidad del nivel estático se encuentra a más de 80 m de profundidad y la pendiente topográfica es mayor al 6%. El medio acuífero, el impacto a la zona vadosa y la conductividad hidráulica son los principales factores que aumentan el índice en estas áreas. Tras un análisis de los distintos parámetros, se encontró que la recarga juega un papel preponderante en la caracterización del índice DRASTIC. Las áreas de estas delegaciones que presentan índices bajos, menores a 74, se deben a que la profundidad del nivel piezométrico supera los 100 m de profundidad y la recarga disminuye a menos de 50 mm/año proporcionando una mayor protección al acuífero.

Los factores responsables de los altos índices que se encuentran en las delegaciones de Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac y el norte de Xochimilco se encuentran controlados por una baja pendiente topográfica (<2%) y la profundidad del nivel piezométrico (<80 m). En las delegaciones de Benito Juárez y el norte de Coyoacán la conductividad hidráulica fluctúa entre los 8 y 13 m/d, lo que proporciona una mayor protección en estas áreas. En contraste, se observan índices bajos en las delegaciones de Venustiano Carranza (71-97), Iztacalco (73-107) y el norte de Iztapalapa (61-103) a causa de la presencia de espesores de arcilla que sobrepasan los 40 m.

Las altas pendientes topográficas (<12%), la baja tasa de recarga (<50 mm/año) y la conductividad hidráulica baja (3 m/d) aunado a que la superficie potenciométrica se encuentra por debajo de los 100 m de profundidad, son factores que se conjuntan en la zona de la Sierra de las Cruces en las delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa y

Magdalena Contreras para generar un área con un índice de vulnerabilidad bajo (<74). En las inmediaciones de Coyoacán, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón se identificó un área de 6.5 km² con un índice DRASTIC muy alto (100-125) que es atribuido a la recarga (100 a 120 mm/año), el tipo de suelo que corresponde a la vulnerabilidad más alta (10) y la disminución de la pendiente topográfica.

5.9 Índice normalizado y zonas de vulnerabilidad

Tomando como base el mapa de índice DRASTIC se realizó una normalización de los valores a una escala de 0 a 10 para generar el mapa de zonas de vulnerabilidad que se muestra en la Figura 5.10.

Los valores correspondientes a la vulnerabilidad muy baja (0-2) se observan en Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan ocupando un área del 55.1%, 73.13% y 35.1% del total de cada delegación, respectivamente (Figura 5.11). Es notable la distribución profunda del nivel potenciométrico en estas delegaciones, mayor a 115 m., así como una tasa de recarga baja.

La zona de vulnerabilidad predominante en el área del Distrito Federal es la baja (2-4), esta predomina en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Cuauhtémoc, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco. Cabe mencionar que delegaciones como Tláhuac o Iztapalapa presentan zonas de vulnerabilidad alta en un 27% y 8.2% de la superficie total. En estas áreas encontramos niveles piezométricos entre los 40 y 90 m de profundidad, así como conductividades hidráulicas mayores a los 13 m/día y distribuciones de suelos con vulnerabilidades muy altas (9 y 10), la conjunción de estos factores deriva en un el aumento puntual de la vulnerabilidad en estas delegaciones.

Por otra parte las zonas de alta vulnerabilidad (6-8) se encuentran en las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta, sobre todo en las áreas de recarga localizadas en los basaltos de la

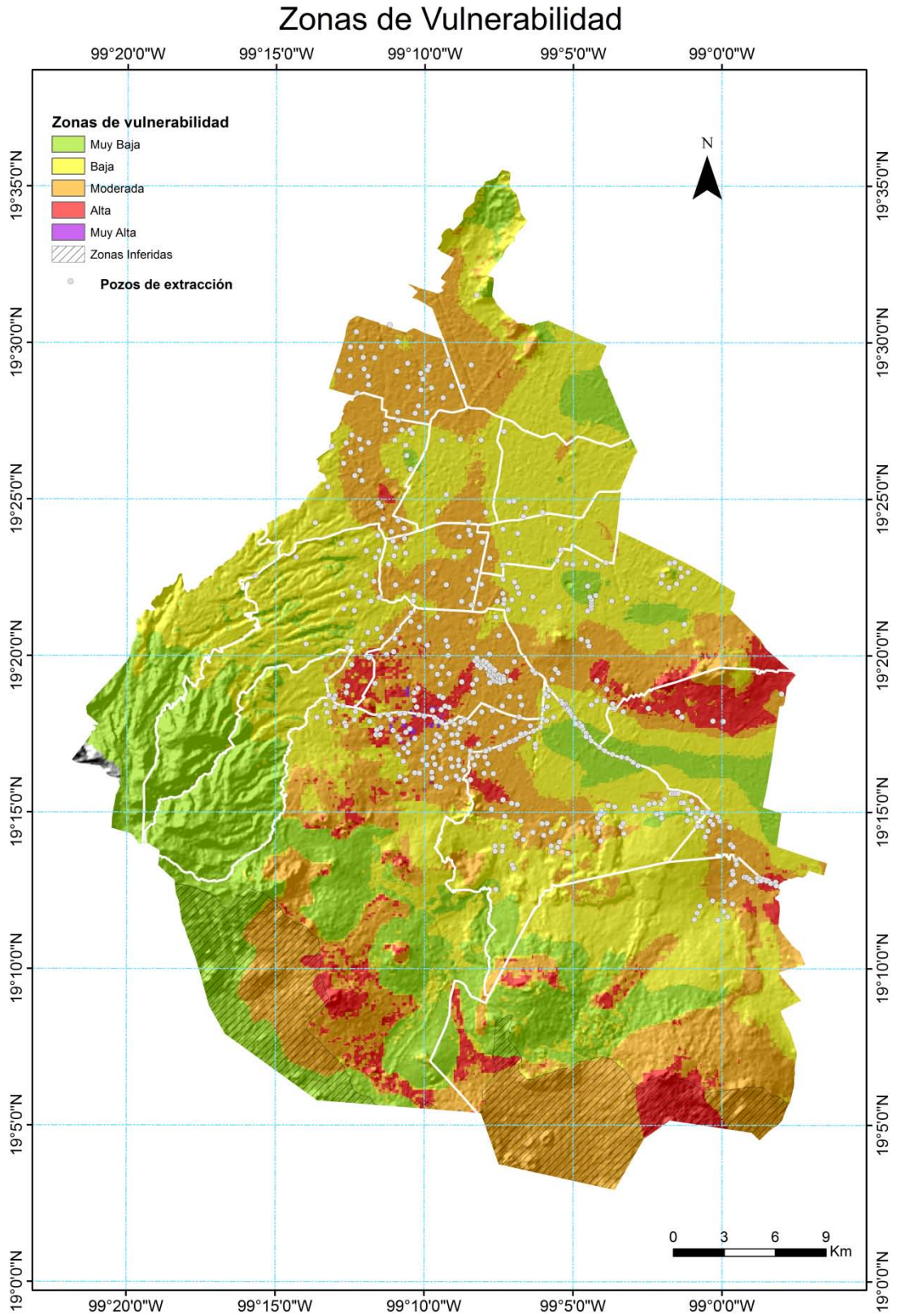


Figura 5.10 Mapa de zonas de vulnerabilidad de la Ciudad de México.

Sierra del Chichinautzin con conductividades hidráulicas del orden de 8 a 13 m/d y una recarga de más de 100 mm/año.

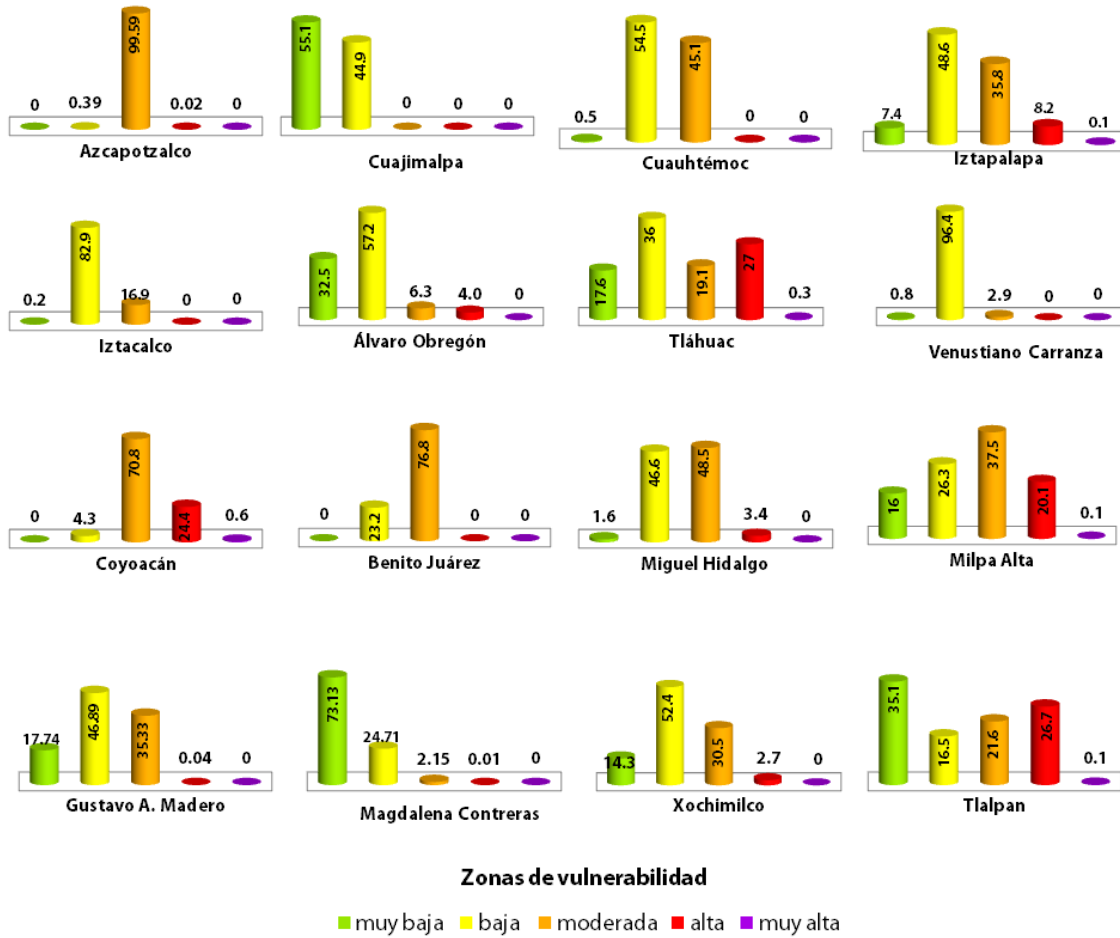


Figura 5.11 Porcentaje del área de las zonas de vulnerabilidad por delegación.

Las delegaciones en las que prevalecen las zonas de vulnerabilidad moderada (4-6) son Azcapotzalco (99.59%), Miguel Hidalgo (48.5%), Benito Juárez (76.8%), Coyoacán (70.8%) y Milpa Alta (37.5%). En estas delegaciones, los principales factores que controlan la vulnerabilidad son la conductividad hidráulica del acuífero que no sobrepasa los 13 m/día y la recarga que es menor a los 50 mm/año.

Otras delegaciones en las que se detectaron zonas de alta vulnerabilidad son Iztapalapa, Coyoacán, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y Xochimilco. El porcentaje de alta vulnerabilidad presente en la superficie de las delegaciones Miguel Hidalgo, Álvaro

Obregón, Iztapalapa, Coyoacán, Tláhuac, Xochimilco, Tlalpan y Milpa Alta es de 3.4%, 4%, 8.2%, 24.4%, 27%, 2.7%, 26.7% y 20.1%, respectivamente.

Las zonas de muy alta vulnerabilidad fueron ubicadas en las delegaciones de Tláhuac, Coyoacán, Iztapalapa, Milpa Alta y Tlalpan donde cubren el 0.3%, 0.6%, 0.1%, 0.1% y 0.1% del área de sus territorios respectivamente. Estas zonas de muy alta vulnerabilidad son causadas por la presencia de niveles piezométricos menores a los 60 m, valores de recarga mayores a los 50 mm/año y conductividades hidráulicas superiores a los 7 m/día.

Al sur de la ciudad podemos observar algunas áreas que muestran un sombreado, esto es porque se realizó una inferencia de la vulnerabilidad ya que la distribución del parámetro de recarga no alcanza a cubrir toda la extensión del Distrito Federal. La determinación de la vulnerabilidad de estas zonas se hizo analizando los otros parámetros que si abarcan toda el área de estudio así como el peso que se le asignó a cada uno.

El área que ocupan cada una de las zonas de vulnerabilidad en el Distrito Federal se observan en la Figura 5.12. La vulnerabilidad preponderante en el área de estudio es la baja con 41.4 % del total del área. Después tenemos la vulnerabilidad moderada, muy baja, alta y muy alta con 34.3%, 16.9%, 7.3% y 0.08% respectivamente.

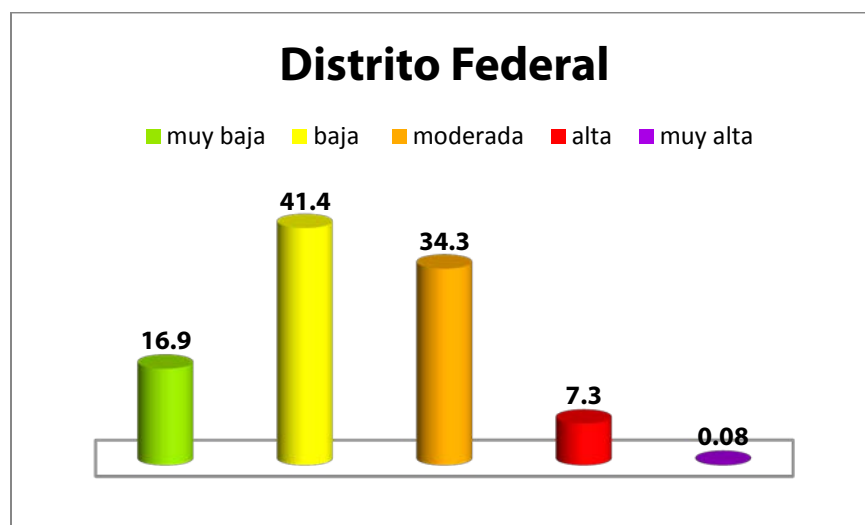


Figura 5.12 Porcentaje de zonas de vulnerabilidad acuífera en el Distrito Federal.