

Entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea¹

Ernesto Soto Galera^{*}
Marisa Mazari Hiriart^{*}
Luis Antonio Bojórquez Tapia^{*}

Recibido: 1 de diciembre de 1999
Aceptado en versión final: 28 de marzo de 2000

Resumen. El 70% del agua que se utiliza en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) destinado al uso doméstico, industrial y agrícola, proviene de los sistemas de acuíferos de la Cuenca de México, por lo que es importante conocer las fuentes de contaminación que pueden influir en la calidad del recurso. En este estudio se realiza un análisis espacial, a nivel de delegación y municipio, de las principales fuentes contaminantes del agua subterránea, con el objeto de identificar zonas propensas a la contaminación. Se tomaron como fuentes contaminantes la industria, los confinamientos de residuos sólidos, los depósitos de combustible, el sistema de drenaje, las gasolineras, los pozos de extracción y la zona urbanizada. La distribución de las fuentes contaminantes, aunada a las zonas geológicas principales que subyacen a la ciudad, permitió determinar que el centro de la ZMCM presentaba la mayor concentración de fuentes contaminantes, mientras que la mayor propensión a la contaminación para el sistema de acuíferos se encontró hacia el sur-poniente y norte de la ZMCM.

Palabras clave: Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), fuentes contaminantes, agua subterránea, análisis espacial.

Entities of the Mexico City Metropolitan Area prone to suffer ground water pollution

Abstract. Since seventy percent of the water for domestic, industrial and agricultural use in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) derives from aquifer systems located within the Basin of Mexico, it is important to determine the sources of pollutants that may affect water quality. A spatial analysis of the main sources of groundwater pollution was carried out at a municipal and delegation levels, to identify areas prone to contamination. Industries, landfills, fuel storage facilities, drainage systems, gas stations, extraction wells and the urban zone were considered as sources of pollutants. The combination of data on the distribution of sources of pollutants with information regarding the main geological areas underlying the city allowed to determine that most sources of pollutants concentrated at the center of the MCMA, while the highest risk of pollution for the aquifer system was located to the south-west and north of the MCMA.

Key words: Mexico City Metropolitan Area, sources of pollutants, groundwater, spatial analysis.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es la principal fuente de abastecimiento para uso doméstico e industrial. En el pasado, el agua subterránea se consideró como un recurso protegido de forma natural de las distintas fuentes de contaminantes. Sin embargo, en años recientes y en diversos países, se han reportado problemas de contaminación en acuíferos.

En particular, la contaminación de acuíferos por compuestos orgánicos ha sido estudiada en Estados Unidos, Canadá y Europa, debido a su persistencia y toxicidad (Westrick, 1990; Alley, 1993; Pankow y Cherry, 1996). En Alemania, Gran Bretaña, Italia y Holanda, a partir de la década de los años ochenta, el estudio de esta contaminación ha sido un tema prioritario, desde el punto de vista ambiental (Cavallaro *et al.*, 1985; Schwille, 1988; Rivett *et al.*, 1990).

^{*} Instituto de Ecología, UNAM, Cd. Universitaria, 3er. Circuito Exterior, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: eso-to@www.imp.mx; mazari@servidor.unam.mx; supremo@df1.telmex.net.mx

Entre los diversos compuestos orgánicos sintéticos encontrados en agua subterránea, los más comunes son los disolventes industriales y los hidrocarburos aromáticos derivados del petróleo (Mackay *et al.*, 1985; Mackay y Cherry, 1989). Estos compuestos producen efectos adversos en la salud, como son depresión del sistema nervioso central y disfunción de hígado y riñón; además, algunos de éstos son cancerígenos (Verschueren, 1983; Sitting, 1985; Sax y Lewis, 1989).

La ZMCM es representativa como estudio de caso de la contaminación del agua subterránea, debido a los indicios de compuestos orgánicos encontrados en ella, así como por su alta densidad poblacional e industrial.

El suministro de agua a la ZMCM ha sido afectado por la explotación de las fuentes de abastecimiento y por el deterioro de la calidad del recurso (Durazo, 1996). En la ZMCM se utilizan en la actualidad 67 m^3 de agua por segundo; de este gasto, alrededor de 70% proviene del sistema de acuíferos de la Cuenca de México (Ezcurra y Mazari-Hiriart, 1996; INEGI, 1999; Merino, en prensa).

Las principales fuentes de contaminación de agua subterránea en la ZMCM son la industria, los confinamientos de residuos sólidos, los depósitos de combustible, el drenaje primario, el drenaje profundo, las gasolinerías, la zona urbanizada y los pozos de extracción (Mazari y Mackay, 1993; Consejo Nacional de Investigación, 1995; Ezcurra y Mazari-Hiriart, 1996; Durazo, 1996; Pick y Butler, 1997). Estos últimos juegan un papel importante en el flujo local de agua subterránea, y en el caso de pozos cancelados y no sellados representan vías directas para la introducción de contaminantes al acuífero (Mazari y Mackay, 1993).

El estudio integral de la contaminación de agua subterránea y los planes de manejo del recurso son complicados, debido a que la información que se ha generado de las fuentes contaminantes de agua subterránea en la ZMCM es escasa o de difícil acceso y la mayor parte presenta deficiencias en sus características geográficas.

El objetivo de este artículo es identificar las entidades políticas propensas a la contaminación de agua subterránea por compuestos orgánicos en la ZMCM, a través del análisis de la distribución espacial de las principales fuentes contaminantes, utilizando métodos de análisis espacial y de clasificación numérica.

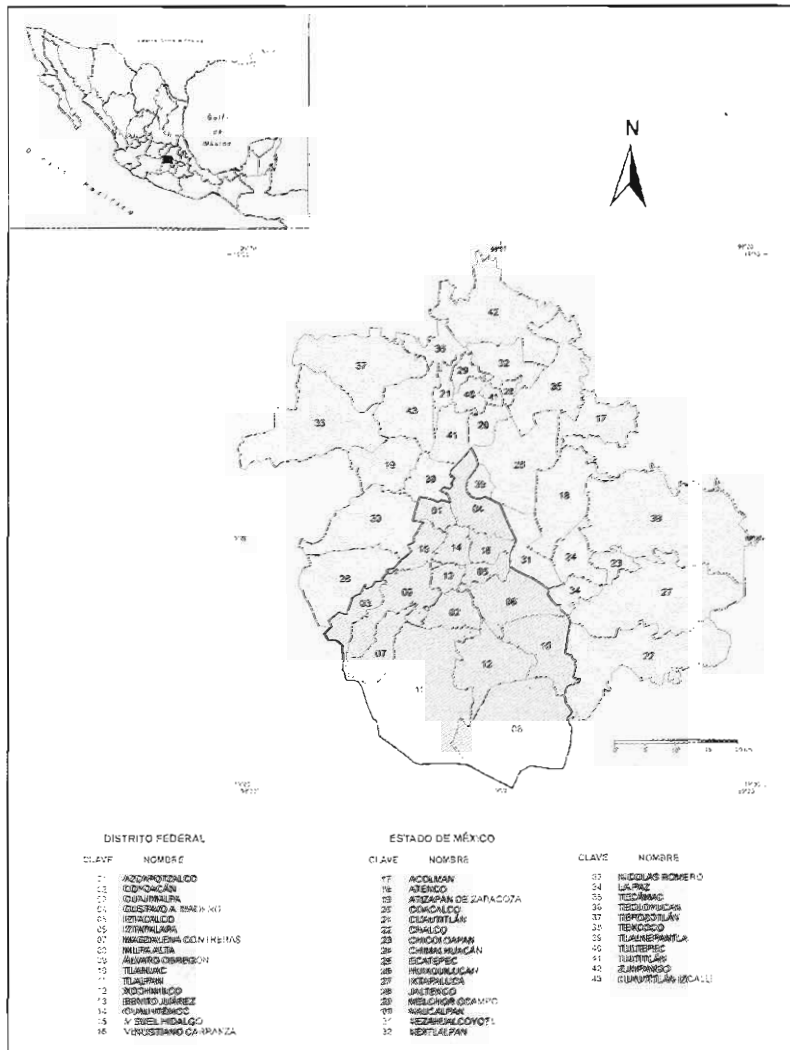
ZONA EN ESTUDIO

La ZMCM está formada por 43 entidades políticas, correspondientes a 16 delegaciones pertenecientes al Distrito Federal (D.F.) y 27 municipios del Estado de México (INEGI, 1993; Figura 1).

En la ZMCM se distinguen tres zonas geológicas: la lacustre, la de transición y la de lomas (DDF, 1988). La zona lacustre se caracteriza por espesores de más de 30 m de arcillas blandas de alta compresibilidad; está constituida por estratos arcillosos alternados con suelos de disecación; comprende también capas de ceniza y pómez. La zona de transición forma una franja que divide a los suelos lacustres de las partes bajas de las lomas; consiste de suelos y arenas aluviales con algunas capas de gravas fluviales en la desembocadura de las barrancas; el conjunto contiene intercalaciones de sedimentos de playas y turbas a orillas del lago. Finalmente, la zona de lomas está constituida por la Formación Tarango; consiste principalmente de tobas, depósitos fluviales y flujos piroclásticos (lahares calientes y corrientes de lodo), originados por las erupciones de la Sierra de las Cruces. Esta masa volcánica limita la Cuenca al poniente. Al norte se encuentra la Sierra de Guadalupe, formada por conos y domos volcánicos antiguos. Al sur se eleva la Sierra del Chichinautzin, compuesta de fenobasaltos y cenizas. Y al oriente se encuentra la Sierra Nevada con sus extensos abanicos volcánicos (Formación Tarango). La conductividad hidráulica en la zona lacustre es de 10^{-8} a 10^{-10} cm/s, en contraste con las zonas de transición y lomas cuya conductividad hidráulica promedio es entre 10^{-3} y 10^{-5} cm/s (Marsal y Mazari, 1969).

El sistema de acuíferos de la Cuenca de México, desde el punto de vista geológico, está formado por tres de ellos: el superior, el medio y el profundo, separados por dos elementos muy poco permeables, los depósitos lacustres del Plioceno y la formación del Balsas, y las margas y lutitas del Cretácico superior (Mooser, 1990). Desde el punto de vista geohidrológico, este sistema se divide en tres subsistemas: a) Ciudad de México, formado por materiales granulares de

permeabilidad media y baja, cuya recarga proviene principalmente de la Sierra de las Cruces y los alrededores de Tlalpan; b) Valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, que es recargado por infiltración de agua de lluvia en las estribaciones de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, y c) Lago de Texcoco, constituido por materiales de baja permeabilidad y cuya recarga proviene de la sierra ubicada al oriente de Chicoloapan de Juárez (DGCCH, 1987).



Fuente: INEGI, 1993.

Figura 1. Delegaciones y municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El sistema de acuíferos que se explota para el abastecimiento de agua a la ZMCM forma parte del acuífero superior en los tres subsistemas y los pozos de extracción se localizan principalmente entre los 80 y los 300 m de profundidad (Lesser y Cortés, 1998).

MÉTODO

La información de cada una de las fuentes contaminantes se recopiló de distintos informes gubernamentales (DGCOH, 1993 y 1996; INEGI, 1994; Riosvelasco, 1994; IMP, 1997; PEMEX, 1997). Se clasificó y analizó, para su incorporación a un sistema de información geográfica (SIG).

La información relativa a la geología, y a los límites delegacionales y municipales se obtuvo de las siguientes fuentes bibliográficas y cartográficas: Mooser (1974), Marsal y Mazari (1969), INEGI (1994) y DDF (1988). La carta del área urbanizada se generó a partir de la inter-pretación de dos imágenes LANDSAT 5 TM de la Ciudad de México de 1997 (Path/Row 026/046 y 026/047), por medio de un compuesto en falso color (bandas 4, 3 y 2). Los análisis espaciales se llevaron a cabo mediante un SIG con los programas ARC/INFO v.7.1.1 y ARC/VIEW v.3.0 (ESRI, 1997).

Las representaciones de las fuentes de contaminación y subsuelo se superpusieron a la carta de división política de la ZMCM. A través de operaciones cartográficas, dependiendo de la variable, se calculó la frecuencia, el porcentaje o la longitud en cada entidad. Las entidades se clasificaron en cuatro clases, que se obtuvieron de la proporción de una variable en cada entidad en relación con el valor máximo de la misma; así, las clases fueron: muy baja (de 0 a 25%), baja (de 26 a 50%), alta (de 51 a 75%) y muy alta (de 76 a 100%), con lo que se estimó la presencia de cada variable por entidad.

Para evaluar el grado de independencia de las nueve variables, se calculó el coeficiente de correlación (Sokal y Rohlf, 1995) entre pares de variables, para las fuentes de contami-

nación y el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso. Asimismo, se estimó la importancia de cada variable en cada entidad política, a partir de la desviación normalizada (d.n.) con respecto a su promedio (Sokal y Rohlf, 1995). De esta manera, se obtuvieron cuatro categorías de importancia: muy baja (d.n. $< -1\sigma$), baja ($-1\sigma \leq \text{d.n.} \leq \mu$), alta ($\mu < \text{d.n.} \leq 1\sigma$) y muy alta (d.n. $> 1\sigma$). La importancia de cada variable se transfirió al SIG, mediante la creación de "capas" nominales.

Finalmente, las entidades políticas se clasificaron de acuerdo con la importancia de las fuentes de contaminación y el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso (zona lacustre), mediante técnicas de clasificación numérica adaptadas al SIG. Se siguió el método de clasificación politético divisivo (Digby y Kempton, 1987; Noy-Meir, 1973; Pielou, 1984). La propensión a la contaminación de agua subterránea se obtuvo usando una tabla de decisión (Tabla 1).

Tabla 1. Propensión a la contaminación de agua subterránea de acuerdo con fuentes de contaminación y subsuelo arcilloso en la ZMCM; MB, riesgo muy bajo; B, riesgo bajo; A, riesgo alto y MA, riesgo muy alto

Importancia del subsuelo arcilloso:	Importancia de fuentes de contaminación			
	Muy Baja	Baja	Alta	Muy Alta
Muy Baja	A	A	MA	MA
Baja	B	B	A	MA
Alta	MB	B	A	A
Muy Alta	MB	MB	B	B

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la sobreposición de la información cartográfica representativa de diversas fuentes de contaminación y subsuelo a la carta de división política de la ZMCM, se obtuvo la ubicación por entidad de las distintas fuentes de contaminantes, registradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes contaminantes de agua subterránea y subsuelo arcilloso de la ZMCM

Entidad	Fuentes contaminantes y subsuelo									
	No	Industrias (Número)	Drenaje primario (km)	Drenaje profundo (km)	Depósitos de residuos (Número)	Depósitos de combustibles (Número)	Zona urbanizada (%)*	Gasolineras (Número)	Pozos (Número)	Arcillas (%)*
1	1	268	66.1	4.7	0	1	100	10	47	93
2	2	580	71.8	9.5	0	0	89	20	114	47
3	3	74	0.0	0.0	0	0	15	3	0	0
4	4	1 891	167.6	15.3	0	0	85	20	18	53
5	5	1 246	70.6	7.3	0	1	100	10	23	100
6	6	2 208	88.3	17.0	2	0	92	21	76	48
7	7	70	5.1	0.0	0	0	18	1	1	0
8	8	50	0.0	0.0	1	0	1	2	22	0
9	9	527	62.1	8.0	2	1	43	16	53	0
10	10	312	0.0	0.0	1	0	28	1	47	59
11	11	444	29.9	0.0	1	0	20	9	103	3
12	12	155	15.2	0.6	0	0	25	3	100	28
13	13	1 457	69.2	2.8	0	0	100	31	33	88
14	14	3 880	99.1	10.7	0	0	99	50	46	99
15	15	971	93.7	11.9	0	0	52	26	51	24
16	16	1 419	82.3	7.3	0	0	100	18	18	99
17	17	32	0.0	0.0	0	0	5	1	17	7
18	18	8	2.4	0.0	0	0	2	0	23	97
19	19	280	0.0	0.9	1	0	31	3	3	0
20	20	79	0.0	0.0	1	0	41	3	4	38
21	21	90	0.0	0.0	0	0	26	5	0	58
22	22	163	0.0	0.0	0	0	26	5	67	17
23	23	61	0.0	0.0	0	0	1	0	13	16
24	24	172	0.0	0.0	1	0	29	2	41	64
25	25	1 364	14.4	0.0	1	0	62	13	106	53
26	26	22	0.9	0.0	1	0	8	2	0	0
27	27	120	0.0	0.0	0	0	6	2	87	2
28	28	0	0.0	0.0	0	0	8	0	0	100
29	29	10	0.0	0.0	0	0	14	0	0	51
30	30	1 076	47.3	3.1	1	0	26	13	16	0
31	31	1 502	5.9	0.0	3	0	73	9	23	98
32	32	6	0.0	0.0	0	0	2	0	0	91
33	33	95	0.0	0.0	1	0	4	3	0	0
34	34	206	0.0	0.0	1	0	19	2	45	17
35	35	101	0.0	0.0	1	0	9	2	8	19
36	36	7	0.0	0.0	0	0	0	2	0	54
37	37	43	0.0	0.0	0	0	1	3	0	0
38	38	134	1.7	0.0	0	0	4	3	263	24
39	39	1 181	36.4	22.3	1	1	59	18	8	19
40	40	27	0.0	0.0	0	0	12	0	1	86
41	41	182	0.0	1.6	1	0	33	2	2	18
42	42	40	0.0	0.0	0	0	1	0	0	26
43	43	250	0.0	0.6	1	0	28	5	0	0

* Porcentaje del área total de cada entidad.

Fuente: Elaboración propia.

Industria

En la ZMCM se localizaron 23 803 industrias que utilizan compuestos orgánicos en algunos de sus procesos, las cuales se distribuyen principalmente en las delegaciones del norte del D. F. y en los municipios colindantes.

La delegación con el mayor número de industrias es la Cuauhtémoc; le siguen Iztapalapa y Gustavo A. Madero. En cambio, las delegaciones y municipios del sur, norte y este del área metropolitana, presentan menos

industrias. El único municipio en el que no se registró este tipo de industria fue Jaltenco (Figura 2a).

El mayor número de industrias se encuentra en las entidades centrales de la ZMCM, pero éstas son pequeñas industrias, principalmente dedicadas a la producción textil, impresión y producción de instrumentos metálicos, en contraste con la zona noreste de la ZMCM, donde se ubican grandes industrias que producen sustancias químicas, maquinaria y equipo (INEGI, 1994; Pick y Butler, 1997).

Drenaje

El drenaje primario en la ZMCM corre a lo largo de 1 030 km y el drenaje profundo cuenta con 121 km de longitud. La mayor parte se localiza en el D.F., siendo escaso en los municipios conurbados.

La red primaria de drenaje se encuentra distribuida principalmente en el norte del D. F. y los municipios de Tlalnepanitla y Naucalpan. La delegación con mayor longitud de red primaria es la Gustavo A. Madero, con 168 km, en la que se unen, además, varios de los sistemas de drenaje provenientes de diferentes áreas de la ciudad (Figura 2b).

En lo que se refiere al drenaje profundo, en el municipio de Tlalnepanitla éste se extiende en 22 km, mientras que las delegaciones Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo cuentan con 17, 15 y 12 km, respectivamente, siendo las que cuentan con mayor longitud de drenaje profundo (Figura 2c).

El drenaje de la ZMCM transporta el agua residual de zonas habitacionales, de servicios e industriales, por lo que se mezcla una gran variedad de contaminantes. Se estima que la ZMCM produce 44 m³ de aguas residuales por segundo y que más del 90% de los desechos líquidos industriales son descargados al drenaje sin previo tratamiento.

Lo anterior, aunado a las condiciones deficientes de las tuberías del sistema de drenaje, ya sea por una instalación incorrecta, por deterioro o rupturas, da lugar a fugas de agua residual hacia el suelo, lo que convierte a los drenajes en una fuente potencial de contaminación de agua subterránea. Esta situación es más seria en el caso del drenaje profundo, debido a que se encuentra a mayor profundidad y, por tanto, más cerca del acuífero; ciertos daños detectados en la red sugieren infiltraciones en sus áreas adyacentes (DGCOH, 1996; Consejo Nacional de Investigación, 1995).

Gasolineras

En la ZMCM existen 339 gasolineras, 71% se encuentran en el centro del D. F. La delegación Cuauhtémoc cuenta con el mayor número de ellas, 50; le siguen la Benito Juárez (31) y la Miguel Hidalgo (26; Figura 2d).

A partir de 1990 se inició el monitoreo de gasolineras, detectándose fugas en la mitad de las estaciones de servicio. A partir de entonces, se comenzó un programa para su modernización, a través del cual se logró la disminución del potencial contaminante (Consejo Nacional de Investigación, 1995). Es pertinente mencionar que en algunos de estos sitios se utiliza, además, una gran variedad de aceites y disolventes para el mantenimiento y limpieza de los automóviles, parte de los cuales se derraman al suelo y se descargan al drenaje.

Depósitos de residuos sólidos

En la ZMCM se localizan 22 grandes depósitos de residuos sólidos, que se ubican principalmente en la periferia del D. F. Actualmente, la disposición de los desechos sólidos se lleva a cabo en tres sitios: Bordo Poniente (Nezahualcóyotl), donde se recibe el 40% de los desechos generados en la Ciudad de México; Prados de la Montaña (Álvaro Obregón); y el tiradero de Santa Catarina (La Paz; Figura 2e). Si bien algunos de los confinamientos en el D. F. están clausurados, Riosvelasco (1994) reporta que algunos de éstos operan clandestinamente.

La mayoría de los confinamientos de la ZMCM no cuentan con las características de ingeniería requerida para su instalación como rellenos sanitarios, evidencia de ello es que han presentado problemas con lixiviados y gases (Martínez, 1991).

Estos sitios, utilizados para la disposición de residuos sólidos, son importantes fuentes contaminantes de agua subterránea, debido a la generación de lixiviados, cuya composición tanto química como biológica tiene características consideradas como nocivas a la

salud (Knox y Canter, 1996; Pankow y Cherry, 1996).

Depósitos de combustible

La ZMCM cuenta con cuatro grandes sitios de depósito de combustible propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX). En el D.F. se localizan tres, distribuidos en las delegaciones Azcapotzalco, Iztacalco y Álvaro Obregón, y el cuarto se ubica en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México (Figura 2f). En estos sitios de almacenamiento, PEMEX tiene 40 tanques de gasolina. Las capacidades de almacenamiento varían de 946 250 litros (250 000 galones) a 32 172 500 litros (8 500 000 galones) de gasolina por tanque. Se ha estimado que estos tanques presentan pérdidas promedio de hasta 2 000 000 de l/año (PEMEX, 1997).

Pozos de extracción de agua

Se han registrado 1 479 pozos de extracción de agua en la ZMCM (DGCOH, 1993). Éstos se localizan principalmente en la zona sur del D.F. y en los municipios del este de la zona metropolitana. En el D.F. se concentra el 51% de la totalidad de los pozos.

En el municipio de Texcoco se reporta el mayor número de pozos, seguido del municipio de Ecatepec. A nivel delegación, Coyoacán sobresale por el número registrado. La perforación de pozos más reciente se ha realizado en la zona oriente de la ZMCM (Figura 2g).

Como es sabido, la extracción del agua subterránea trae consigo la inducción por despresurización y, por tanto, un aporte de aguas de distinta calidad provenientes de la capa de arcillas por consolidación. En el caso de la ZMCM se presentan, además, hundimientos hasta de 10 m en sitios con suelos arcillosos, como se ha reportado en el Centro Histórico, ocasionados por la explotación de agua subterránea (Mazari *et al.*, 1992; Lesser y Cortés, 1998).

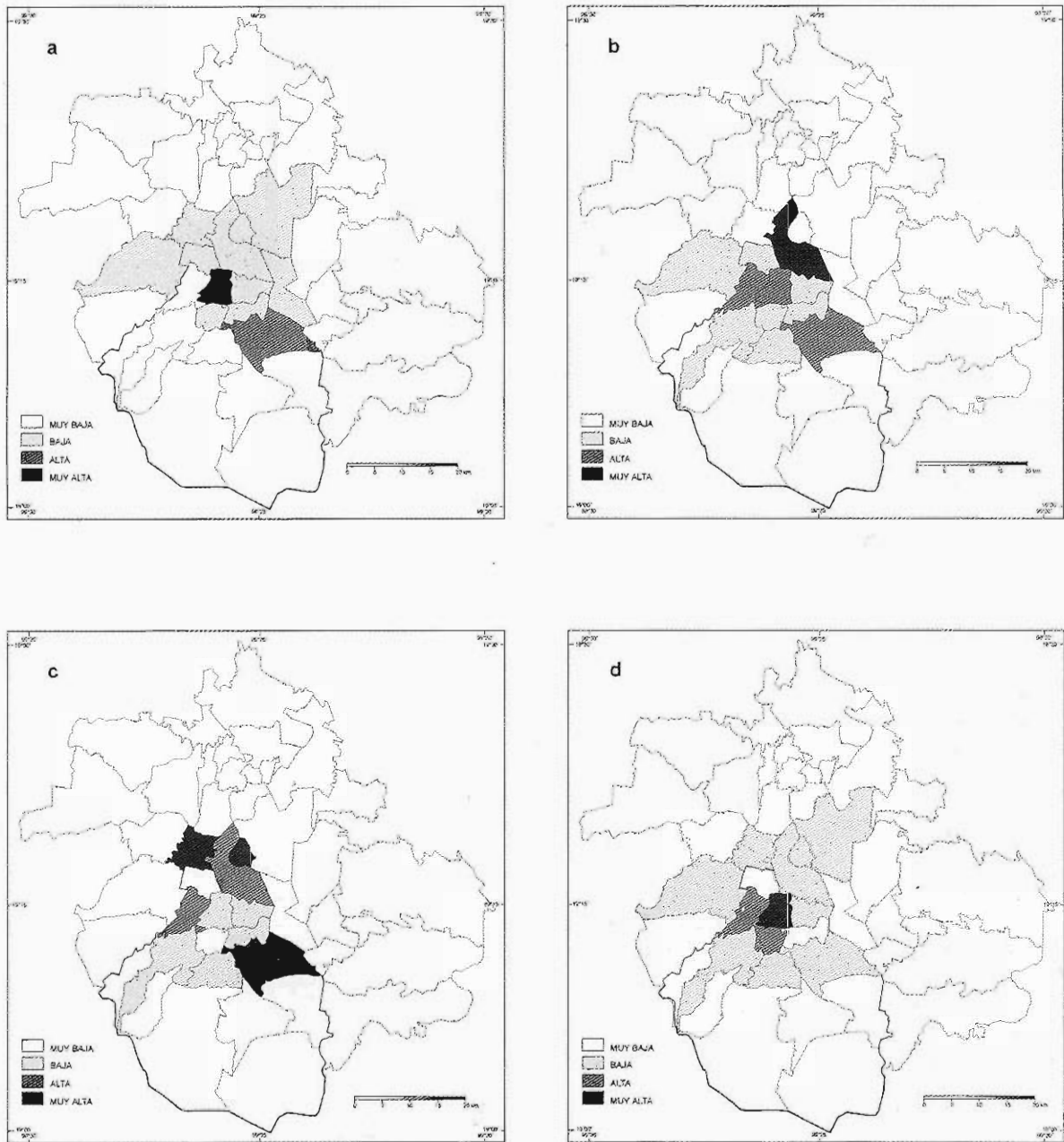
Zona urbanizada

La zona urbanizada de la Ciudad de México, que abarca 16 delegaciones del D.F. y 27 municipios del Estado de México, se extiende en un área de 1 153 km², esto es, tomando en cuenta la zona urbanizada y excluyendo las grandes áreas verdes, como parques recreativos, de lo que resulta un perímetro totalmente irregular. Las entidades centrales de la ZMCM se caracterizan por presentar de 70 a 100% de área urbanizada, porcentaje que disminuye en las entidades circundantes; cabe aclarar que en el municipio de Teoloyucan no fue posible determinar el área urbanizada por medio de las imágenes de satélite (Figura 2h).

El crecimiento del área urbana se ha orientado principalmente hacia el norte y este del D.F. en las tres últimas décadas. Este crecimiento ha afectado también a zonas consideradas de conservación ecológica, que tienen una función importante en la recarga natural del sistema de acuíferos de la ZMCM, como es el caso de zonas ubicadas en las delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón. Asimismo, existe una gama de actividades urbanas que generan compuestos químicos que pueden tener efectos negativos en la calidad del agua y que son difíciles de representar espacialmente, como son el vertimiento de aguas residuales, aceites, disolventes y plaguicidas, entre otros.

Zonas de baja permeabilidad (Zona lacustre)

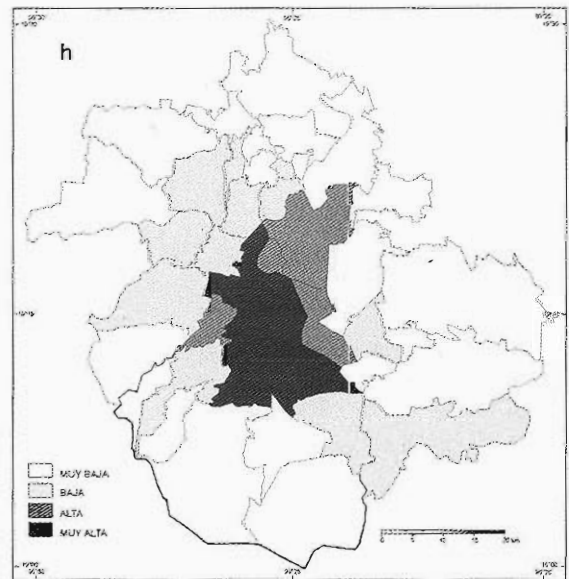
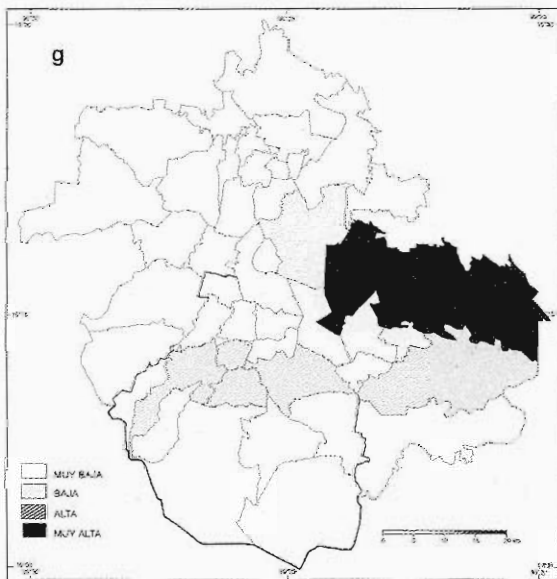
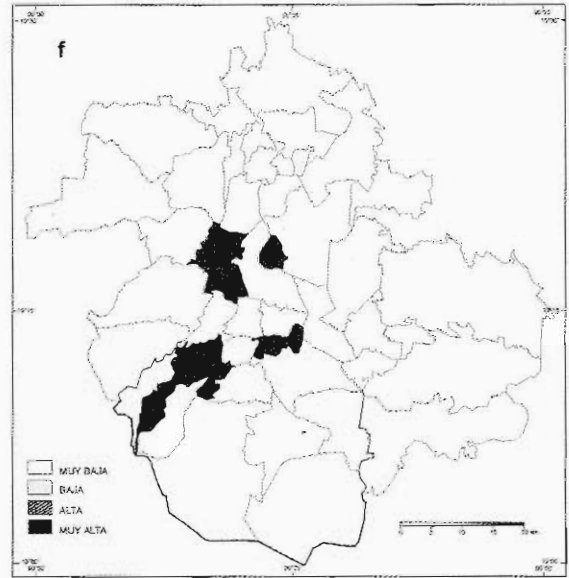
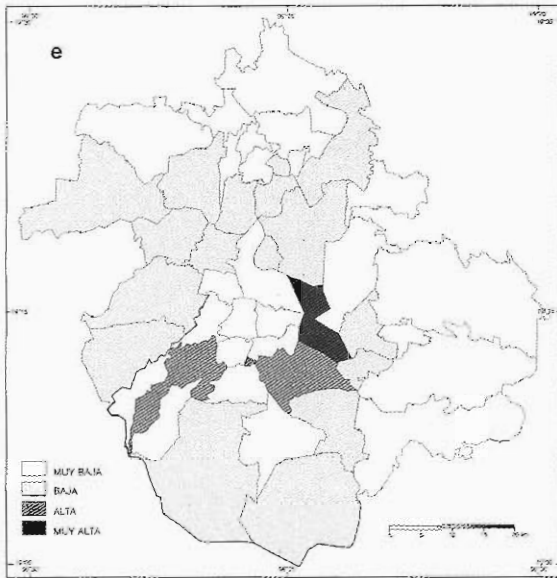
En las delegaciones Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Venustiano Carranza e Iztacalco, así como en los municipios de Nezahualcóyotl, Atenco, Tultepec, Jaltenco y Nextlalpan, la zona lacustre abarca más de 80% de su territorio (Figura 3). A estas zonas, el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso les confiere una posible protección para el transporte de contaminantes, debido a la baja permeabilidad.

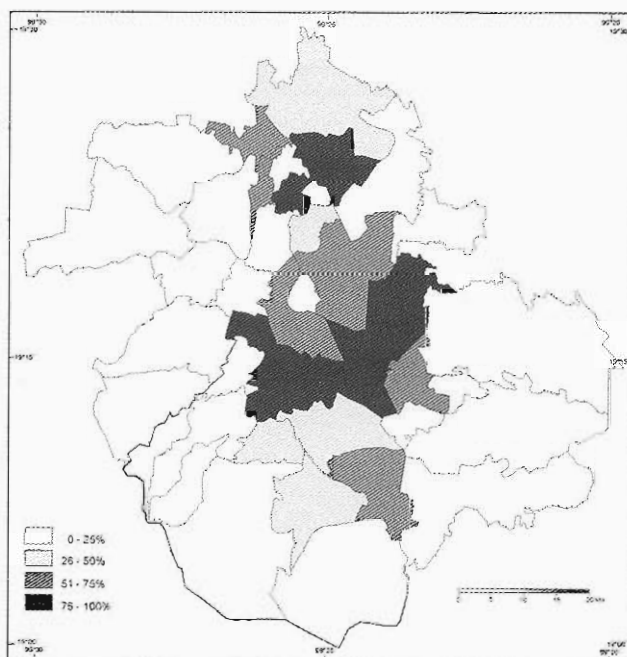


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Presencia de fuentes contaminantes de agua subterránea en la ZMCM: a. Industria, b. Drenaje primario, c. Drenaje profundo, D. Gasolineras, e. Confinamiento de residuos sólidos, f. Depósitos de combustibles, g. Pozos de extracción de agua, y h. Zona urbanizada.

continuación





Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Porcentaje de área ocupada por suelo arcilloso (zona lacustre) en la ZMCM .

Clasificación de entidades

El número de industrias, el drenaje primario, el porcentaje de zona urbanizada y el número de gasolineras presentaron una alta correlación entre sí ($r > 0.7$). Esto se reflejó en la clasificación numérica, ya que el mejor descriptor de la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos resultó ser el número de industrias (o las variables correlacionadas con ésta). De este modo, las entidades políticas se ordenaron, en primer lugar, conforme al número de industrias y, en segundo término, por el porcentaje de subsuelo arcilloso y la presencia de depósitos de residuos sólidos (Figura 4).

La clasificación política divisiva requirió de la aplicación de siete análisis de componentes principales (ACP) para agrupar a ocho entidades políticas. El primer ACP separó, por un lado, a un conjunto de 11 entidades claramente urbanas y, por el otro, a un conjunto heterogéneo de entidades tanto rurales como urbanas (en las que el drenaje profundo tenía poca importancia).

Las 11 entidades urbanas incluyeron a 70% de las industrias, 88% del drenaje primario, 94% del drenaje profundo, 100% de los depósitos de combustible, 61% de la zona urbanizada y 71% de las gasolineras. Este conjunto se dividió con el segundo ACP para formar el Grupo 1, con una sola entidad, y un conglomerado con las unidades restantes. Al aplicarse el tercer ACP a este conglomerado, se formaron los Grupos 2 y 3, con cuatro y seis entidades políticas, respectivamente (Figura 4).

El cuarto ACP se aplicó a las 32 entidades políticas que fueron agrupadas originalmente por el primer ACP. De este modo, se identificó al Grupo 4, constituido por las tres entidades que exhibieron características fundamentalmente urbanas. El conglomerado de las 29 entidades restantes se sometió al quinto ACP, el cual generó un conjunto de 20 entidades y otro de nueve. El sexto ACP se aplicó al conjunto más grande de estos dos y generó los Grupos 5 y 6, mientras que el séptimo ACP, aplicado al conjunto más pequeño, creó los Grupos 7 y 8.

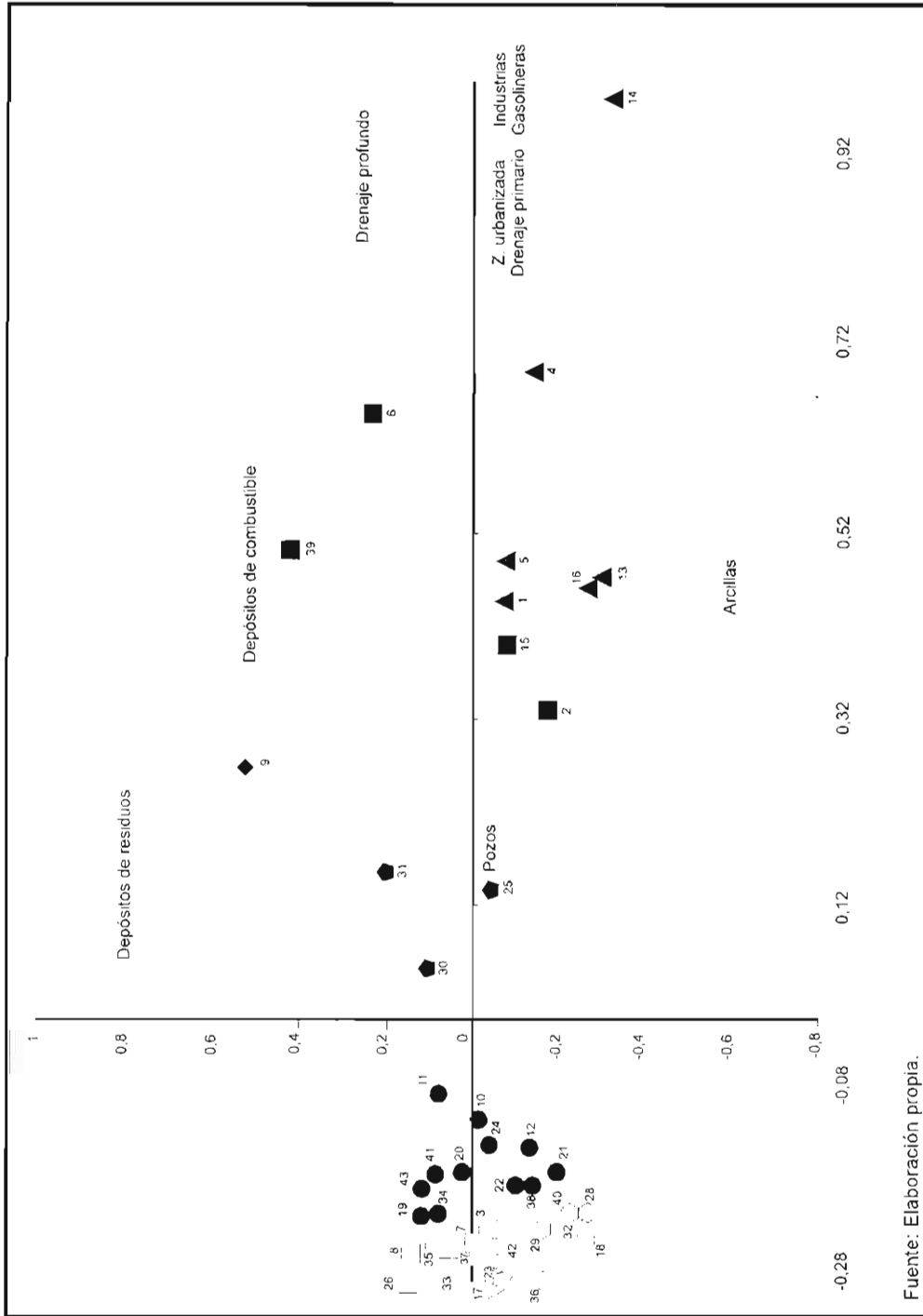


Figura 4. Agrupación numérica de las entidades de la ZMCM de acuerdo con fuentes contaminantes y subsuelo arcilloso; ◆Grupo 1, ■Grupo 2, ▲Grupo 3, ●Grupo 4, ●Grupo 5, □Grupo 6, ○Grupo 7 y ▽Grupo 8.

Descripción de grupos de entidades

Grupo 1. Se distinguió por conformarlo una sola delegación, Álvaro Obregón. Presentó importancia alta y muy alta para todas las fuentes de contaminación, con la excepción del número de industrias, cuya importancia fue cercana a la media de todas las entidades políticas. No contiene subsuelo arcilloso (Figura 4), por consiguiente, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en esta entidad se catalogó como muy alta.

Grupo 2. Reunió a cuatro entidades políticas, cuya característica principal fue la importancia del número de industrias, zona urbana, número de gasolineras y longitud del drenaje (primario y profundo), de alta a muy alta. Con respecto al número de pozos, las categorías de importancia que se obtuvieron variaron desde baja hasta muy alta. Asimismo, la importancia del subsuelo arcilloso en este Grupo fue de baja a alta. Con la excepción de la entidad 39, no se detectaron depósitos de combustible. En consecuencia, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este Grupo se catalogó como alta.

Grupo 3. Conjuntó a seis entidades políticas, cuya la zona urbanizada ocupó prácticamente toda la superficie de cada entidad, por lo que su importancia se clasificó como muy alta, al igual que la del drenaje primario. La importancia del número de industrias y el número de gasolineras varió de alta a muy alta, mientras que la del número de pozos fue de moderada a alta. Por su parte, el drenaje profundo obtuvo las categorías de importancia baja o muy alta. Asimismo, la importancia del subsuelo arcilloso fue muy alta en todas las entidades, con la excepción de una. En ninguna de las entidades de este Grupo se encontraron basureros y sólo en dos se localizaron depósitos de combustible (Figura 4). De esta forma, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este Grupo se catalogó como baja, con excepción de la delegación Gustavo A. Madero, que se clasificó como de propensión muy alta.

Grupo 4. Las tres entidades que lo componen (Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl) presentaron características fundamentalmente urbanas. En particular, éstas se reflejaron en el número de industrias, número de gasolineras y número de basureros, que obtuvieron categorías de importancia entre alta y muy alta. Sin embargo, la importancia del drenaje profundo fue de baja a muy baja, mientras que la del drenaje primario fue de moderada a alta. En contraste con las otras dos entidades del Grupo, el municipio de Naucalpan obtuvo un valor de importancia bajo para la superficie urbanizada y de importancia muy baja para el subsuelo arcilloso. Asimismo, la importancia del drenaje primario y del número de pozos varió de muy baja a muy alta. No se ubicaron depósitos de combustible en las entidades del Grupo (Figura 4). De acuerdo con la tabla de decisión, Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl tienen una propensión a la contaminación muy alta, alta y baja, respectivamente.

Grupo 5. Las 12 entidades políticas de este Grupo se diferenciaron por la baja importancia del número de industrias, del drenaje primario, el drenaje profundo, el número de gasolineras y superficie urbanizada. Las excepciones a este patrón del Grupo fueron Tlalpan, que presentó importancia alta para el drenaje primario y el número de gasolineras, y Coacalco, que obtuvo una importancia alta para la superficie urbanizada. En cambio, la importancia del número de pozos varió de baja a muy alta; sobresale en las entidades de Texcoco, Tlalpan y Xochimilco. De igual manera, la importancia de los basureros varió de baja a alta. La importancia del subsuelo arcilloso, por otra parte, fue de muy baja a alta. No se detectaron depósitos de combustible (Figura 4). Por todo ello, la propensión a la contaminación de agua subterránea en este Grupo se catalogó como baja.

Grupo 6. Aglutinó a ocho entidades que resultaron con importancia de baja a muy baja para todas las fuentes de contaminación, con la excepción de la presencia de basureros en cuatro entidades (Milpa Alta, Huixquilucan, Nicolás Romero y Tecámac) y el número de pozos en Ixtapaluca. La superficie de subsuelo

arcilloso obtuvo importancia muy baja en todas las entidades, menos en Tecamac, que presentó una importancia baja (Figura 4). De este modo, la propensión a la contaminación de agua subterránea en este Grupo se catalogó como baja.

Grupo 7. Incluyó a seis entidades, en donde la importancia de todas las fuentes de contaminación fue baja. La importancia del subsuelo arcilloso fue de alta a muy alta (Figura 4). Así, la propensión a la contaminación de agua subterránea en este Grupo se catalogó como muy baja.

Grupo 8. Las tres entidades que conformaron este Grupo presentaron importancia baja para todas las variables (Figura 4). Consiguientemente, la propensión a la contaminación de agua subterránea en este Grupo se catalogó como bajo.

Entidades propensas a la contaminación

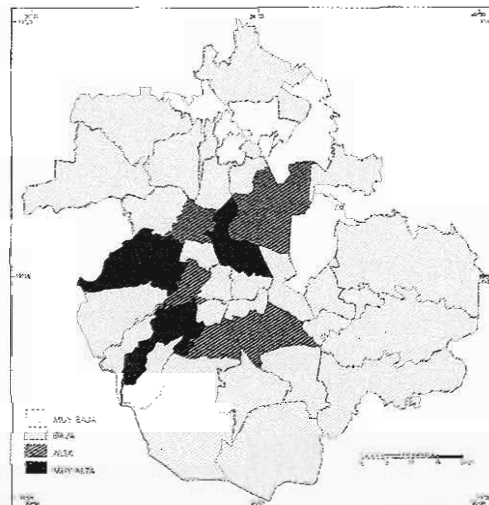
Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero y Naucalpan son las delegaciones que se catalogan como de propensión muy alta a la contaminación del agua subterránea; Coyoacán, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Ecatepec y Tlalnepantla, se clasifican como de

propensión alta (Figura 5).

Es importante destacar que las entidades más propensas a la contaminación del agua subterránea se localizan en las zonas geológicas de lomas y de transición, con una conductividad hidráulica relativamente alta.

Si se considera que la detección de contaminantes en los pozos de extracción puede corresponder a años o décadas posteriores al derrame en la superficie y que, una vez contaminado el acuífero es sumamente difícil su restauración (Mackay *et al.*, 1985), es por ello que se debe poner especial cuidado en estas entidades de la ZMCM.

La contaminación del sistema de acuíferos de la ZMCM ocasionaría serios problemas para el suministro de alrededor de 18 millones de habitantes en esta área urbana. El importar el agua que requiere la urbe de otras cuencas, como es el caso de los sistemas Cutzamala y Lerma, tiene un costo tanto económico como ecológico elevado, además de los problemas sociales que ocasiona en las cuencas donde esta agua se utilizaba para riego y generación de energía eléctrica (Ezcurra y Mazari, 1996).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Entidades propensas a la contaminación de agua subterránea en la ZMCM.

Se estima que en el año 2010 la ZMCM contará con una población de 21 millones de habitantes y, de seguir las tendencias actuales en el consumo de agua, se requerirán aproximadamente 80 m³ de agua por segundo para satisfacer las necesidades de la ZMCM (Merino, en prensa). Este problema se acrecienta debido a que las áreas naturales de recarga del sistema de acuíferos, como la Sierra de Chichinautzin y la Sierra de las Cruces, son impactadas por ciertas actividades humanas que disminuyen la recarga.

La problemática de la contaminación de los acuíferos es compleja, por lo cual se requiere de análisis específicos para cada una de las fuentes contaminantes en la ZMCM. Estos trabajos deben incorporar atributos espaciales, así como volúmenes de residuos, volúmenes de explotación y de almacenamiento, entre otros, lo que permitiría identificar las zonas de riesgo a la contaminación del sistema de acuíferos de la ZMCM.

CONCLUSIONES

Las fuentes contaminantes consideradas en este estudio se localizan principalmente en las entidades centrales de la ZMCM, mientras que el menor número de fuentes contaminantes se presenta en los municipios del estado de México, que se incorporaron recientemente a la megalópolis. A nivel de entidad política, se considera que los mejores indicadores de la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos son el número de industrias y los suelos de tipo arcilloso (zona lacustre).

Se clasifica a las entidades en ocho grupos, de acuerdo con la importancia de las fuentes de contaminación y el porcentaje de suelo arcilloso. Las entidades más propensas a la contaminación del agua subterránea son, con propensión muy alta, Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero y Naucalpan, y con propensión alta Coyoacán, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Ecatepec y Tlalnepantla. Por consiguiente, se tendrán que tomar medidas preventivas para evitar la contaminación del sistema de acuíferos, especialmente en estas entidades.

El suministro de agua en la ZMCM será uno de las grandes tareas a resolver en el presente siglo, por eso se deben aumentar los programas de prevención de contaminación del agua subterránea y manejo racional de los recursos hídricos en la ZMCM.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de becas de posgrado y por el Instituto de Ecología, UNAM. Asimismo, los autores agradecen a la Gerencia de Ciencias del Ambiente del Instituto Mexicano del Petróleo y al Instituto de Geografía de la UNAM las facilidades prestadas en la realización de esta investigación. En forma particular se agradece el apoyo de la Dra. Christina Siebe, del Dr. Manuel Maass, el Dr. José Luis Palacio, del Dr. Mario Arturo Ortiz, del Ing. Juan Manuel Lesser, del Ing. Federico Mooser, del Ing. Claudio Molina y del Dr. James Pick, en diferentes aspectos del proyecto.

NOTA

¹ Entidades: término que se utiliza en este trabajo para referirse tanto a las delegaciones del Distrito Federal como a los municipios del estado de México que constituyen la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

REFERENCIAS

- Alley, W. M. (ed.; 1993), *Regional ground-water quality*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Cavallaro, A., C. Conradi, G. De Felice y P. Grassi (1985), "Underground water pollution in Milan by industrial chlorinated organic compounds", Solbe, L. G. (ed.), *Effects of land use upon fresh waters*, Ellis Harwood, Chichester UK, pp. 68-84.
- Consejo Nacional de Investigación (1995), *El agua y la Ciudad de México*, Consejo Nacional de Investigación, México.
- DDF (1988), *Manual de exploración geotécnica*, Secretaría General de Obras, Departamento del Distrito Federal, México.

- ☞ DGCOH (1987), *Geohidrología del Valle de México*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Departamento del Distrito Federal, México, Contrato 7-33-1-0211.
- ☞ DGCOH (1993), *Fuentes de contaminación al agua subterránea y alternativas de saneamiento*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Departamento del Distrito Federal, México, Contrato 3-33-1-0172.
- ☞ DGCOH (1996), *Plan maestro de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1994-2010*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Departamento del Distrito Federal, México.
- ☞ Digby P., G. N. y R. A. Kempton (1987), *Multivariate analysis of ecological communities*, Chapman and Hall, London.
- ☞ Durazo, J. (1996), "Ciudad de México, Acuitardo superficial y contaminación acuífera", *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XI, núm. 2, pp. 5-14.
- ☞ ESRI (1997), *ARC/INFO Version 7.1.1*, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, USA.
- ☞ Ezcurra, E. y M. Mazari Hiriart (1996), "Are megacities viable: a cautionary tale from Mexico City", *Environment*, vol. 38, no. 1, pp. 6-34.
- ☞ IMP (1997), *Sistemas de información geográfica aplicados a la información cartográfica del proyecto IMADA*, Instituto Mexicano del Petróleo, GCA-097085, México, p. 30.
- ☞ INEGI (1993), *Ciudad de México (área metropolitana), Perfil Sociodemográfico, XI Censo General de Población y Vivienda, 1990*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, p. 85.
- ☞ INEGI (1994), *Censos Económicos 1994, Resultados oportunos*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- ☞ INEGI (1999), *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México, pp. 35-58.
- ☞ Knox, R. C. y W. Canter (1996), "Prioritization of ground water contaminants and sources", *Water, air and soil pollution*, vol. 88, pp. 205-226.
- ☞ Lesser, J. M. y M. A. Cortés (1998), "El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje", *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XIII, núm. 3, pp. 13-18.
- ☞ Mackay, D. M., P. V. Roberts y J. A. Cherry (1985), "Transport of organic contaminants in groundwater", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 384-392.
- ☞ Mackay, D. M. y J. A. Cherry (1989), "Groundwater contamination: pump-and-treat remediation", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 630-636.
- ☞ Marsal, R. J. y M. Mazari (1969), *El subsuelo de la Ciudad de México*, Facultad de Ingeniería, Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, UNAM (2 vols.).
- ☞ Martínez, J. (1991), "Geotecnia del tiradero de Santa Cruz Meyehualco", *Simposio Geotecnia y Medio Ambiente*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, pp. 85-90.
- ☞ Mazari, M., C. Ramírez y J. Alberro (1992), "Efectos de la extracción de agua en la zona lacustre del valle de México", en volumen Marsal, R. J., *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, A.C., México, pp. 37-48.
- ☞ Mazari, M. y D. M. Mackay (1993), "Potential for groundwater contamination in Mexico City", *Environ. Sci. Technol.* vol. 27, no. 5, pp. 794-802.
- ☞ Merino, H. (en prensa), "El Sistema hidráulico de la Ciudad de México", en Garza, G., *Atlas de la Ciudad de México*, El Colegio de México-Gobierno del D.F., México.
- ☞ Mooser, F. (1974), *Mapa geológico de la Cuenca de México y zonas colindantes*, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Obras Hidráulicas.
- ☞ Mooser, F. (1990), "Estratigrafía y estructura del valle de México en el subsuelo de la cuenca de México y su relación con la ingeniería de cimentación, a cinco años del sismo", *Revista Mexicana de Mecánica de Suelos*, México.
- ☞ Noy-Meir, I. (1973), "Data transformations in ecological ordinations I. Some advantages of non-centering", *J. of Ecology*, vol. 61, pp. 753-760.

- ☞ Pankow, J. F. y J. A. Cherry (eds.; 1996), *Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater*, Waterloo Press, Portland, Oregon.
- ☞ PEMEX (1997), *Datos básicos de estaciones de servicio en el Valle de México*, Gerencia Comercial Zona Valle de México, Petróleos Mexicanos, no publicado.
- ☞ Pick, J. B. y E. W. Butler (1997), *Mexico megacity*, Westview Press, Boulder, Colorado.
- ☞ Pielou, E.C. (1984), *The interpretation of ecological data: a primer on classification and ordination*, John Wiley & Sons, New York.
- ☞ Riosvelasco, P. (1994), *La disposición final de desechos sólidos en la Ciudad de México*, Dirección General de Servicios Urbanos, Departamento del Distrito Federal, México, p. 9.
- ☞ Rivett, M. O., D. N. Lerner y J. W. Lloyd (1990), "Chlorinated solvents in UK aquifers", *J. of the Institution of Water and Environmental Management* 4, pp. 242-250.
- ☞ Sax, N. R. y R. J. Sr. Lewis (1989), *Dangerous properties of industrial materials*, 7th ed., vol. II, Van Nostrand Reinhold, New York.
- ☞ Schwille, F. (1988), *Dense chlorinated solvents in porous and fractured media: model experiments (Engl. transl.)*, Lewis Publ. Inc., Ann Arbor, MI.
- ☞ Sitting, M. (1985), *Handbook of toxic and hazardous chemicals and carcinogens*, 2nd ed, Noyes Publ., Park Ridge, New Jersey.
- ☞ Sokal, R. R. y F. J. Rohlf (1995), *Biometry*, W. H. Freeman and Company, New York.
- ☞ Verschueren, K. (1983), *Handbook of environmental data on organic chemicals*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- ☞ Westrick, J. J. (1990), "National survey of volatile organic compounds in ground and surface waters", en Ram, N. M., R. F. Christman y K. P. Cantor (eds.), *Significance and treatment of volatile organic compounds in water supplies*, Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI, pp. 103-125.