



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de trabajo

3.1.1 Software utilizado

3.2 D (Profundidad al nivel estático)

3.3 R (Recarga)

3.4 A (Medio acuífero)

3.5 S (Suelos)

3.6 T (Topografía)

3.7 I (Impacto a la Zona Vadosa)

3.8 C (Conductividad hidráulica)

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de trabajo

La metodología que se utilizó para evaluar la vulnerabilidad acuífera de la Ciudad de México se muestra en la Figura 3.1. La primera etapa del proceso consistió en la recopilación y análisis de una gran cantidad de fuentes bibliográficas para integrar la información existente del área de estudio sobre temas como la geología e hidrogeología. Posteriormente se realizó un censo de las fuentes potenciales de contaminación (gasolineras y autoconsumos), así como la verificación de la ubicación de una gran cantidad de pozos de la ciudad.

Con esta información recopilada se integró una base de datos que contiene las coordenadas, datos de la profundidad del nivel estático, caudal de extracción y en algunos casos pruebas de bombeo, cortes litológicos (Figura 3.2) y datos geoquímicos de los pozos de agua potable. Sobre las fuentes potenciales de contaminación se incluyó información de las coordenadas, tipo de fuente, volumen de combustible almacenado, antigüedad de la instalación, etc.

Tras la evaluación de la información obtenida se llegó a la conclusión de que el método DRASTIC sería el elegido para realizar la caracterización de la vulnerabilidad del acuífero del Distrito Federal porque resulta ser el más robusto sin que la obtención de información se convierta en un impedimento para su procesamiento.

En la siguiente etapa se generó un Sistema de Información Geográfico (SIG) que incluye todos los datos obtenidos en la etapa anterior. Con la información incorporada en el SIG se crearon las distintas capas que dieron origen al índice DRASTIC. El parámetro D (profundidad al nivel estático) se configuró con los datos de potenciometría obtenidos para el 2010, para la R (recarga) se utilizaron los datos proporcionados por Carrera-Hernández (2008), la A (litología del acuífero) así como la I (litología de la zona vadosa) fueron calculadas utilizando la información proveniente de los cortes litológicos de la

ciudad, el parámetro S (tipo de suelo) fue configurado con datos obtenidos de INEGI, la (T) topografía se generó con ayuda de un modelo digital de elevación y por último, la C (conductividad hidráulica) fue calculada con datos generados en las pruebas de bombeo que se reinterpretaron de los datos obtenidos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 2005) y de Vázquez S. (1987).

Cada una de estas capas fue multiplicada después por un factor de ponderación que refleja la influencia del factor en el cálculo de la vulnerabilidad acuífera. Al tener estas capas listas se realizó un álgebra de mapas para sumar las capas ente sí y generar el mapa de índice DRASTIC. Posteriormente, utilizando este mapa como, se realizó un proceso de normalización de 0 a 10 para clasificar el área del Distrito Federal en zonas de vulnerabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta. Los valores extremos utilizados para el proceso de normalización fueron 55 y 150. Los nuevos valores se reagruparon en intervalos uniformes a los que se les asignó un valor de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 3.1.

Índice DRASTIC	Índice normalizado	Zonas de vulnerabilidad
55-74	0-2	Muy Baja
74-93	2-4	Baja
93-112	4-6	Moderada
112-131	6-8	Alta
131-150	8-10	Muy Alta

Tabla 3.1 Valores de vulnerabilidad normalizados y asignación de zonas de vulnerabilidad.

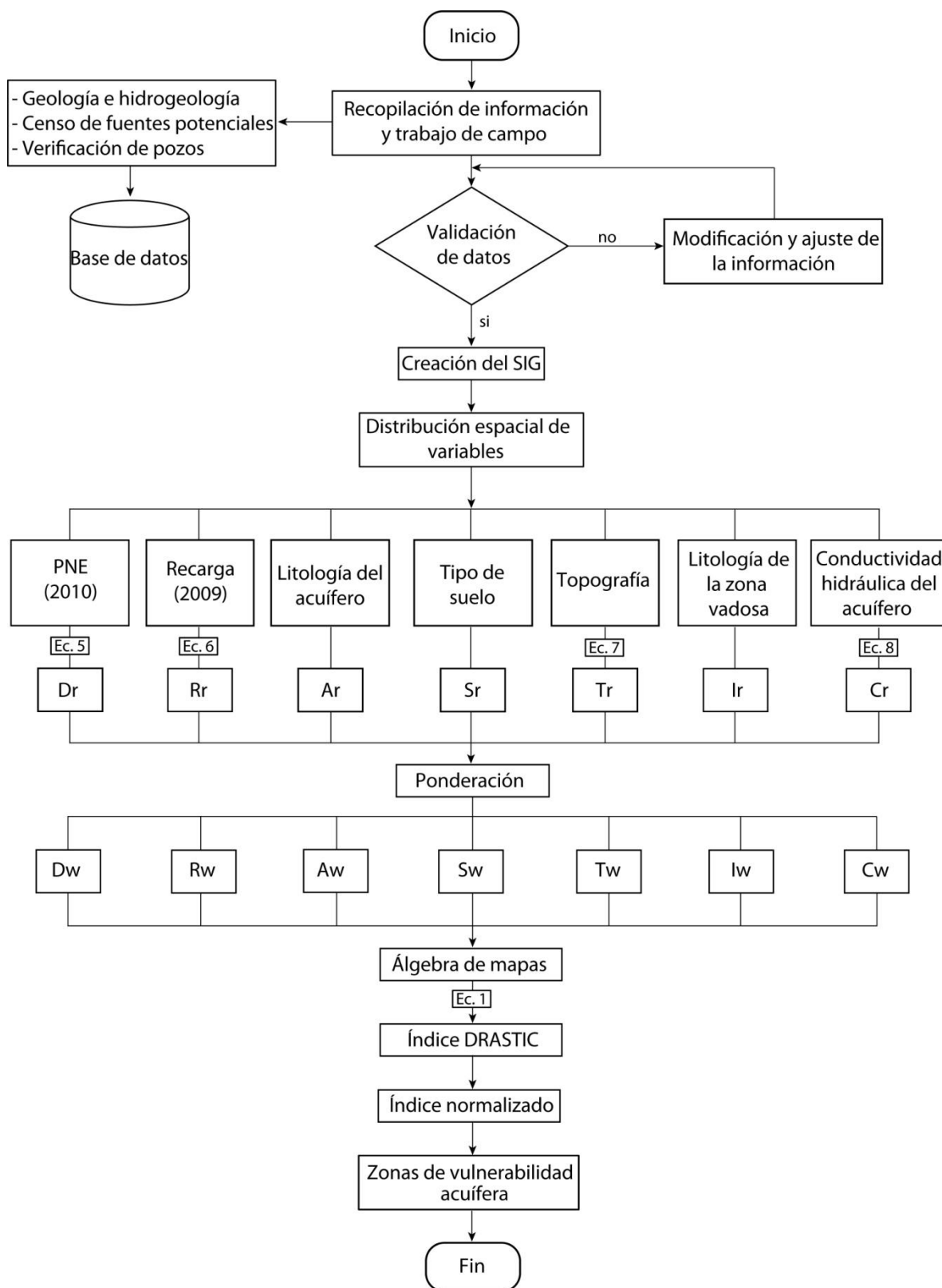


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

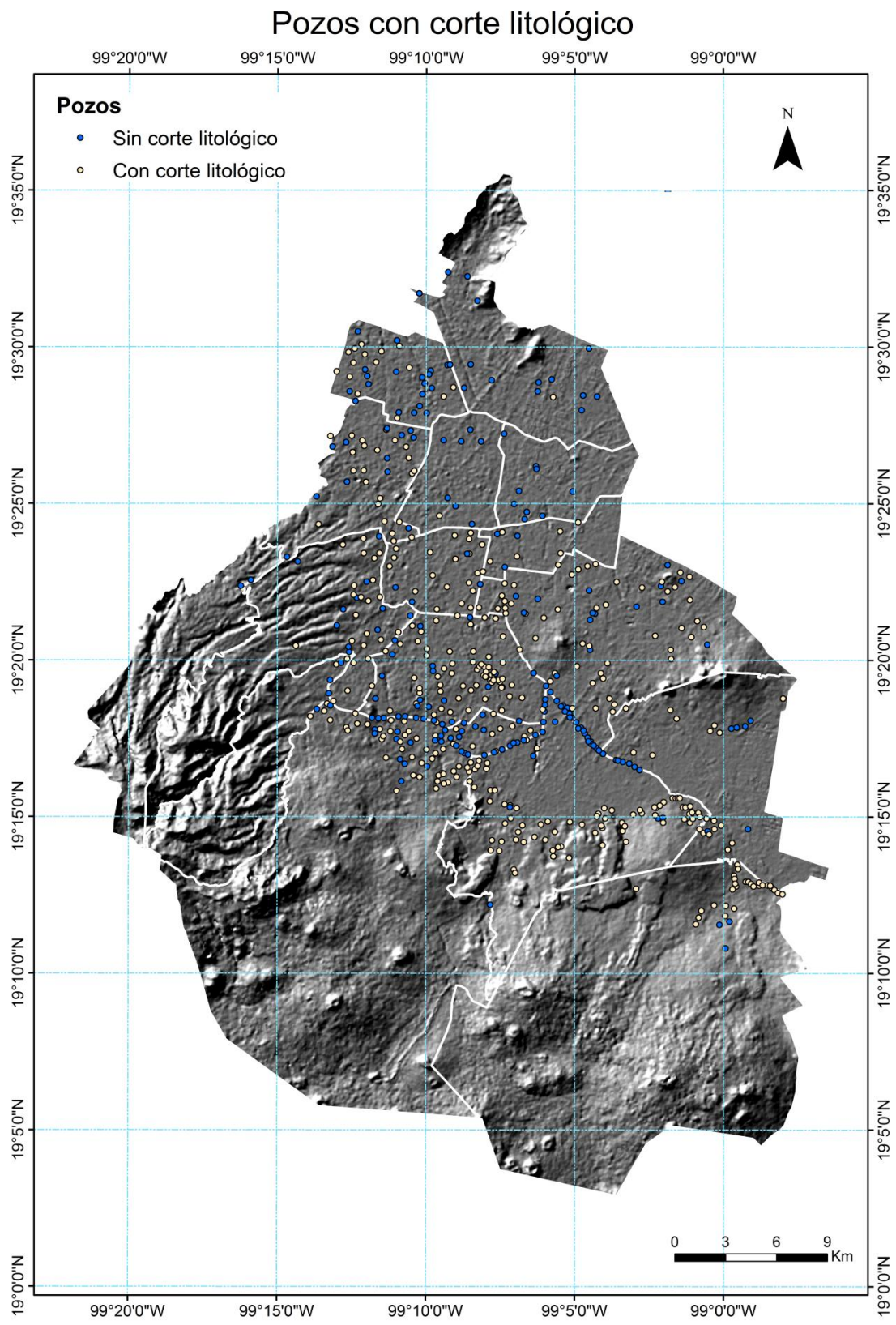


Figura 3.2 Pozos de la Ciudad de México con corte litológico

3.1.1 Software utilizado

El Sistema de Información Geográfico que fue utilizado en este proyecto fue el ArcGIS 9.3.1 (ESRI, 2009) con los módulos *3D Analyst*, *Spatial Analyst*, *Geoestatistical Analyst* y *Publisher*. En este software se compilaron las bases de datos necesarias para generar las capas que constituyen al índice DRASTIC, también se realizaron el álgebra de mapas y los procesos de normalización del índice.

La mayoría de las interpolaciones fueron generadas con el programa SURFER 10.1.561 (Golden Software, 2011). Este es un software especializado en visualización en 3D, creación de líneas de contorno y modelación de superficies.

Otra herramienta utilizada fue el Global Mapper 10.02 (Global Mapper Software LLC, 2010) que para este trabajo fungió como un enlace entre el GIS y SURFER. Este programa permite hacer conversiones entre tipos de archivos para poder trabajar distintos aspectos del cálculo de un parámetro en los distintos programas y aprovechar las ventajas que proporciona cada uno de ellos.

A continuación se describen los parámetros utilizados y los procesos realizados para la obtención de los valores de vulnerabilidad:

3.2 D (Profundidad al nivel estático)

En la Tabla 3.2 se observan los valores para la profundidad del nivel estático los cuales fueron modificados por Ramos (2010b) para adaptarlos a las profundidades existentes en la Cuenca de México.

Profundidad al Nivel freático (m.)		
Intervalo original	Intervalo modificado	Clase
0 - 1.5	0 - 7.5	10
1.5 - 4.6	1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	23 - 45.5	7
9.1 - 15.2	45.5 - 76	5
15.2 - 22.9	76 - 114.5	3
22.9 - 30.5	114.5 - 152.5	2
>30.5	>152.5	1

Tabla 3.2 Valores para el factor de profundidad al agua subterránea.

La evaluación de este parámetro se realizó a partir de una base de datos hidrológicos que se construyó con información proporcionada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) para el periodo 1990-2005 y el Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México (OCAVM) para el periodo 2006-2010. Los datos que conforman esta base incluyen coordenadas de ubicación, datos piezométricos y datos geoquímicos. Estos datos presentan algunas deficiencias. Las coordenadas de muchos de los pozos se encuentran mal ubicadas y no existen valores de profundidad para varios años en muchos pozos. Por estas razones primero se realizó una identificación visual de los pozos por medio de "Google maps" o visitas físicas y se obtuvieron las coordenadas reales de la mayoría de los pozos con el fin de que los valores del nivel estático realmente se vean reflejados en las configuraciones. Se realizó la comprobación y relocalización de 364 pozos de un total de 656 que conforman la base de datos. Del total de pozos, 590 corresponden a la red del SACM, 27 a piezómetros, 16 a pozos en el

Estado de México en las cercanías con el límite del DF, y 26 a pozos no encontrados en las fuentes originales pero de los cuales se conoce su ubicación exacta.

Para el 2010 se proporcionaron únicamente 55 mediciones, por esta razón se generaron 165 hidrógrafos a partir de datos históricos. Estos hidrógrafos fueron procesados utilizando MATLAB 7.10.0.499, R2010a (Mathworks Team, 2010) ajustando una recta de tendencia con el método de mínimos cuadrados, discriminando mediciones claramente anómalas, con base en el análisis de la curva histórica de cada pozo. El código utilizado para procesar los hidrógrafos se muestra a continuación:

```
clear all
close all
format long g
clc

[filename,pathname]=uigetfile('*.','Elija su archivo');
dat=load(filename);
sizedat=size(dat);
cont=0;
delete hidrotemp.temptxt
for ii=1:sizedat(1,1)
    if dat(ii,2)==-9999
        cont=cont+1;
    else M=[dat(ii,1),dat(ii,2)];
        dlmwrite('hidrotemp.temptxt',M,'delimiter','\t','-
append','precision','%4.2f','newline','pc');
        end
    end
end

if cont==sizedat(1,1)
    display('Este pozo no contiene datos de PNE, no se puede generar hidrografo')
    pause(2)
    break
end

newdat=load('hidrotemp.temptxt');
Tiempo=newdat(:,1);
PNE=newdat(:,2);
figure(1)
set(axes,'XDir','default','YDir','reverse'),hold on;
plot(Tiempo,PNE,'r','markersize',8),hold on;
```

```

plot(Tiempo,PNE,'g+', 'markersize',8);
minT=min(Tiempo);
maxT=max(Tiempo);

display ('Continuar con el procesamiento del hidrografo?');
display ('1=si');
display ('2=no');
value_choice=input('');
if value_choice==2
    break
end

clc
display ('Ha modificado datos manualmente?(modificar valores antes de continuar)');
display ('1=si');
display ('2=no');
value=input('');
if value==1
    newdat=load('hidrotemp.temptxt');
    Tiempo=newdat(:,1);
    PNE=newdat(:,2);
end
p = polyfit(Tiempo,PNE,1);
PNE_2010 = polyval(p,2010);
tasa = p(1,1);
tas_adjust = tasa*100;
tas_adjust = round(tas_adjust);
tasa = (tas_adjust/100)*(-1);
% display(['y = ',num2str(p(1,1)), 'x ',num2str(p(1,2))]);
Tiempofit=[1990:0.1:2010];
PNEfit=polyval(p,Tiempofit);
PNECORRELACION=polyval(p,Tiempo);
Corrcoef=corr(PNE,PNECORRELACION);
corr_adjust = Corrcoef*100;
corr_adjust = round(corr_adjust);
Corrcoef = corr_adjust/100;
figure(2)
set(axes,'XDir','default','YDir','reverse'),hold on;
plot(Tiempo,PNE,'k:');hold on
plot(2010,PNE_2010,'r+', 'markersize',16); hold on
plot(Tiempofit,PNEfit);
title(filename)
xlim([1990 2010])
%ylim([default max(PNEfit)+3])

```

```

legend('Datos originales','Proyección 2010',['y = ',num2str(p(1,1)), 'x
',num2str(p(1,2)),' r= ',num2str(Corrcoef),' tasa = ',num2str(tasa),' m/año']);
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
grid on
xlabel('Año');
ylabel('PNE (m)');

totDat = size(Tiempo);
NumObs = totDat(1,1);

fitoutputfile=[filename,'fit'];
Mfit=[Tiempo,PNE];
dlmwrite(fitoutputfile,Mfit,'delimiter','\t','precision','%4.2f','newline','pc');
%append es para escribir consecutivamente sin borrar los archivos pasados
%(tener memoria en los datos y la manda a disco)

PNE_2010_adjust = PNE_2010*10;
PNE_2010_adjust = round(PNE_2010_adjust);
PNE_2010 = PNE_2010_adjust/10;

per_ini = min(Tiempo);
per_fin = max(Tiempo);

resumen = [PNE_2010, tasa, Corrcoef, NumObs, per_ini, per_fin];
resoutputfile=[filename,'res'];
dlmwrite(resoutputfile,resumen,'delimiter','\t','newline','pc');

```

A pesar de utilizar estos criterios de discriminación se generaron algunos valores anómalos que fueron descartados. Con las 55 mediciones proporcionadas se calculó el error porcentual al compararlas con los valores calculados. El error promedio obtenido fue del 4%, validando el proceso y las predicciones de todos los hidrógrafos. En ArcGIS (ESRI, 2009) se realizó una operación llamada *Topo to RASTER* con la cual a partir de los valores generados por los hidrógrafos y los de la base de datos se genera una superficie de valores continuos. Esta superficie generada en GIS se exportó a SURFER (Golden Software, 2010) con un tamaño de pixel de 90x90 para realizar la configuración del nivel potenciométrico usando el método de Kriging.

Kriging es un método geoestadístico de estimación de puntos que parte del principio de que la variación espacial continúa con el mismo patrón, es decir, que los puntos

cercanos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes (Chapra, S.C. et al., 2007).

En SURFER (Golden Software, 2010) se definió un área con elevaciones mayores a los 2410 metros en la cual la profundidad del nivel sobrepasa los 150 metros, valor que supera el máximo para la evaluación de la vulnerabilidad, por lo que a esta área se le asignó el valor fijo de 150 metros de profundidad para efectos prácticos. Esta área es la zona de recarga para el acuífero de la Ciudad la cual se delimita abriendo el DEM (*Digital Elevation Model*) de la Ciudad de México como un *contour map* (Figura 3.3) y aplicando la operación *Grid|Math, IF A>2410,150,0* sobre el *grid* del DEM para delimitar el área (Figura 3.4).

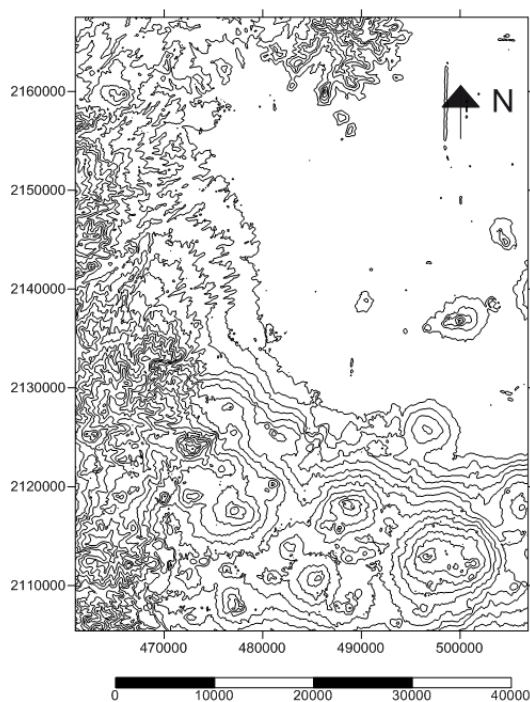


Figura 3.3 Líneas de contorno del DEM.

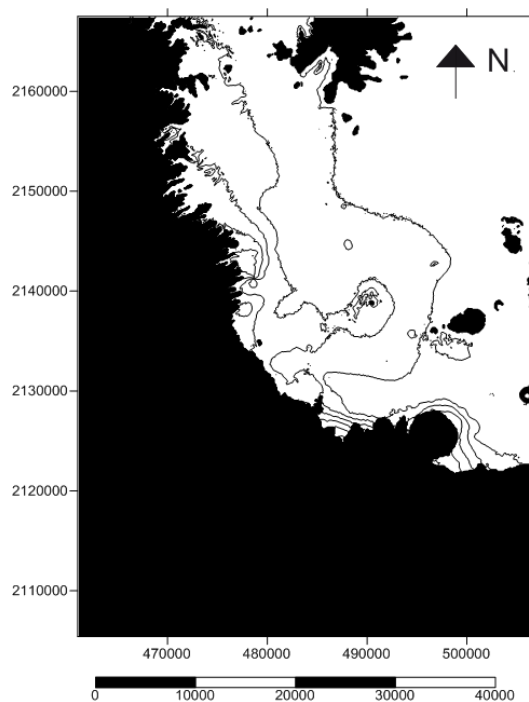
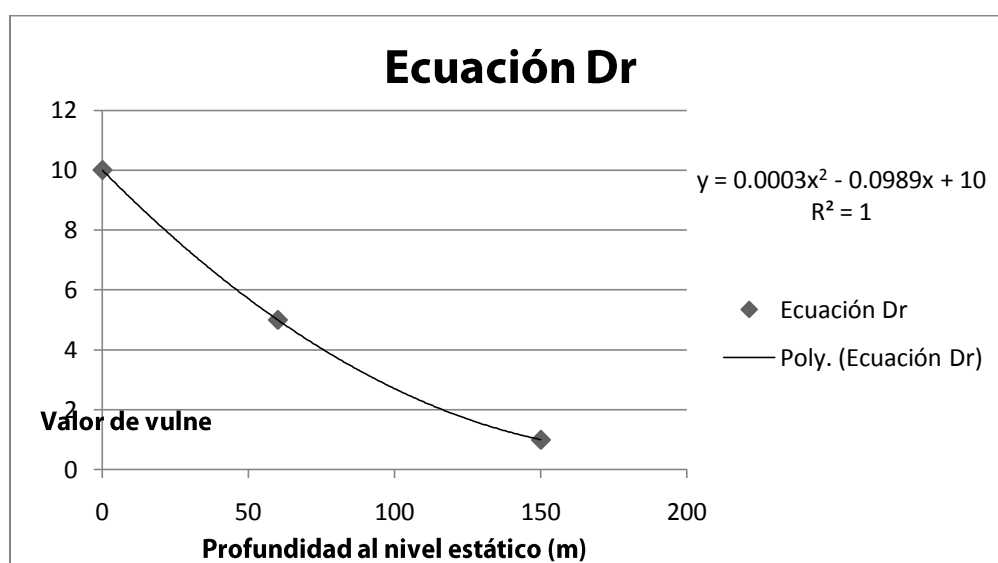


Figura 3.4 Delimitación del área de recarga.

Al tener delimitada el área de recarga se aplicó otra vez la operación *Grid|Math, IF A>2410,0,1* sobre el *grid* del DEM para asignar el valor de 150 al área de recarga y de 0 al resto. Al tener asignados los valores de esta manera se pudo sumar el *grid* que contenía

la piezometría con el del área de recarga y obtener valores para toda el área de la Ciudad. Esta operación se realizó con *GridMath*, A+B (A=área de recarga, B= piezometría del 2010).

Al tener valores para toda el área se pudo aplicar la función (Ec. 5) $y = 0.0003x^2 - 0.0989x + 10.0$ en la operación *GridMath* para generar el mapa de clases (Dr). Esta ecuación proviene del ajuste de los valores medio y extremos de la ponderación de DRASTIC para este parámetro (Gráfica 3.1).



Gráfica 3.1 Ecuación de ajuste para la profundidad al nivel estático.

3.3 R (Recarga)

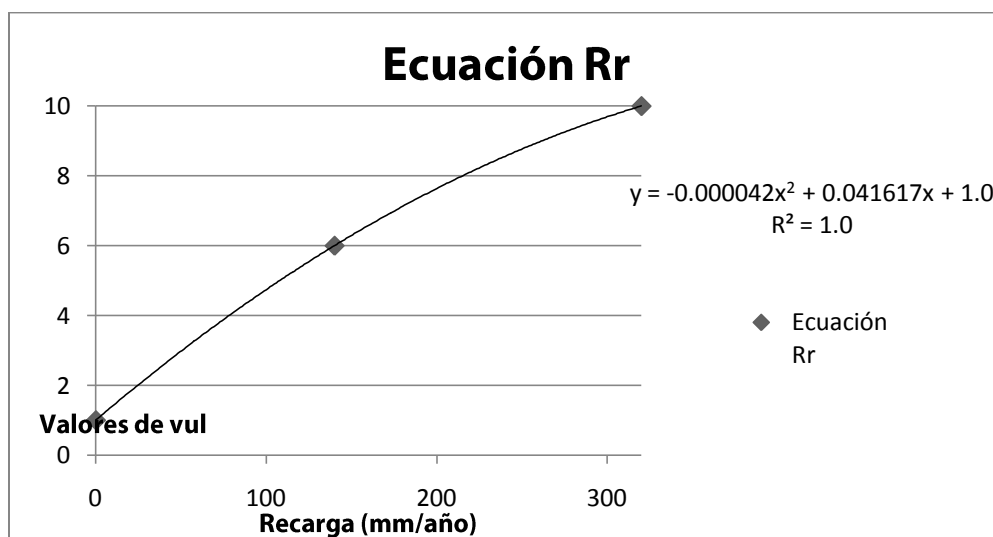
La recarga neta es el promedio anual del agua de lluvia que llega a infiltrarse a un acuífero desde la superficie incluyendo la infiltración anual promedio, en la 3.3 se observan los valores de vulnerabilidad originalmente propuestos por Aller et al. (1987).

La recarga neta fue estimada a partir de datos climatológicos de 2009 obtenidos de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional mediante un balance diario según la metodología establecida por Carrera-Hernández (2008). El mapa de

recarga utilizado en esta tesis fue creado por el Doctor Jaime Carrera Hernández en contribución al proyecto del que se desprende esta tesis. Existen algunas áreas al sur de la Ciudad para las cuales no existen valores ya que no están contempladas en la metodología utilizada. A partir de los valores de se determina el valor de vulnerabilidad relativa al aplicar la función (Ec. 6) mostrada en la Gráfica 3.2.

Recarga neta	
Intervalo (mm)	Clase
0 – 50	1
50 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Tabla 3.3 Valores para el factor de recarga neta.



Grafica 3.2 Ecuación de ajuste para la recarga.

3.4 A (Medio acuífero)

En este parámetro se evalúa el potencial de transporte de un contaminante una vez que alcanza el medio geológico en el que se encuentra emplazado el acuífero.

Para el cálculo de la variable se tomó como base la descripción litológica de más de 350 pozos de la Ciudad de México (SACM, 2005), proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Las diferentes litologías están evaluadas de acuerdo a los valores propuestos por Aller et al. (1987) y estos ajustados dependiendo de la proporción que se presente de litologías base como arenas, arcillas, gravas y basaltos y según las características litológicas, el grado de compactación y la granulometría del material encontrado en el acuífero de Ciudad de México (Tabla 3.4). En cada uno de los pozos se ubicó la profundidad del nivel estático de 2010 para identificar la litología correspondiente al nivel de saturación y se le asignó el valor ponderado.

Material del acuífero			
Material original	Clase	Material en el área de estudio	Clase
Lutita masiva	1-3	Arcilla	1
Ignea/metamórfica	2-5	Andesita	2
Ignea/metamórfica alterada	3-5	Margas	2
Till glacial	4-6	Arcilla/Limo	3
Arenisca estratificada, caliza, lutitas	5-9	Ceniza volcánica	3
Arenisca masiva	4-9	Arcilla/Arena	4
Caliza masiva	4-9	Caliza	4
Arena y grava	4-9	Conglomerado	4
Basaltos	2-10	Toba	4
Caliza cárstica	9-10	Aglomerado	5
		Arena	5
		Basalto	5
		Basalto/Escoria	6
		Arena/Grava	7
		Escoria	7
		Escoria/Piroclasto	7
		Grava	9

Tabla 3.4 Valores de Ar para las distintas litologías, Modificado de Aller et al. (1987).

Posteriormente se realizó una interpolación en ArcGIS (ESRI, 2009) con los valores obtenidos aplicando un criterio de discriminación con el cual se descartaron los pozos que se encontraran a más de 500 metros de la ubicación de la que se reporta el corte litológico.

3.5 S (Suelos)

El parámetro de suelo toma en cuenta los materiales que predominan en la superficie de la región de estudio. El material original es con el que se desarrolló la metodología DRASTIC y el material en el área de estudio es la adaptación de estos materiales a los encontrados en el Distrito Federal (Tabla 3.5).

El parámetro S se calcula con base en los distintos tipos de suelo que existen en la Ciudad de México. Con ayuda de la cartografía edafológica disponible (INEGI, 2007) se determinó la distribución espacial de los diferentes tipos de suelo en el área de estudio. Los suelos presentes son los siguientes: Cambisol (B), Gleysol (Gsn), Phaeozems (H/HS), Litosol (I), Fluvisol (J), Luvisol (L), Histosol (O/OsN), Regosol (R), Andosol (T), Vertisol (V) y Solonchak (Z).

La descripción de los tipos de suelos se complementó con la clasificación del sistema FAO-UNESCO (*Food and Agriculture Organization*, 1974), la clasificación hecha por INEGI en las “Guías para la interpretación de Cartografía – Edafología (2007)”. Estas unidades se describen a continuación:

Andosol (T)

Los Andosoles son suelos altamente porosos, de colores oscuros típicos de paisajes volcánicos. Se desarrollan a partir de material de origen volcánico como depósitos de ceniza, tobas, depósitos pumíticos u otro material rico en silicatos.

Estos suelos tienen una estructura en forma granular y bloques subangulares, son ricos en materia orgánica y aluminio. El fósforo presente se encuentra como fosfato inorgánico, siendo esencialmente insoluble y no se encuentra disponible para las plantas. Estos suelos poseen una gran capacidad de retención de humedad y una elevada susceptibilidad a erosionarse.

Cambisol (B)

Definidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) como Inceptisoles, los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente, son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima, excepto en zonas áridas. El material parental, generalmente planicies aluviales, coluviales y/o depósitos eólicos con granulometría de fina a media, se transforma considerablemente, formando estructuras y decoloración, incrementando ligeramente el porcentaje de arcillas y la remoción de los carbonatos. También se caracterizan por presentar meteorización ligera a moderada y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla, carbonato de calcio, hierro o magnesio.

Fluvisol (J)

Se correlacionan con los Fluventes y Fluvacuentes descritos por el USDA. Un Fluvisol es un suelo genéticamente joven (poco desarrollado) formado en depósitos aluviales. Además de presentarse en zonas influenciadas por ríos, también se pueden encontrar en valles y marismas costeras. Técnicamente estos suelos están definidos por un desarrollo insipiente o incluso inexistencia de un horizonte superficial y el material parental derivado de ríos, lagos o sedimentos marinos depositados por intervalos regulares o en el pasado reciente. Estos suelos exhiben un perfil estratificado que refleja la historia de depósito. El contenido de minerales y materia orgánica disminuyen conforme la profundidad aumenta.

Gleysol (Gsn)

Del ruso *Gley*, masa lodosa. Están relacionados con los Entisoles e Inceptsoles según el USDA *Soil Taxonomy*. Son suelos que presentan un exceso de humedad y que, a menos que sean drenados, se encuentran saturados permanentemente debido al mal drenaje desarrollando un característico patrón de color gléyico (esencialmente formado por colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en las capas superficiales). El material parental corresponde a un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno con mineralogía básica a ácida. Se forman en áreas deprimidas y posiciones bajas del terreno con niveles someros de agua subterránea. La prolongada saturación de agua y la falta de oxígeno producen una evidencia visual de la reducción del hierro, por lo que son poco aptos para el desarrollo de raíces y el crecimiento de plantas,

Histosol (O/OsN)

Mejor conocidos como suelos de pantano o suelos orgánicos, los Histosoles técnicamente están caracterizados como suelos de baja densidad, mal drenaje y con altas tasas de acumulación de materia orgánica en la parte superficial, formando una capa de hasta 80 cm, Esta materia orgánica puede o no estar mezclada con grandes cantidades de arena, limo o arcilla. Están confinados a cuencas y depresiones pobremente drenadas, pantanos y marismas con niveles de agua subterránea someros y áreas de tierras altas con una alta relación precipitación-evapotranspiración. Posee una elevada fertilidad, con el único inconveniente de su frecuente encharcamiento y subsecuente naturaleza anóxica.

Litosol (I)

Según la FAO los Litosoles forman parte de un grupo de suelos conocidos como Leptosoles, son suelos con una profundidad de perfil muy somera (aproximadamente 10 cm), indicando poca influencia de los procesos de formación de suelos. Se encuentran en áreas con condiciones topográficas de excesiva a moderada pendiente o con materiales geológicos relativamente recientes, ya sean roca o materiales no

consolidados con menos de 20 % de tierra fina. Debido a los continuos procesos de erosión por viento y agua y a la poca profundidad del suelo respecto a la ubicación de la roca madre o material parental los Leptosoles muestran poca o nula diferenciación de horizontes, característica de otros suelos como los Regosoles (FAO) o los Entisoles (USDA).

Luvisol (L)

Definidos como Alfisoles con arcillas de alta actividad según el USDA, los Luvisoles se caracterizan por el proceso de lavado o migración de arcillas que ocurre en las capas superiores y su acumulación en las capas inferiores formando un horizonte argílico. Tienen en la superficie la presencia de humus, sobreyaciendo la capa altamente lixiviada y desprovista de minerales arcillosos y minerales de hierro. Por debajo de estos horizontes, se encuentra la capa de acumulación de arcilla mezclada con altos niveles de iones de nutrientes disponibles como el Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio.

Phaeozems (H/HS)

Definidos como Udoles y Alboles por el USDA, son suelos porosos que presentan una capa superficial oscura (horizonte A mólico fino) seguida de un horizonte subsuperficial cámbico o árgico. Son ricos en materia orgánica y nutrientes, provienen de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), tills y otros.

Los Phaeozems tienen un alto contenido de iones de Calcio disponibles unidos a las partículas de suelo, resultando en una estructura muy permeable y bien agregada, son muy parecidos a los Chernozems y Kastañozems pero debido a sus características físico-químicas están más intensamente lixiviados.

Regosol (R)

Los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados, producto de un material parental poco consolidado, con granulometría de fina a media. Carecen de horizonte diagnóstico y el desarrollo del perfil es mínimo debido a la edad joven o a la

formación lenta del suelo. Son particularmente comunes en zonas áridas y regiones polares o desérticas. Tienen una nula capacidad de retención de agua debido al drenaje interno excesivo.

Solonchak (Z)

Similar a los Andisoles según la clasificación del USDA, los Solonchaks están definidos por una alta acumulación de sal soluble en los primeros 30 cm de profundidad del perfil. Son formados a partir de material parental salino bajo condiciones de extrema evaporación, presentan hidromorfismo (Solonchak gléyico), manifestado por cierta reducción del hierro y la formación de un patrón de moteaduras o manchas al quedar en contacto con el aire, poseen además aproximadamente un 15% de saturación de sodio y algunos tienen en la superficie una capa arcillosa que sufre rupturas en forma de placas poligonales cuando se encuentra seca, propiciando que en ellos crezca vegetación de manglar y halófitas, inhabilitándolos para el desarrollo de actividades agrícolas.

Tipo de suelos				
Material original	Clase	Material en el área de estudio	Clasificación	Clase
Arcillas no agregadas y material no compacto	1	Andosol (T)	Arcillas no agregadas	1
Arcilla margosa	3	Luvisol (L)	Arcillas no agregadas	1
Limo margoso	4	Solonchak (Z)	Arcillas no agregadas	1
Marga	5	Gleysol (Gsn)	Arcillas no agregadas	1
Arenisca margosa	6	Histosol (O/OsN)	Arcillas no agregadas	1
Agregado arcilloso o comprimido	7	Vertisol (V)	Agregado arcilloso o comprimido	7
Arena	9	Phaeozem (H/HS)	Arenas	9
Fino o ausente	10	Fluvisol (J)	Arenas	9
Grava	10	Cambisol (B)	Grava	10
		Litosol (I)	Fino o ausente	10
		Regosol (R)	Fino o ausente	10

Tabla 3.5 Valores de vulnerabilidad relativa para cada tipo de suelo presente en el área de estudio.

Vertisol (V)

Los Vertisoles están caracterizados por tener aproximadamente un 30% de arcilla expansiva (principalmente montmorillonita) en los primeros 50 cm del perfil. Por esta razón, en épocas de secas se generan grietas de magnitud considerable que permiten una gran mezcla de materiales de diferentes horizontes formando así una unidad pedológica relativamente profunda y uniforme.

Estos suelos se forman a partir de rocas básicas como el basalto, en general son suelos oscuros con capas bien definidas de carbonato de calcio o yeso. Contienen altos niveles de nutrientes, sin embargo, debido al gran contenido de arcillas no son los mejores suelos para cultivar.

De acuerdo con la descripción de la FAO, de INEGI y los criterios de clasificación de la metodología DRASTIC se definieron valores de vulnerabilidad relativa para cada tipo de cobertura edáfica según se indica en la Tabla 3.5. El valor de 1 corresponde al tipo de suelo con menor vulnerabilidad, debido a la composición textural, en donde la presencia de arcillas es un factor que influye en la velocidad de transmisión de fluidos a través de los horizontes del suelo. De esta manera, el valor de 10 representa el material más vulnerable.

3.6 T (Topografía)

La variación que hay en la pendiente topográfica es un factor que determina la extensión de la escorrentía y el asentamiento de un contaminante que influye en su asentamiento para que se infiltre. En la Tabla 3.6 se observan los valores asignados por Aller et al. (1987) para la evaluación de este parámetro.

Para el cálculo de este parámetro se utilizan los Modelos Digitales de Elevación (DEM) que constituyen una representación digital de los valores de elevación de la superficie de la Tierra en intervalos horizontales espaciados regularmente. Estos modelos

representan, en un arreglo reticular, el valor aproximado de la elevación del terreno por lo que la resolución espacial del DEM es muy importante dependiendo de los fines para los cuales se pretenda utilizar la información. Mientras menor sea el tamaño de la celda de la retícula del DEM se considera que se tiene una mayor resolución espacial. Para este trabajo se utilizó una resolución de 90x90 m ya que algunos parámetros cuentan con muy pocos valores para realizar las configuraciones y con esta resolución se obtienen buenas configuraciones a pesar de la escasez de valores.

Topografía (pendiente %)	
Intervalo	Clase
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

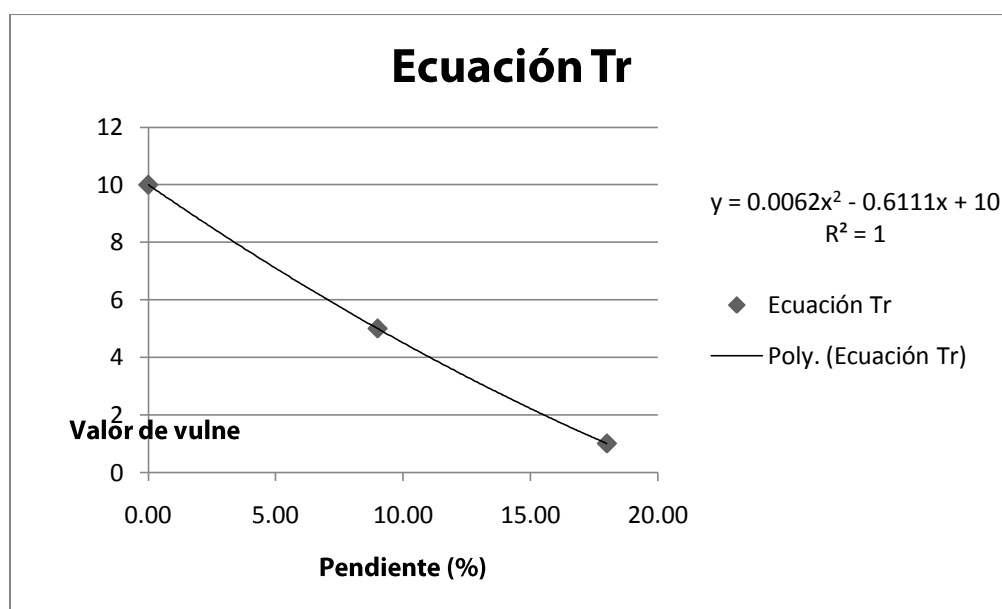
Tabla 3.6 Valores para el factor de topografía.

El DEM utilizado en este trabajo fue el modelo ASTER de la NASA (LP DAAC, 2006). En un principio se había comenzado a trabajar con el modelo de INEGI, pero presenta la limitante de que la unión entre mosaicos no es uniforme y hay variaciones notables en las alturas que reporta el modelo. Por esta razón se utilizó el modelo que proporciona la NASA que tiene una muy buena continuidad en las alturas y buena definición de píxeles.

El cálculo de la vulnerabilidad comienza exportando de Global Mapper (Global Mapper Software LLC, 2010) el archivo del DEM del área de estudio con el comando "Export RASTER and Elevation Data" en el formato Surfer Grid (Binary v7 Format), en metros con un *Sample spacing* de 90 x 90. En SURFER (Golden Software, 2011) se abre el archivo exportado como un image map, después se utiliza el comando *Grid|Calculus* para seleccionar este *grid*, después *Slope|Terrain Modeling|Terrain Slope* para generar un *grid* con el cálculo de la pendiente en grados. Utilizando *Grid|Math* se cambia de grados a

radianes el *grid* de la pendiente con la ecuación $C = ((A*3.1416)/180)$, después con *GridMath* se cambia de radianes a porcentaje con la ecuación $C=TAN(A)*100$.

Para este parámetro también se requirió generar una ecuación de ajuste para obtener valores continuos. En este caso se obtuvo una recta con la ecuación (Ec. 7) $y = 0.0062x^2 - 0.6111x + 10$ - $0.6111x + 10$ (Gráfica 2.3).



Gráfica 3.3 Ecuación de ajuste para la topografía.

Para que la ecuación pueda aplicarse correctamente se requiere fijar en 18 todos los valores de pendiente mayores a este valor, ya que cualquier pendiente mayor a 18% posee el mismo valor de vulnerabilidad. Esta discriminación de valores se realiza con la operación *GridMath* con la condición $IF A>18,18,A$.

Una vez teniendo todos los valores en el rango de 0% a 18% se aplica la función de clase obtenida ($y = 0.0062x^2 - 0.6111x + 10$) con el comando *GridMath* para obtener el mapa de vulnerabilidad relativa Tr que presenta valores que van de 1 a 10, siendo los más bajos los de menor vulnerabilidad.

3.7 I (Impacto a la Zona Vadosa)

Los valores asignados a este parámetro fueron modificados de Aller et al. (1987) para ajustarse a la litología que se encuentra en la Cuenca de México. El ajuste se realizó con base en la permeabilidad empírica que presenta cada roca ya que en este parámetro se cuantifica la potencial infiltración (advectiva) de un contaminante a través de un paquete de roca. Se tomaron en cuenta algunas litologías base como las arenas, arcillas, basaltos y gravas y con estas se ajustaron las demás litologías dependiendo de la proporción en la que estas litologías principales se presentan (Tabla 3.7).

Material de la zona vadosa			
Material	Clase	Material en el área de estudio	Clase
Capa confinante	1	Arcilla	2
Limo/arcilla	2-6	Arcilla/Limo	3
Lutita	2-5	Ceniza volcánica	3
Caliza	2-7	Margas	3
Arenisca	4-8	Andesita	4
Caliza estratificada, arenisca, lutita	4-8	Arcilla/Arena	4
Arena, grava con limo, arcilla	4-8	Caliza	5
Ignea/metamórfica	2-8	Toba	5
Arena y grava	6-9	Arena	6
Basalto	2-10	Basalto	6
Caliza cárstica	8-10	Conglomerado	6
		Basalto/Escoria	7
		Aglomerado	8
		Arena/Grava	8
		Escoria	8
		Escoria/Piroclasto	8
		Grava	9

Tabla 3.7 Valores para el factor de impacto a la zona vadosa, modificado de Aller et al. (1987).

La información litológica se tomó de los cortes litológicos que existen de la Ciudad, proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 2005). Una vez identificada la profundidad del nivel estático en cada uno de estos cortes se realiza una

ponderación del porcentaje que representa el espesor de cada una de las diferentes unidades con respecto a la profundidad total de la superficie hasta la profundidad del nivel estático (PNE).

De esta ponderación se obtuvo un valor único para ese pozo con el que se realizó una interpolación para evaluar la vulnerabilidad. Se utilizó un criterio de discriminación con el que se descartaron los pozos que se encontraran a más de 500 metros de la ubicación de la que se reporta el corte litológico. Los datos utilizables fueron interpolados en ArcGIS (ESRI, 2009) con el método *Inverse distance weighting* (IDW) con un tamaño de pixel de 270x270 m. El método IDW se basa en que la influencia relativa entre un punto y otro disminuye conforme aumenta la distancia entre los puntos a interpolar y el punto a crear (Chapra, S.C. et al., 2007).

3.8 C (Conductividad hidráulica)

Con este factor se mide la tasa de movimiento del agua subterránea dentro del acuífero, lo que afecta la velocidad a la cual se puede desplazar un contaminante en la Tabla 3.8 se observan los valores propuestos por Aller et al. (1987) para determinar la vulnerabilidad de la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m/d)	
Intervalo	Clase
0.040746 – 4.0746	1
4.0746 – 12.2238	2
12.2238 – 28.522	4
28.522 – 40.746	6
40.746 – 81.492	8
>81.492	10

Tabla 3.8 Valores para el factor de conductividad hidráulica.

Para obtener el parámetro de la conductividad hidráulica (K) del acuífero de la Ciudad de México se realizaron cinco distintas interpretaciones de los datos existentes:

1) Valores de K reportados por SACM (2005)

El primer paso consistió en la recopilación de los 44 valores de transmisividad mostrados en la Tabla 5.1. A primera vista destacan 13 valores muy bajos y 3 muy altos. Estos últimos son considerados como valores extremos de velocidad de infiltración.

2) Valores de K por el método de Rushton, FI

Se reinterpretaron 23 pruebas de bombeo de las 55 compiladas de SACM (2005) con el método de Rushton (1988). Este método considera el flujo radial hacia el pozo con componentes verticales. La representación del flujo hacia la zona del pozo de bombeo se realiza mediante una malla regular radial, donde los intervalos desde el centro del mismo hasta la frontera lateral se incrementan logarítmicamente.

La aplicación de este método se realizó con la ayuda del software *Visual-Two Zone Model* (Hernández, N. L., 2008). En el software se ingresa la información de la prueba de bombeo así como el modelo conceptual generado a partir del corte litológico del pozo de bombeo y con ellos se calcula una curva teórica. Posteriormente se ingresan los datos de Tiempo-Abatimiento que representan la curva de campo, esta curva debe calibrarse con análisis de sensibilidad hasta que se logra ajustar a la curva teórica, de esta forma se determinan los valores de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica saturada K, coeficiente de almacenamiento específico Ss, rendimiento específico Sy).

3) Valores de K reportados por Vázquez (1987)

Vázquez (1987) reinterpretó 31 pruebas de bombeo de las 55 recopiladas de SACM (2005).

4) Valores de K interpretados por métodos convencionales, reportados por Vázquez (1987).

29 pruebas de bombeo compiladas del SACM (2005) fueron reinterpretadas por Vázquez S. (1987), con métodos estándar (Cooper & Jacob, 1946; Hantush, 1964; Theis 1935; Boulton & Streltsova, 1978; Boulton, 1954; Neuman, 1974; Walton, 1962); Los valores obtenidos por métodos convencionales son más bajos que obtenidos por métodos numéricos, como se puede observar en la Tabla 5.1.

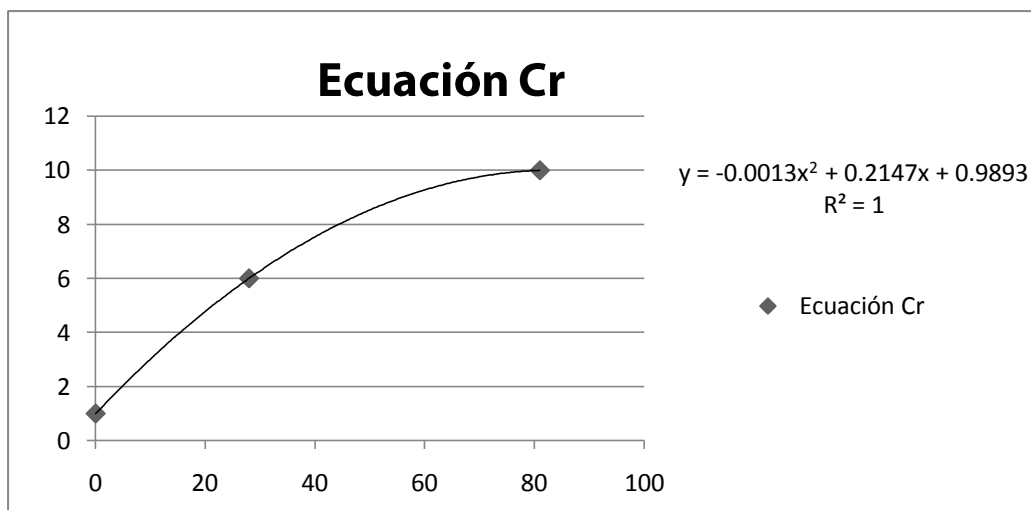
5) Valores de K de la Facultad de Ingeniería utilizando espesores saturados del año 1993 y 2010

Utilizando los valores de transmisividad de SACM (2005) y los datos de espesores de acuífero de 41 pozos se calcularon los 27 valores de K que se muestran en la Tabla 5.1. En 28 pozos no se tuvo información de la posición del nivel estático.

Con los datos del espesor saturado del acuífero para 2010, obtenidos de 34 pozos de SACM y con la información de transmisividad de 11 pruebas de bombeo de Vázquez (1987) y 3 de SACM se obtuvieron 48 valores de K que se muestran en la Tabla 5.1. Con la información de SACM de 21 pozos no pudo fijarse la profundidad al nivel estático.

A los valores de k obtenidos por los distintos métodos se les aplicó la Ecuación 8:

$y = -0.0013x^2 + 0.2147x + 0.9893$ (Gráfica 3.4) para generar datos continuos y crear el mapa de vulnerabilidad del parámetro C.



Gráfica 3.4 Ecuación de ajuste para la conductividad hidráulica.