

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

Facultad de Filosofía y Letras e Instituto de Geografía

LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA: FACTOR AMBIENTAL
DETERMINANTE EN LA CONFORMACION URBANA DE LA CUENCA DE MEXICO

TAUTIVA GARCIA Andrés Mauricio

Tesis presentada como requisito para obtener el título de Maestro en Geografía

Tesis dirigida por el Dr. José Joel Carrillo-Rivera

México, D.F. Ciudad Universitaria

Noviembre de 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue elaborada gracias a la beca de posgrado de la Dirección General de Posgrados de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Así mismo, agradezco la contribución de todas las personas involucradas en la realización de esta investigación, como también al Posgrado en Geografía y el Instituto de Geografía de la UNAM.

RESUMEN

Los sistemas de flujo de agua subterránea, sus variadas dimensiones espacial y temporal y sus diversas manifestaciones físicas han tenido un papel preponderante en la conformación urbana de la Cuenca de México, al proporcionar a diferentes zonas de la cuenca significativas características ambientales. Estas características se reflejan en la forma en que sus pobladores han gestionado el espacio y las fuentes hídricas durante todo el proceso de consolidación urbana.

Es así como, las diferentes manifestaciones hídricas superficiales (manantiales, lagos, ríos, etc.) presentes en la cuenca en la época prehispánica, determinaron la configuración inicial de los primeros emplazamientos urbanos. El funcionamiento general de los sistemas de flujo en la cuenca, permite identificar tres zonas de descarga de agua subterránea: una zona en la parte baja de las sierras del suroeste, donde se descargan flujos de agua subterránea local; otras dos zonas hacia el centro-norte y este de la cuenca donde descargan flujos intermedios, y una pequeña zona central donde descarga un flujo regional, con condiciones menos aptas para el consumo humano.

El determinismo generado por el funcionamiento del agua subterránea en la Cuenca de México, partió también su disposición urbana entre un este árido con dificultades hídricas y un oeste fértil y bien dotado de aguas de buena calidad para el consumo humano. Con la aparición de la tecnología de perforación de pozos de extracción de agua subterránea a principios del siglo XX, el aprovechamiento de las fuentes hídricas del subsuelo se hizo más eficiente y permitió nuevos cambios estructurales en la evolución urbana en la cuenca. Así la Ciudad de México pudo soportar el consecuente crecimiento de las necesidades hídricas, provocado por las nuevas políticas de industrialización económica y el aumento acelerado de la población. El proceso de explotación intensiva del agua subterránea provocó también la aparición de manifestaciones negativas, las cuales fueron asociadas con la idea de un agotamiento del elemento, o "sobreeplotación del agua subterránea". La manifestación negativa más importante es el hundimiento o subsidencia de terreno provocada por el proceso de consolidación de las unidades acuíferas. En este documento se presenta la evolución y

los controles físicos que controlan la subsidencia, y se intenta demostrar que esta no es un síntoma del agotamiento del agua subterránea, ni de la sobreexplotación de las fuentes hídricas.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	5
TABLA DE FIGURAS	6
INTRODUCCIÓN	8
I. RASGOS FÍSICOS GENERALES DE LA CUENCA DE MÉXICO	13
A. REFERENTE GEOLÓGICO.....	15
B. REFERENTE HIDROGEOLÓGICO.....	16
1 SISTEMAS DE FLUJO, ZONAS DE DESCARGA Y LA APROPIACION SOCIAL DEL MEDIO FÍSICO EN LA CUENCA DE MÉXICO	20
1.1 LOS SISTEMAS DE FLUJO AGUA SUBTERRÁNEA Y SU INTERACCIÓN PERMANENTE CON LA NATURALEZA ...	20
1.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DE MÉXICO	24
1.2.1 <i>Manifestaciones naturales de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México antes del primer bombeo</i>	24
1.2.2 <i>Manifestaciones presentes de las condiciones de agua subterránea</i>	30
1.2.3 <i>Sistemas de flujos en la cuenca de México: Identificación de las zonas de descarga</i>	32
2 EL PAPEL DE DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA EVOLUCIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO	38
2.1 LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LA POLARIZACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA DE MÉXICO	38
2.2 EL ARRIBO DE LOS ESPAÑOLES A LA CUENCA DE MÉXICO: LA HERENCIA DE LA POLARIZACIÓN ESPACIAL	44
2.3 LAS MUTACIONES DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS FUENTES HÍDRICAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO A PARTIR DE LA EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE POZOS PROFUNDOS.....	48
2.3.1 <i>Las explotación del agua subterránea factor de descentralización de las fuentes hídricas</i>	49
2.3.2 <i>La explosión urbana de la Ciudad de México y la reproducción de la bipolarización hídrica de la ciudad</i> 55	55
2.4 LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA ACTUAL DINÁMICA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	59
2.4.1 <i>Desconcentración de la población del centro hacia la periferia de la Ciudad: Mala distribución de la dotación</i> 60	60
2.4.2 <i>Los sistemas de flujo en la regionalización de la Ciudad de México</i>	73
3 SUBSIDENCIA EN LA CUENCA DE MÉXICO: MUESTRA PALPABLE DE LA ESCALA TEMPORAL Y ESPACIAL DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA	78
3.1 EL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA: GENERALIDADES FÍSICAS Y FACTORES QUE INFLUYEN	82
3.2 EVOLUCIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO	87
3.2.1 <i>El plan general para resolver los problemas de hundimiento de 1954 y su incidencia en la regionalización de la subsidencia</i>	97
3.3 CONTROLES DE LA SUBSIDENCIA EN LA CUENCA DE MÉXICO	101
CONCLUSIONES	108
ANEXOS	114
BIBLIOGRAFÍA	117

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es la fuente potencial de agua dulce más importante en el planeta. La UNESCO (2003) estima que el volumen total de agua sobre la Tierra es un poco más de 1,386 millones de km³, del cual, aproximadamente el 97.47% es agua salada. Del 2.53% restante, un 2% se concentra en forma sólida en los glaciares y casquetes polares y virtualmente toda el agua dulce en forma líquida es agua subterránea. El agua dulce presente en los ríos y lagos, en la atmósfera y en la zona no-saturada comprende en conjunto sólo un 1/50 del 1% del agua dulce total susceptible como fuente para los seres vivos y las actividades productivas.

El agua subterránea suple el 50% de las necesidades mundiales de agua potable, 40% de los requerimientos hídricos industriales, y el 20% del agua para riego (UNESCO, 2003). Evidentemente estas cifras son de mayor magnitud en países, que como México, tienen en gran parte de su territorio climas predominantemente áridos o semiáridos. Esto lo confirman las cifras de la Comisión Nacional de Agua (2001): con agua subterránea se abastece a 75 millones de personas, se riegan 1.6 millones de hectáreas para la agricultura (la tercera parte de la superficie agrícola de México) y se abastece la mitad la industria del país. Regiones del norte y centro de México, la península de Baja California e incluso la región de Yucatán que presenta una intensa precipitación pluvial anual (más de 1,000 mm/año), tienen en el agua subterránea su principal o única fuente de abastecimiento. En la Ciudad de México, la importancia también es representada por las cifras: el 64% del total de agua potable (59.3 m³/s) se obtiene de pozos de extracción de agua subterránea (Birkle *et al.*, 1998, Comisión Nacional del Agua, 2004) y más del 70% (47.5 m³/s) del agua destinada al abastecimiento público proviene de fuentes subterráneas.

No obstante, la importancia real del agua subterránea va más allá de los, muchas veces, triviales guarismos. Como se explicará a lo largo de este texto, el agua subterránea no es un ente estático en medio de barreras físicas. Por el contrario, esta fuente, cuyas fronteras no están delimitadas por los obstáculos del relieve superficial, se

mantiene en constante movimiento e interactúa permanentemente con su entorno físico. Así mismo, su naturaleza de flujos jerárquicos y sistemáticos le permite alcanzar escalas espaciales y temporales que muchas veces van más allá de lo regional, por lo cual, acciones impuestas en un punto determinado de un sistema de agua subterránea pueden propagarse a distantes regiones geográficas, en grandes lapsos de tiempo y en las formas menos esperadas (Tóth, 1995).

La amplia influencia espacial y temporal ha hecho del agua subterránea un factor físico de grandes implicaciones en los contextos urbanos y poblacionales de la Ciudad de México. Por ejemplo, en los primeros emplazamientos urbanos que se formaron en la Cuenca de México el aprovisionamiento de agua era asegurado por la explotación de fuentes superficiales las cuales eran, en términos estrictos, una manifestación superficial de la descarga de flujos subterráneos. Las zonas donde era posible acceder a la descarga de agua subterránea (manantiales, lagos, ríos), fueron determinantes en la configuración inicial de los emplazamientos urbanos prehispánicos. Es así como, a lo largo de la evolución de la ciudad estos sectores tuvieron un papel significativo, como espacios de interacción entre las diversas dinámicas poblacionales y los sistemas de flujo de agua subterránea.

La conformación de los flujos de agua subterránea en la Cuenca de México y la aparición de sistemas ingenieriles para explotar de forma intensiva esta fuente (la perforación de pozos profundos, la bomba de turbina, etc.), fueron ingredientes importantes que los gobernantes de la ciudad aprovecharon para impulsar el crecimiento económico y poblacional. Sin embargo con el desarrollo de la explotación intensiva, el conocimiento científico sobre la localización, el origen y movimiento del agua subterránea, su manejo óptimo, su conexión con el agua superficial, su relación con el ambiente, y en suma, su funcionamiento, no han sido claramente definidos ni usados satisfactoriamente, generando así un conocimiento fragmentado de la realidad (Martínez *et al.*, 2001). Lo anterior es debido a que la preocupación principal de los estudios relacionados con agua subterránea es sin duda la determinación y cuantificación de su disponibilidad. No obstante, más allá de conocer “*la disponibilidad de agua*”, el objetivo de conocer con claridad el funcionamiento del agua subterránea

representa la ambición de alcanzar eficientes esquemas de gestión de las fuentes subterráneas.

Junto con la intensificación de la explotación del agua subterránea, aparecieron diferentes manifestaciones ambientales indeseables para la ciudad, como la consolidación de terreno y subsidencia regional, la contaminación de agua subterránea y superficial, la desecación de humedales, el aumento en los procesos de erosión, los cambios en las condiciones de descarga de ríos y manantiales, entre otros (Carrillo-rivera *et al.*, 2002). Con el surgimiento del concepto “*desarrollo sustentable*”, las manifestaciones negativas fueron tomadas como argumentos para establecer el concepto de “*sobreexplotación*” en las aguas subterráneas. No obstante el razonamiento utilizado para declarar la sobreexplotación a nivel de aguas subterráneas, se basa únicamente en las respuestas hídricas de escala local. Lo anterior generó una serie de confusiones reflejadas en gestiones ineficientes. Por ejemplo, es común que los encargados de gestionar las fuentes hídricas consideren la recarga media de los acuíferos como una constante, sin embargo se ha determinado que esta recarga puede variar, incluso al alza, por la explotación de los acuíferos. Así mismo, es común que se interpreten como sobreexplotación del agua subterránea el descenso en los niveles piezométricos (Llamas *et al.*, 2000), cuando éste puede ser, como lo indica Llamas (2000) “una situación de régimen transitorio hacia un nuevo estado de equilibrio”.

La subsidencia regional de terreno de la Ciudad de México, una de las más fuertes del mundo, es un ejemplo concreto de la anterior problemática. La idea prevaleciente de que la “*sobreexplotación*” de las fuentes subterráneas provocó subsidencia en el centro histórico, llevó a descentralizar la extracción a otras regiones donde se pensaba la problemática no iba a ser la misma y se solucionaría a su vez otro aspecto: nuevas fuentes de agua para las nuevas áreas de crecimiento urbano e industrial. Se propiciaron entonces asentamientos en zonas como Chalco, Tláhuac, Xochimilco y Netzahualcóyotl, donde evidentemente sus condiciones hidrogeológicas como zonas de descarga de agua subterránea permitían una fácil y abundante obtención de agua. Pero el resultado fue también un descenso permanente del nivel de terreno y por ende el aumento de zonas susceptibles de inundación y con graves problemas en su

infraestructura. Como se vera en este documento, al desconocer la dinámica de los sistemas de flujo y la condición de continuidad hidráulica que prevalece en la cuenca, se regionalizó el problema, y de paso, se modificaron las dinámicas urbanas de estas regiones.

Con esta investigación, se pretendió incorporar la dinámica de los sistemas de flujo de agua subterránea, en concreto las zonas de descarga de flujos de agua subterránea, con la evolución urbana y poblacional de la Ciudad de México, incluyendo esquemas relacionados con uso del suelo y planeación urbana. El interés radicó en la posibilidad de explicar, cómo la sociedad en sus procesos de desarrollo urbano se ha apropiado de su entorno físico y cómo sin entender adecuadamente la dinámica del agua subterránea, el desarrollo producido se ha expresado en diferentes manifestaciones físicas que pueden incidir en las dinámicas como es el caso de la subsidencia. Es importante aclarar, que toda la información utilizada en ésta investigación proviene de diferentes publicaciones nacionales e internacionales, y no se realiza por lo tanto ningún tipo de recopilación de datos de campo, ni comprobación *in situ* de los diferentes elementos mostrados en éste documento.

Esta investigación se basó en tres ejes principales:

- i)* La descripción de los sistemas de flujos de agua subterránea en la Cuenca de México y su evolución, con el fin de hacer una representación del medio físico al que hacemos referencia en el documento. Para esto se analizan las características de los sistemas de flujo en dos etapas: *a)* primero bajo condiciones naturales, es decir antes del drenado de los lagos en 1789 y del primer bombeo del sistema acuífero en 1847; y *b)* bajo las condiciones presentes luego de los diferentes cambios en el régimen natural a partir del primer bombeo por pozo profundo.
- ii)* Un análisis de la evolución de la ciudad y su interacción con los sistemas de flujos de agua subterránea, con el objetivo de conocer cómo sus habitantes se han apropiado de las fuentes hídricas y cómo la explotación de éstas ha mutado a través del tiempo. Este análisis se llevo a cabo describiendo esta

relación en tres períodos: *a)* la apropiación de los primeros pobladores de la cuenca; *b)* la reproducción de la polarización ambiental (Delgado *et al.*, 1999), determinada por los sistemas de flujos, en la evolución de la ciudad; y *c)* el rol de los sistemas de flujos en la regionalización de la Ciudad de México.

- iii)* Finalmente se aborda la problemática de la subsidencia regional de la Ciudad de México, como ejemplo concreto de la escala y magnitud de los sistemas de flujo de la cuenca, y de las repercusiones que han tenido las decisiones de gestión hídrica que desconocen el funcionamiento del agua subterránea, principalmente el plan para resolver los hundimientos de la ciudad elaborado en 1954.

I. RASGOS FÍSICOS GENERALES DE LA CUENCA DE MÉXICO

La Cuenca de México se encuentra ubicada en la parte central del Eje Neovolcánico, sobre el límite meridional de la Altiplanicie Mexicana, cubriendo un área cercana a los 9,600 km² (Figura 1). Por estar rodeada por montañas no presenta salidas naturales para el escurrimiento generado, por lo cual constituye una Cuenca Endorreica. La cuenca está delimitada al sur por el volcán Ajusco y el volcán Chichinautzin, al este con la sierra Nevada, y al oeste con la sierra de las Cruces. Al norte, delimita con una serie de montañas de baja altura: los Pitos, Tepotzotlan, Patlachique, Santa Catarina, entre otras. Las elevaciones máximas se ubican al sureste de la cuenca y entre estas están las del Popocatepetl y el Ixtacihuatl, con alturas de 5,465 m y 5,230 m, respectivamente (Mooser, 1963).

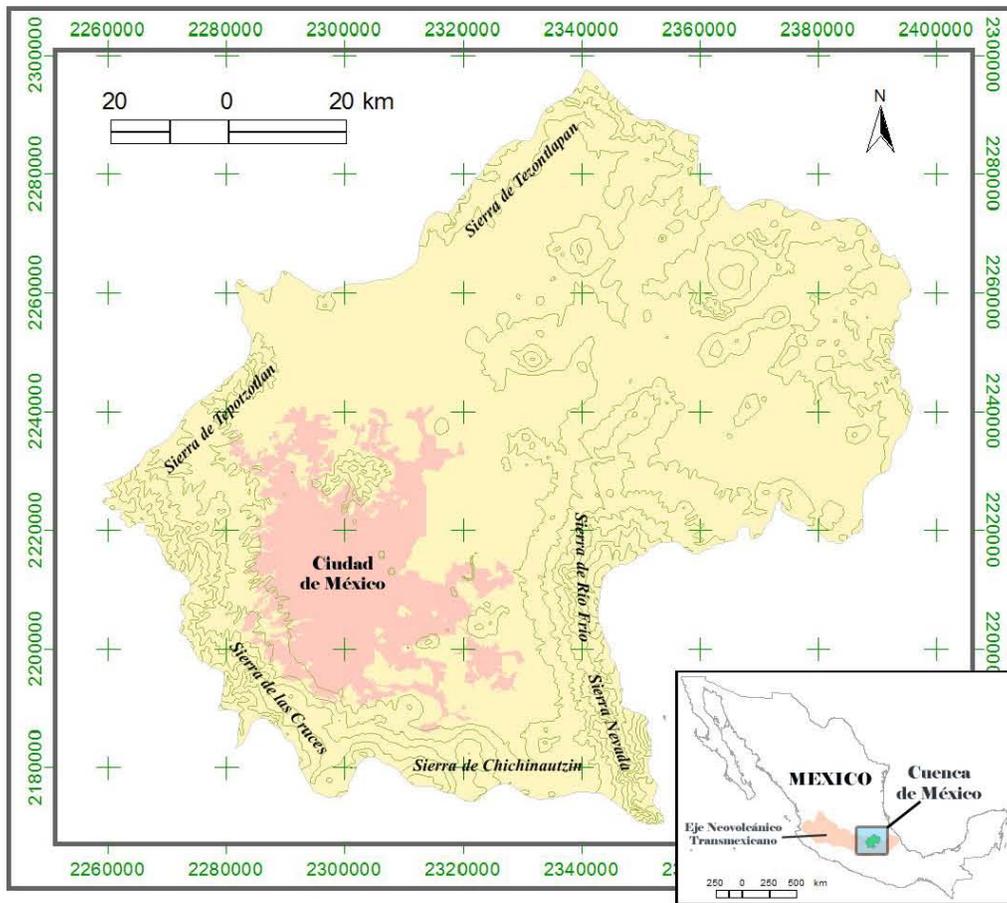
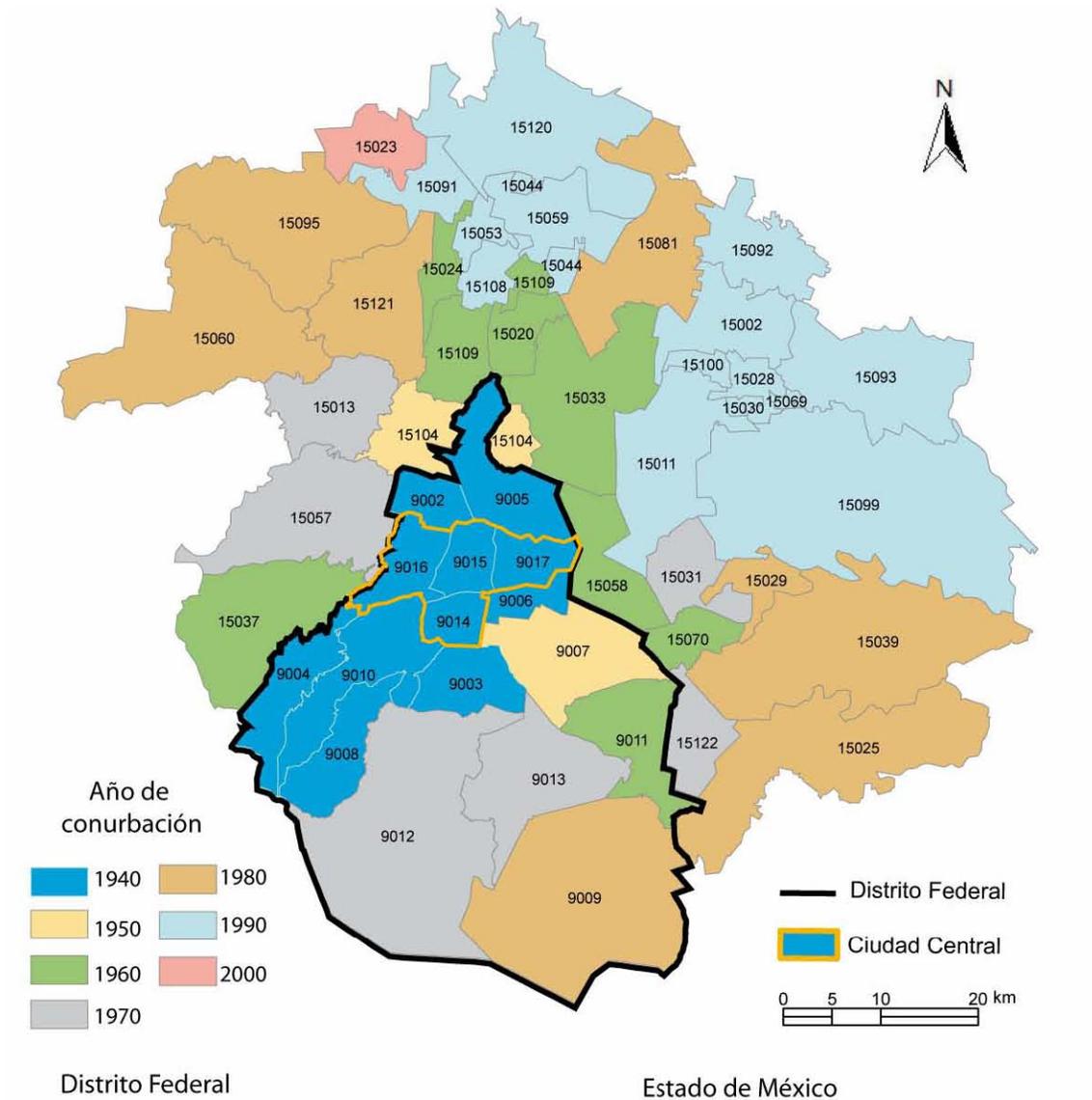


Figura 1. Localización de la Cuenca de México



Distrito Federal		Estado de México	
CLAVE	MUNICIPIO	CLAVE	MUNICIPIO
9002	Azcapotzalco	15002	Acolman
9014	Benito Juárez	15011	Atenco
9003	Coyoacán	15013	Atizapan de Zaragoza
9004	Cuajimalpa de Morelos	15020	Coacalco de Berriozabal
9015	Cuauhtémoc	15023	Coyotepec
9005	Gustavo A. Madero	15024	Cuautitlán
9006	Iztacalco	15121	Cuautitlán Izcalli
9007	Iztapalapa	15025	Chalco
9008	Magdalena Contreras, La	15028	Chiautla
9016	Miguel Hidalgo	15029	Chicoloapan
9009	Milpa Alta	15030	Chiconcuac
9011	Tlahuac	15031	Chimalhuacán
9012	Tlalpan	15033	Ecatepec de Morelos
9017	Venustiano Carranza	15037	Huixquilucan
9010	Alvaro Obregón	15039	Ixtapaluca
9013	Xochimilco	15044	Jalisco
		15053	Melchor Ocampo
		15057	Naucalpan de Juárez
		15059	Nextlapan
		15058	Nezahualcoyotl
		15060	Nicolás Romero
		15069	Papalotla
		15070	Paz, La
		15081	Tecamác
		15091	Teoloyucan
		15092	Teotihuacán
		15093	Tepetlaoxtoc
		15095	Tepotzotlán
		15099	Texcoco
		15100	Tezoyuca
		15104	Tlanepantla de Baz
		15108	Tultepec
		15109	Tultitlán
		15122	Valle de Chalco Solidaridad
		15120	Zumpango

Figura 2. Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2002)

En la parte oeste de la Cuenca, a una altitud promedio de 2,240 m snm se localiza la Ciudad de México. En este documento se utilizan la división administrativa definida por el INEGI, denominada Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), para llevar a cabo los análisis de indicadores hídricos y poblacionales. La ZMCM, esta conformada por 16 delegaciones (Distrito Federal) y 35 municipios (Estado de México, los cuales ocupan una superficie de 4,979 km², de los cuales el Distrito Federal ocupa el 29.8% contra el 70.2% ocupado por los municipios conurbados (INEGI, 2002) (*Figura 2*). En la actualidad la ciudad cuenta con más de 18 millones de habitantes, que corresponden al 18.3 % de la población nacional.

A. Referente Geológico

La Cuenca de México se formó por procesos de sedimentación, tectónicos y volcánicos, por medio de los cuales la cuenca se cerró. Esta se localiza en una estructura de fosa tectónica. La cuenca está caracterizada de manera general por las siguientes unidades que se describen respecto a su posición, de abajo hacia arriba, de la más antigua a la más joven, respectivamente (Hernández y Carrillo-Rivera, 1997) (*Figura 3*):

- i)* **Calizas del Cretácico**, es la unidad geológica más profunda que ha sido identificada en la parte central de la cuenca, excede los 1,000 m de espesor y está conformada por caliza, arenisca y detritos de rocas sedimentarias, tienen un comportamiento considerado de naturaleza karstica y fracturada.
- ii)* **Material clástico y del Terciario Medio**, tiene un espesor cercano a los 3,000 m, incluye material clástico del Eoceno, basalto y riolita del Oligoceno y andesita del Mioceno.
- iii)* **Depósitos del Plioceno Inferior**, están conformados por material lacustre y piroclástico con un espesor total de 600 m.
- iv)* **Rocas del Cuaternario**, tienen un espesor superior a los 1,000 m, están conformadas por basalto del Cuaternario, andesita del Plioceno y piroclastos del Plio-Cuaternario, interestratificados con depósito aluvial y lacustre.

- v) **Depósitos del Cuaternario Reciente**, cubren buena parte de la cuenca y están conformados por una capa de unos 600 m de espesor, de material aluvial y fluvial. En la parte superior de esta unidad se encuentra un acuitardo que aflora en el lago de Texcoco, y está formado por material lacustre de grano fino, intercalado con arena, limo y grava, con un espesor total de 300 m, aproximadamente. Por último, se tiene una capa de material lacustre que cubre unos 848 km² de la parte baja de la cuenca con un espesor promedio de 100 m. Dentro de ésta se encuentran dos capas de ceniza volcánica compacta, una a los 30 m y la otra a los 50 m.

Cuatro importantes áreas aflorando en las montañas que rodean la cuenca contrastan con la distribución de las unidades geológicas descritas. Estas áreas de afloramiento pueden actuar como áreas de recarga (Edmunds *et al.*, 2002): la sierra de las Cruces al sudoeste conformada por riolitas, andesitas y rocas dacíticas; al sur la sierra del Chichinautzin esta compuesta de unidades basálticas; al este la sierra Nevada incluye andesitas y dacitas, y al norte la sierra de Pachuca tiene una distribución heterogénea de andesitas riolitas y rocas basálticas. El área de la ciudad de México también contiene afloramientos de lavas basálticas (De Cserna *et al.*, 1987).

Como lo indican Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), fuera de los límites norte y sur del Cinturón Volcánico Transmexicano, afloran rocas sedimentarias que han sido reconocidas en el subsuelo de la Ciudad de México a profundidades de más de 1,500 m.

B. Referente Hidrogeológico

El conocimiento acerca del funcionamiento de los sistemas de flujos de agua subterránea en la Cuenca de México es hasta el momento incompleto (Edmunds *et al.*, 2002). En general los estudios realizados en la zona sólo dan información parcial del funcionamiento del flujo subterráneo. Por ejemplo, aspectos como la profundidad real del sistema acuífero de la cuenca y la interacción de flujos regionales en el funcionamiento del acuífero son aún poco conocidos y la complejidad de la estratigrafía y composición de la cuenca, dificultan la tarea (Edmunds *et al.*, 2002). Aunado a lo

anterior, los estudios hidrogeológicos llevados a cabo tienen siempre una visión unidisciplinaria, y sus escalas usualmente no son de nivel regional.

De acuerdo con Vázquez-Sánchez (1995), Ortega-Guerrero (1988) y el Consejo Nacional de Investigación (1995), el modelo conceptual hidrogeológico de la Cuenca de México está conformado de la siguiente manera (*Figura 3*):

- i) Acuitardo superior I*, está constituido por depósitos lacustres del Cuaternario de baja conductividad hidráulica (10^{-9} a 10^{-12} m/s) y alta capacidad de almacenamiento de agua; su espesor alcanza valores máximos en la planicie de chaco (150 m) y en Texcoco (410 m) (Vázquez-Sánchez, 1995). Intercalados en estos depósitos se encuentran diferentes capas limo-arenosas, con conductividad hidráulica más alta que funcionan como pequeños acuíferos confinados. La capacidad de compactación de esta unidad se relaciona con la subsidencia regional en la cuenca.
- ii) Acuífero superior II*, se encuentra integrado por sedimento aluvial y derrames de basalto y andesita cuaternarios así como por rocas andesítica y piroclástica Plio-Cuaternaria, y roca andesítica y depósitos piroclásticos con relleno aluvial del Plioceno Superior. Esta unidad se extiende más allá de las divisorias topográficas de la cuenca superficial y su espesor varía entre los 400 y 800 m. De este acuífero se extrae buena parte del agua subterránea con que se abastece la parte meridional de la ciudad de México.
- iii) Acuitardo inferior*, está conformado por depósitos de origen lacustre y piroclastos del Plioceno Inferior, así como por rocas andesíticas del Mioceno, y rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, como también las formaciones Balsas y Mezcala. Se piensa que su espesor está entre los 830 m y los 2,600 m.
- iv) Acuífero inferior*, esta unidad se encuentra formada por rocas carbonatadas del Cretácico, que son permeables por fracturas y disolución; se desconoce su espesor, pues ninguna perforación ha alcanzado la profundidad óptima.

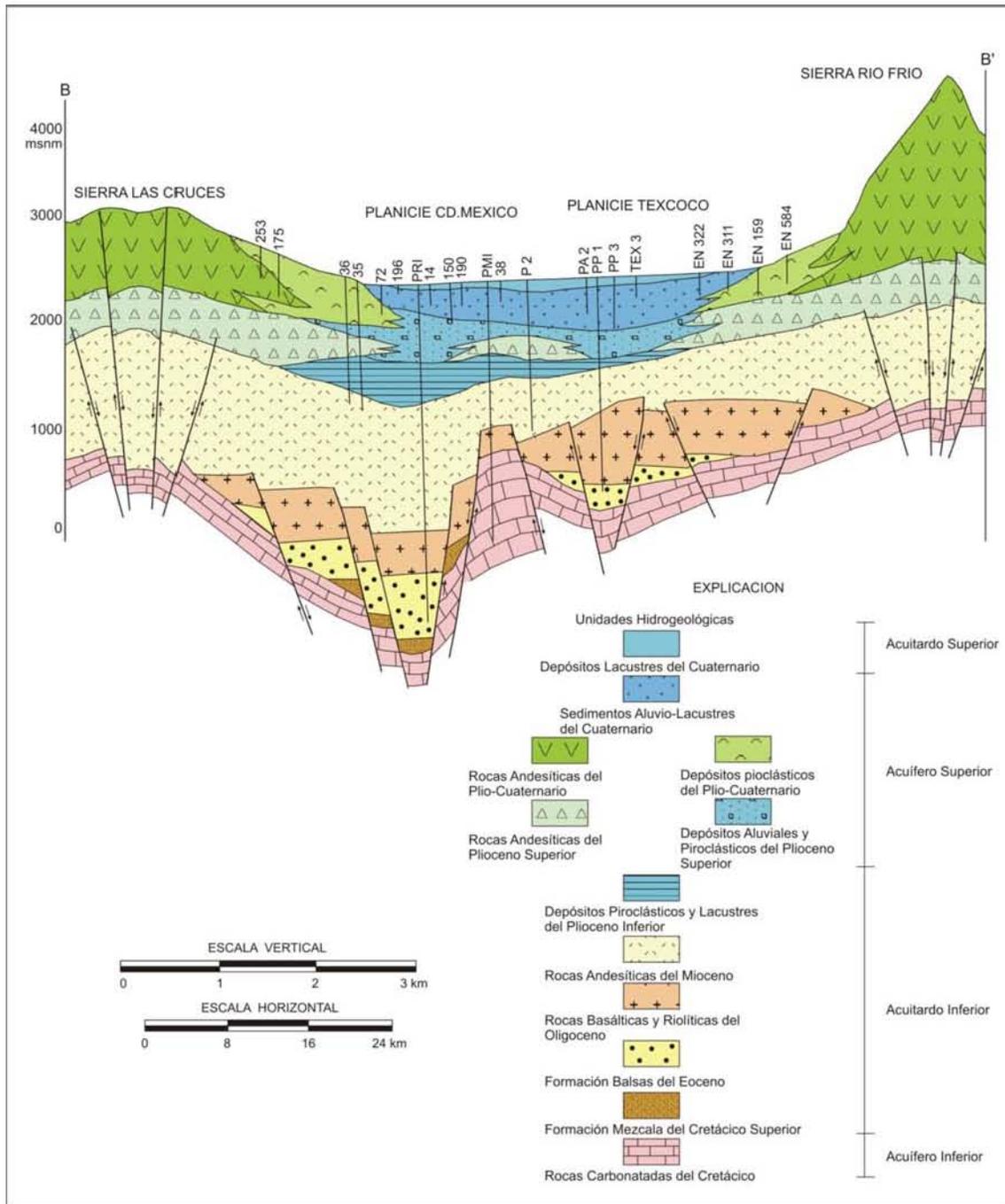


Figura 3. Sección hidrogeológica de la Cuenca de México (Vázquez-Sánchez, 1995)

Las unidades descritas manifiestan conexión hidráulica entre ellas y forman un sistema acuífero heterogéneo y anisotrópico, formado por depósitos tanto granulares como fracturados. La gran extensión horizontal de las diferentes unidades indica la conexión hidráulica entre la Cuenca de México con otras cuencas superficiales. Aunque se puede

encontrar información importante de las propiedades hidráulicas de los depósitos Plio-Cuaternario y Cuaternario Reciente, las propiedades del acuífero inferior son poco conocidas (Edmunds *et al.*, 2002). Sin embargo como lo indica Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), en algunas perforaciones de más de 1,500 m se encontró que las rocas carbonatadas del Cretácico son altamente permeables debido a la existencia de características karsticas. El desconocimiento de la profundidad de esa unidad ha dificultado la determinación de la verdadera capacidad del sistema acuífero para abastecer la ciudad, por lo cual muchos de los estudios llevados a cabo para conocer el potencial de las fuentes subterráneas de agua pueden ser desestimados.

1 SISTEMAS DE FLUJO, ZONAS DE DESCARGA Y LA APROPIACION SOCIAL DEL MEDIO FISICO EN LA CUENCA DE MÉXICO

Los sistemas de flujo de agua subterránea han jugado un papel importante en la conformación y en la evolución de la Ciudad de México. Estos han proporcionado a diferentes zonas de la cuenca significativas características ambientales, las cuales se han reflejado en la manera en que sus pobladores han gestionado el espacio y las fuentes hídricas.

Como se explicará en este capítulo, en la Cuenca de México funcionan diferentes zonas de descarga de agua subterránea, identificables gracias a diferentes manifestaciones y fenómenos naturales. Con el fin de identificar estas zonas, se desarrollará de antemano una explicación de los sistemas de flujos de agua subterránea, para luego hacer una descripción de las manifestaciones naturales y de las condiciones actuales de estos sistemas en la Cuenca de México.

1.1 Los sistemas de flujo agua subterránea y su interacción permanente con la naturaleza

La Teoría de los “*Sistemas de Flujo*” desarrollada por Tóth (1962, Tóth, 1995), indica que si se detuviese un momento el flujo del agua subterránea, se podrían estimar en el plano vertical diferentes zonas donde, los patrones de movimiento del agua tendrían regímenes de flujo específicos. Estas áreas en general pueden ser identificadas como *i) áreas de recarga*, donde el flujo natural del agua subterránea es vertical descendente, *ii) áreas de tránsito*, donde el flujo es lateral y horizontal y *iii) área de descarga*, que se distingue por tener flujo vertical ascendente. En el área de recarga el nivel de agua observado es profundo y se hace más profundo a medida que una perforación avanza, mientras que en el área de descarga está cerca de la superficie y a medida que una perforación avanza el nivel freático se vuelve más somero.

En regiones con una topografía accidentada, se desarrollan complejos patrones de flujo. En ese sentido, los sistemas de flujo de agua subterránea se pueden definir según la topografía y la geología por donde circulan, y de acuerdo con su longitud y profundidad de recorrido. Así, los sistemas de flujo pueden ser de tipo *local* cuando la

recarga alcanza niveles poco profundos y descarga en una zona topográficamente más baja y contigua al área de recarga; *intermedio* cuando la recarga –o parte de ésta– alcanza una profundidad media con respecto al basamento y descarga en zonas más bajas y lejanas que la contigua; y finalmente de tipo *regional*, cuando la recarga del flujo alcanza el nivel más profundo del sistema y descarga a gran distancia (Figura 4).

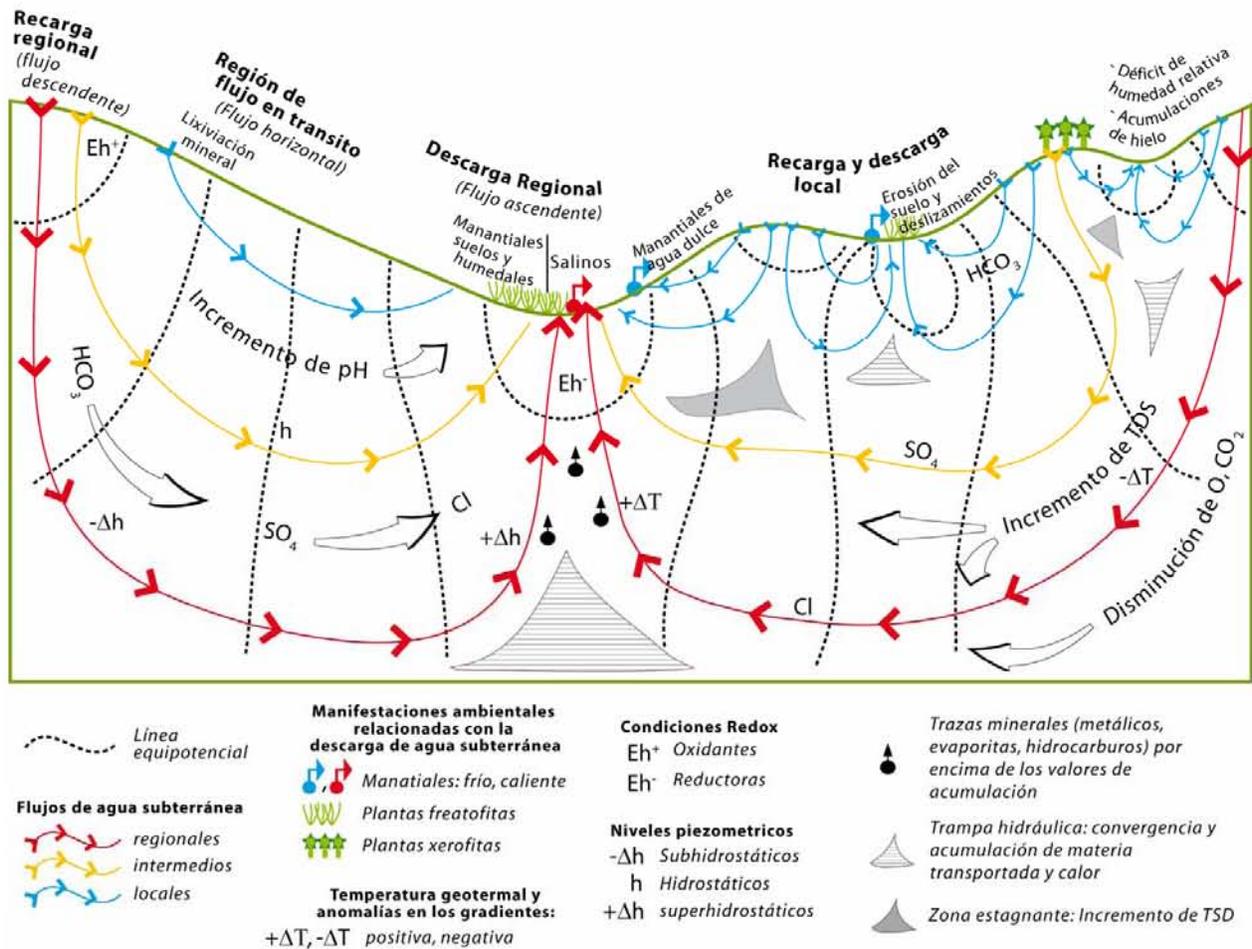


Figura 4. Sistemas de flujos de agua Subterránea (Adaptado de: Tóth, 1999)

El esquema de la Figura 4, muestra la distribución de los flujos de agua subterránea y su relación con diferentes tipos de manifestaciones. En general, se pueden incluir (Tóth, 1999): i) niveles piezométricos y contenidos de humedad altos o bajos según sea área de descarga o recarga, respectivamente; ii) cambios en la concentración aniónica, siendo bicarbonatada al principio del flujo, variando a sulfatada, y siendo finalmente clorurada; iii) lixiviación en áreas de recarga; iv) salinización de marismas; v) anomalías

geotérmicas en el flujo vertical; *vi*) condiciones oxidantes en las áreas de recarga y reductoras en las áreas de descarga; *vii*) tipo de cubierta vegetal dependiendo del tipo de flujo que influye en el área; *viii*) mayor vulnerabilidad a la inestabilidad del suelo en las áreas de descarga.

Ahora bien, como lo indica Tóth (1995), debido a los grandes contrastes en la conductividad hidráulica de materiales geológicos, se pueden desarrollar bruscas diferencias en las condiciones del agua subterránea en diferentes regiones y/o profundidades de una cuenca. Estos cambios generalmente son interpretados como la existencia de una separación hidráulica o el total aislamiento de parte de la estructura rocosa. Contrario a esto, la realidad indica que generalmente la estructura rocosa presenta *continuidad hidráulica*. Un cuerpo rocoso subsuperficial es considerado hidráulicamente continuo en una escala de tiempo dada, si un cambio en la carga hidráulica (o presión de poro) en cualquier punto causa un cambio en la carga (presión) en cualquier otro punto dentro de un intervalo de tiempo medido en la escala de tiempo especificada. De tal forma, se pueden clasificar en tres categorías las consecuencias de la continuidad hidráulica de las estructuras rocosas: *i*) el desarrollo de sistemas de flujos regionales y extensos, *ii*) la distribución sistemática de materia y energía, y *iii*) la interdependencia hidráulica de diferentes cuencas. Para Tóth (1995), una importante consecuencia de la continuidad hidráulica es la propagación de esfuerzos hidráulicos entre cuerpos de agua subterránea localizados en regiones geográficas distantes, en distintas profundidades y estratos, y en variadas escalas de tiempo. Un caso real de esta consecuencia se presentó en la cuenca subterránea de Kanto, Japón, donde la extracción de agua subterránea afectó los niveles freáticos de la ciudad de Tokyo en un radio superior a los 100 km, y en algunas partes causó una subsidencia del terreno superior a los 4 m.

Lo anterior lleva a considerar el agua subterránea como un agente geológico general que interactúa con el ambiente (Tóth, 1999). No considerar los componentes verticales implicados en la teoría de los sistemas de flujo, las consideraciones acerca de la continuidad hidráulica de las grandes cuencas sedimentarias, ni el papel del agua subterránea como agente geológico que interactúa con el ambiente, ha causado que,

además de las alteraciones naturales ocasionadas por un régimen hidrogeológico particular, surjan innumerables impactos ambientales de origen antropogénico que se pueden resumir en dos grupos (Carrillo-Rivera *et al.*, 1997): *i) Efectos en el agua subterránea como resultado de cambios en el ambiente hidrogeológico*, como pueden ser, cambio en el volumen de recarga, reducción de descarga acuífera a humedales y zonas costeras, procesos de contaminación en áreas de recarga, contaminación de agua subterránea desde depósitos de residuos, calidad indeseable del agua subterránea inducida por los métodos de bombeo, entre otros; y *ii) alteraciones en el ambiente externo debidos a cambios en el régimen del agua subterránea*, como el incremento de la erosión del suelo, importación de agua de otras cuencas, descenso en los niveles de agua relacionado a su vez con la desaparición de ecosistemas (freatofitas) y la consolidación de materiales formadores de acuíferos.

Por ejemplo, la relevancia de los sistemas de flujo de agua subterránea y su relación con la consolidación del esqueleto acuífero radica en la capacidad de los sistemas de flujo para variar la presión intergranular. En general, la variación de esta presión en los sistemas de flujo va de valores negativos en áreas de recarga a valores positivos en áreas de descarga. Lo anterior se refleja en la estabilidad de laderas y causes de río y su vulnerabilidad a la erosión, deslizamientos y facilidad de licuefacción de terrenos en áreas de descarga (Tóth, 1999). Los procesos que se derivan del agua subterránea se pueden manifestar en mecánica de suelos y rocas, en la formación de suelo blando por humedad, licuefacción de arena, o movimiento de masa, entre otros. Fenómenos que suceden comúnmente en áreas de descarga donde se presenta mayor presión intersticial que reduce la tensión efectiva, y el agua aumenta la lubricación intergranular. Por lo anterior estas zonas tienen alta vulnerabilidad a problemas de erosión. Asimismo, la inversión de flujos locales o regionales por la extracción, deriva en la reducción de la presión de poro y en algunas ocasiones en el reemplazo de agua fría por agua termal en la descarga, factor que podría influir en la velocidad de hundimiento de un terreno, o en la dirección de circulación del agua subterránea.

En definitiva, lo anterior expone dos componentes generalmente desconocidos o tal vez desatendidos en los estudios donde el agua subterránea es un factor predominante: *su*

dimensión espacial y su dimensión temporal. Lo anterior se concluye del carácter sistemático del funcionamiento del agua subterránea, por lo que cualquier cambio generado en un punto cualquiera del sistema (sea de tipo natural o sea provocado por el hombre), se manifestará sobre diversos ambientes y a diferentes escalas espaciales y temporales.

1.2 Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México

Diferentes investigaciones han tenido como objetivo conocer la evolución de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México. Durazo y Farvolden (1989), Ortega (1988), Edmunds *et al* (2002), entre otros, proporcionan importantes descripciones en este sentido. Para establecer esta evolución, es importante identificar, primero, las condiciones naturales del sistema, es decir las condiciones que presentaba sin la intervención de la actividad humana.

En este sentido, en este documento se basa en la idea de Ortega y Farvolden (1989), quienes hicieron la descripción de las condiciones de los sistemas de flujos en dos etapas. La primera, permite conocer las condiciones de los sistemas de flujo antes del drenado de los lagos en 1789 y del primer bombeo del sistema acuífero en 1847, es decir, cuando los sistemas de flujo presentaban un relativo equilibrio, y no tenían aun interferencia importante por parte de la sociedad. La segunda etapa permite presentar las condiciones y los diferentes cambios en el régimen natural de los sistemas de flujo de agua subterránea, a partir de la primera extracción de agua del subsuelo, hasta la actualidad.

1.2.1 Manifestaciones naturales de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México antes del primer bombeo

Las múltiples fuentes históricas permiten indicar que las partes bajas de la cuenca eran en su mayoría zonas de descarga de agua subterránea (Consejo Nacional de Investigación, 1995, Musset, 1992). En estas zonas, el agua subterránea descargaba principalmente a través de un importante número de manantiales ubicados a lo largo de

la planicie lacustre, los cuales alimentaban extensos lagos que cubrían buena parte de la cuenca.

Las crónicas históricas indican que al arribo de los primeros pobladores a la Cuenca de México era posible identificar seis grandes lagos: Chalco, Xochimilco, México, Texcoco, Zumpango y Ecatepec (*Figura 5*). En la época de la llegada de los aztecas a la planicie de la cuenca, los lagos de México y Texcoco presentaban un nivel freático alto y muy superficial, representado por grandes pantanos o humedales. En temporada de lluvias todos los lagos avenaban hacia el lago de Texcoco, el cual se localizaba en el nivel más bajo de la Cuenca. La profundidad de los lagos era en general de un metro, pero ésta aumentaba si la temporada era muy lluviosa (Mooser, 1963). Los lagos de Ecatepec, Zumpango y Texcoco presentaban agua salobre. Para evitar la mezcla de esta agua salobre con el agua dulce de los otros lagos, los aztecas construyeron una serie de diques en los lagos Xochimilco, México y Chalco. Importantes cantidades de agua de arroyos y ríos provenientes de la Sierra Nevada desembocaban en los lagos de Texcoco y Chalco. Musset (1992), con base en crónicas de los pobladores de principios del siglo XVII, indica que el lago de Xochimilco-Chalco era el más extenso, y contaba con una circunferencia de entre 80 y 100 km, mientras que la circunferencia del lago de Zumpango tenía entre 20 y 25 km.

Como se observa en la *Figura 6*, la mayor parte de manantiales que alimentaban los lagos surgían a lo largo de la planicie lacustre. Junto con estos manantiales se presentaban usualmente bosques de árboles conocidos como sabinos o ahuehetes (*Taxodium mucronatum*) pertenecientes a la familia de las freatofitas (Durazo y Farvolden, 1989). En los estudios sobre el funcionamiento del agua subterránea, este tipo de árbol es un importante indicador puesto que se desarrolla principalmente donde el flujo de agua es ascendente, el nivel freático está muy cerca de la superficie y la salinidad del agua es baja. Así mismo, era muy común observar junto o cerca de las zonas donde crecen freatofitas el desarrollo del árbol denominado ahuejote (*Salix bomplandiana*), el cual está relacionado con el aumento de la salinidad del agua (Durazo y Farvolden, 1989).

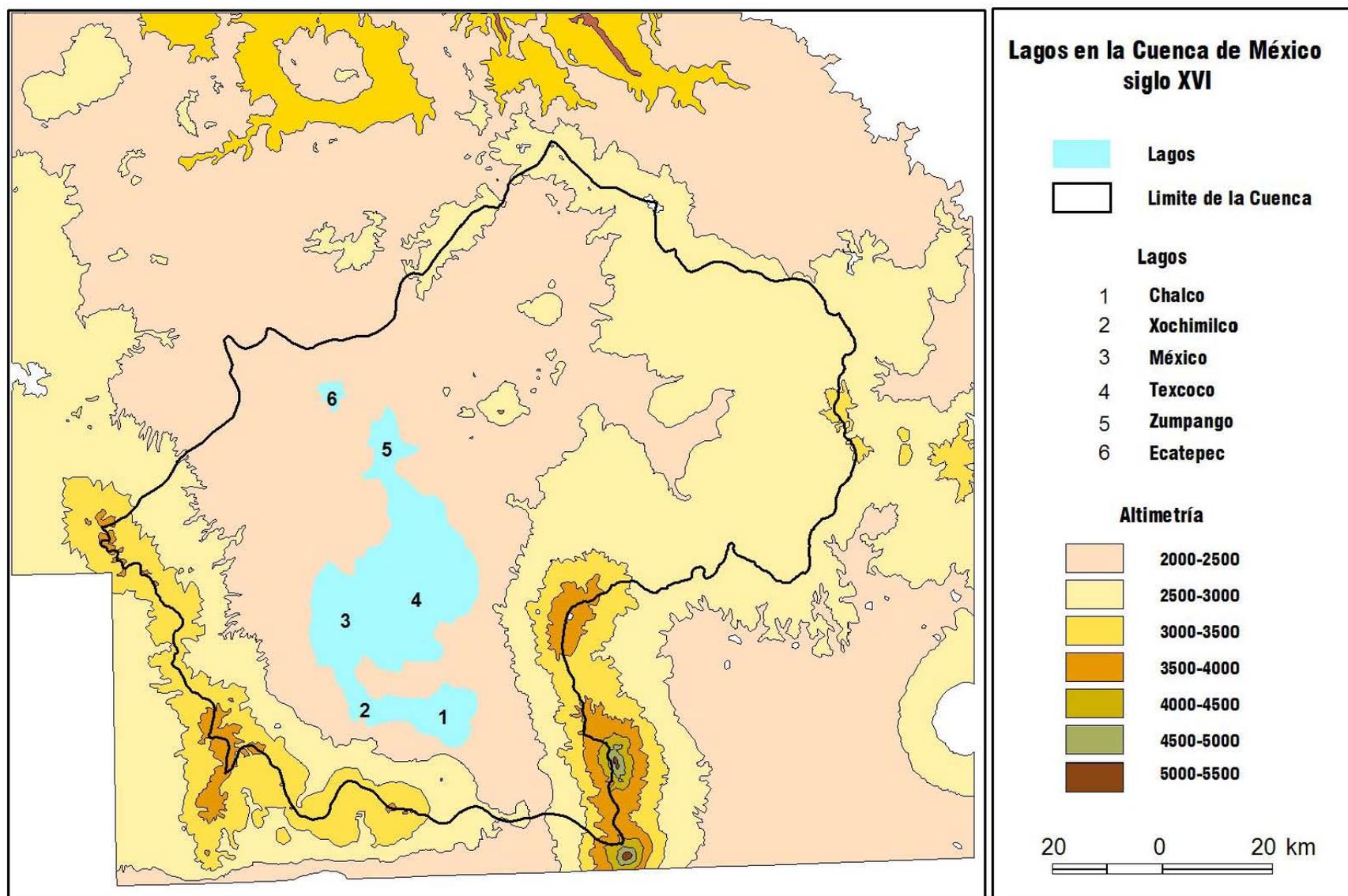


Figura 5. Principales lagos en la Cuenca de México en el siglo XVI

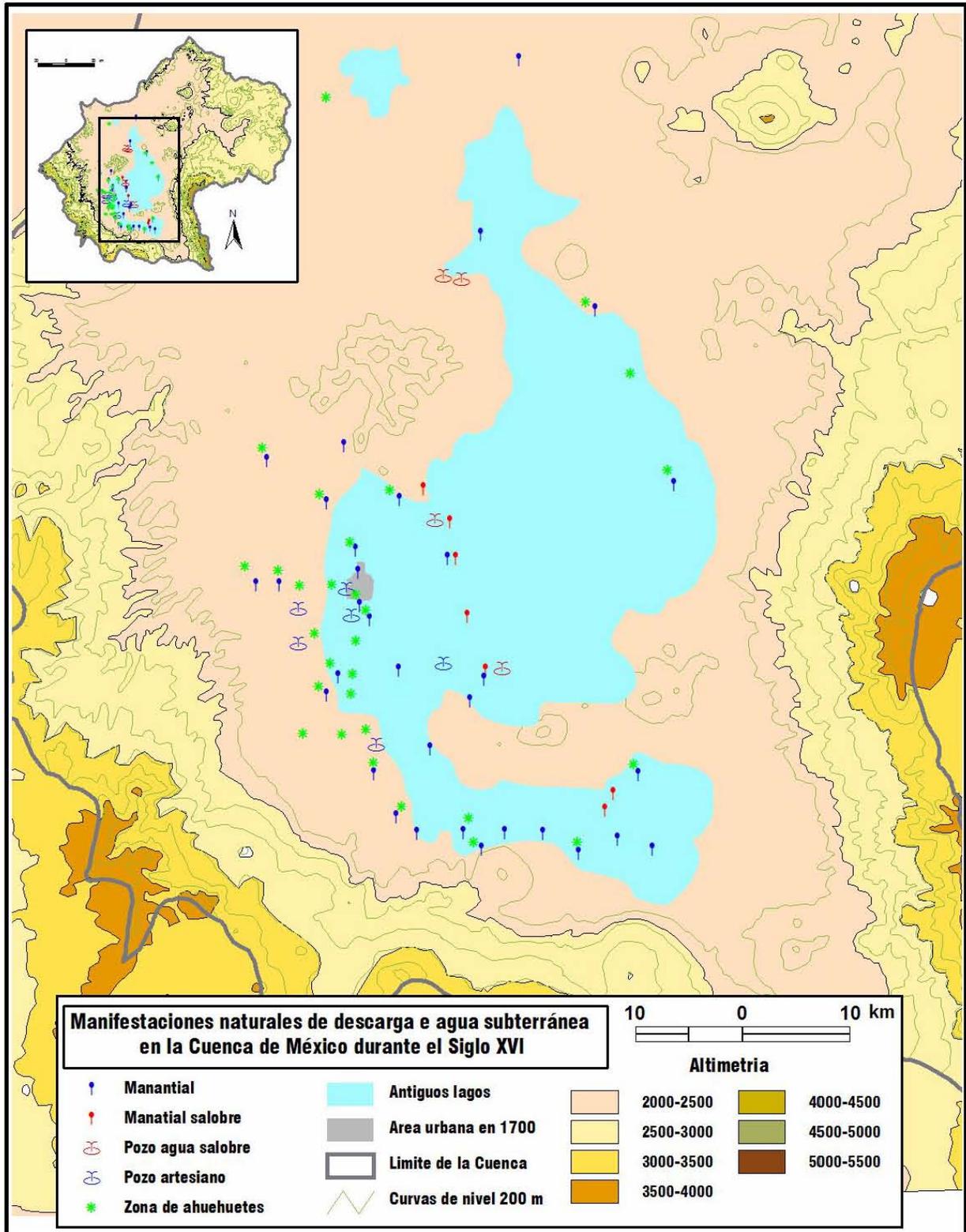


Figura 6. Manifestaciones naturales pre-bombeo de agua subterránea (Basado en: Durazo y Farvolden, 1989)

La presencia del ahuehuete era habitual en la zona de Xochimilco, donde la creación de chinampas obedeció en parte a la necesidad de evitar la salinidad del agua. Esta característica (la presencia de agua salada y dulce) fue relatada a fines del siglo XVIII por un padre capuchino, quien describió cómo pudo tomar agua dulce de un manantial que surgía en medio del agua salobre del canal de Chalco (Musset, 1992).

Otra manifestación importante del funcionamiento de los sistemas de flujo en la cuenca, fue la salmuera ubicada en el lago de Texcoco, cuya formación es debida a la descarga de agua subterránea. La relativa uniformidad vertical del contenido de sales en los depósitos de material fino que conforman el subsuelo del lago, indican que un flujo vertical ascendente de agua subterránea atravesaba estratos de roca soluble. Así mismo, cerca de lo que ahora es el aeropuerto de la ciudad de México, en lo que se denomina el Peñón de los Baños, se presentaba una importante descarga de agua termal mineralizada. El uso del agua que surgía de este manantial, actividad que remonta a la época precortesiana, estaba relacionado con propiedades curativas y medicinales (Consejo Nacional de Investigación, 1995).

Como se observa en la *figura 7*, bajo condiciones naturales el flujo de agua subterránea se dirigía desde las montañas circundantes de la Cuenca hacia las zonas más bajas de la planicie lacustre. Von Humbolt, en 1822, observó cómo después de fuertes lluvias aparecían manantiales en el suelo de la ciudad, hecho que interpretó como una respuesta del sistema de agua subterránea a la recarga de agua en las montañas (Musset, 1992). Sin embargo, a través de la Cuenca de México era posible encontrar marcados contrastes regionales en cuanto a la calidad y la cantidad de agua. Las crónicas históricas describen un noreste muy limitado en fuentes hídricas y un suroeste con abundantes fuentes. Así, gran parte de la descarga se concentraba en las zonas de Chalco, Chapultepec y el lago de Texcoco. Al norte, uno de los pocos manantiales conocidos se presentaba en Citlatepec –situado al norte del lago de Zumpango–. Las crónicas de los pobladores confirmaban la existencia de un gran manantial de agua potable y de naturaleza perenne (emanaba agua hasta en época de secas), que brotaba del suelo arenoso y que su vez alimentaba las zonas inundadas que rodeaban el pueblo (Musset, 1992).

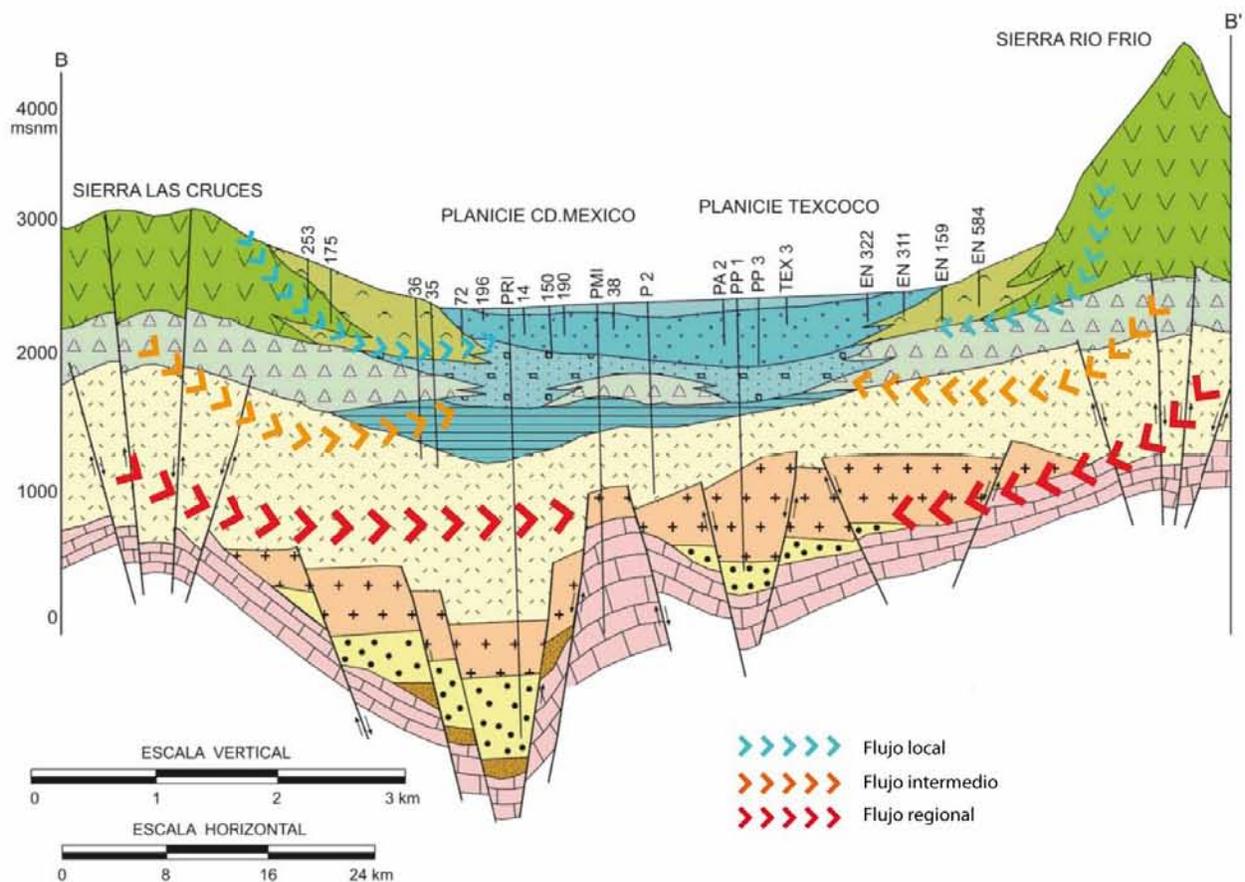


Figura 7. Circulación de los sistemas de flujo en la Cuenca de México condiciones naturales

Con el crecimiento poblacional, los habitantes comenzaron a sufrir la escasez de agua por lo cual las autoridades civiles decidieron llevar a cabo la excavación de norias y pozos superficiales en busca de agua subterránea (Musset, 1992). Musset (1992), indica que las *Relaciones Geográficas* del siglo XVI revelan la existencia de pozos superficiales y norias en Hueypohtla, Tianguistongo y Xomayucan al norte de la Cuenca. Como estos pozos fueron excavados en zonas de tránsito de agua subterránea, no era fácil alcanzar el nivel freático. Es por esto que la práctica más común fue la excavación de pozos en las inmediaciones de cuerpos superficiales de agua. Tal es el caso de los perforados en Chiconautla, Texcoco, Tequiztlan o Chicoaloapan.

En el año de 1847, usando tecnología de la nascente industria petrolera, se perforó por primera vez en México un pozo profundo. La perforación alcanzó una profundidad de 40 m y atravesó una capa de material de grano muy fino (tipo arcilla) de donde se obtuvo agua de excelente calidad y de flujo artesiano, por lo que se construyeron unos 200 pozos adicionales. El nivel piezométrico tenía un promedio de 2.7 m sobre la superficie del terreno. Esta condición piezométrica se encontró también en la zona del lago de Texcoco, y en la zona de Zumpango. En ambos lugares se reportó agua con alta concentración de sales. En la parte sur de la cuenca, en Xochimilco y Chalco no se perforaron pozos, puesto que las zonas permanecían inundadas, y el agua se podía obtener fácilmente de los manantiales existentes (Durazo y Farvolden, 1989).

1.2.2 Manifestaciones presentes de las condiciones de agua subterránea

La conformación de diferentes centros urbanos aumentó la necesidad de satisfacer necesidades básicas de agua en la Cuenca de México, problemática que venían ya de la época precolombina, y que se agravó en la colonia. A fines del siglo XIX e inclusive al principio del siglo XX, la municipalidad de la ciudad abastecía la mayoría de las necesidades de agua potable de la población con la obtenida en los manantiales existentes. Un buen número de manantiales se observaban en la Cuenca aun después del drenaje de los lagos. De hecho, como lo indican Durazo y Farvolden (1989) los manantiales localizados en las márgenes de la planicie lacustre provocaron las inundaciones de 1920.

En la década de los años 1930 y 1940 se incrementó la dotación de agua de la ciudad mediante la perforación de pozos profundos, y se mejoraron las condiciones de los manantiales en la sierra de las Cruces (Bribiesca, 1960b). No obstante, debido al abatimiento del nivel piezométrico, algunos de los pozos existentes debieron ser profundizados a profundidades superiores a los 40 m (Bribiesca, 1960a). Si bien a mediados de los años 1930 los pozos profundos eran usados casi exclusivamente para suplir necesidades de tipo industrial, en 1936 la ciudad generalizó su uso para abastecer a la población. Molina-Berbeyer (citado por Durazo y Farvolden, 1989), reporta que en la zona del lago de Texcoco, en los pozos perforados a 80 m de

profundidad el nivel freático se encontraba entre 3 y 7 m sobre la superficie del suelo. En el periodo de 1940 a 1946, un total de 58 pozos, aun de tipo artesiano, proveían a la ciudad un volumen diario estimado de 234.64 m³ (Bribiesca, 1960b).

Al principio de la década de los años 1950, el análisis de la información recogida de piezómetros instalados por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México mostraba condiciones de flujo ascendente en casi todas las localidades medidas. Aun en la década de los años 1980, el análisis de la carga hidráulica en 285 pozos de producción en el área metropolitana, mostraba que a nivel regional, los sistemas de flujos presentan la misma disposición, siguiendo la tendencia que tenían los sistemas de flujos de la cuenca en condiciones naturales como se indicó en el numeral 1.2.1 (Ortega, 1988). No obstante, el bombeo intensivo de los últimos 50 años, ha cambiando progresivamente los gradientes hidráulicos locales, resultando por ejemplo, en el incremento de la velocidad de movimiento del agua subterránea a lo largo de la dirección del flujo (Edmunds *et al.*, 2002). Así mismo, en otros lugares el gradiente ascendente del flujo de agua subterránea, que le daba a la planicie lacustre la característica de zona de descarga, se ha invertido, y ahora es descendente al menos en buena parte de dicha planicie. Lo anterior ha causado la desaparición de gran parte de los manantiales de la planicie lacustre. Actualmente, es posible encontrar algunos manantiales pequeños al pie de la sierra Nevada a unos 2,800 m snm, los cuales son utilizados para abastecer a pequeñas poblaciones (Ortega, 1988).

Por otra parte, es importante resaltar cómo en el antiguo lago de Chalco, se presentan aún grandes lagunas naturales asociadas con la descarga de agua subterránea. Un ejemplo concreto es la laguna de Xico que a fines de la década de los años 1980 era aún perenne (Ortega, 1988) y cuyos análisis físicos-químicos indicaban un agua con alto contenido de sales de tipo sulfuroso (Durazo y Farvolden, 1989). Las mediciones piezométricas hechas por Ortega (1988), indicaron gradientes ascendentes, y de hecho reportó que la carga hidráulica a 2 m de profundidad, estaba 0.3 m por encima del nivel de la laguna. Al parecer esta parte de la planicie lacustre es la única donde se ha demostrado que aún existe, un flujo ascendente a través de la capa lacustre, funcionando así como zona de descarga.

1.2.3 *Sistemas de flujos en la cuenca de México: Identificación de las zonas de descarga*

Como lo indica la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 1962, 1995), el movimiento del agua subterránea es controlado por la adición de diferentes condiciones: la carga hidráulica, la variación de la litología y la estructura geológica. Bajo condiciones naturales, la recarga en la Cuenca de México, ocurría en áreas altas y permeables en los alrededores de la cuenca y la descarga se daba por medio de manantiales en los límites de la planicie lacustre, a través de los sedimentos lacustres hacia el centro de la planicie, y por evaporación a través del lago de Texcoco. Esta última se caracterizaba por una alta carga hidráulica, y un alto contenido de minerales (Hernández García y Carrillo-Rivera, 1997) (Edmunds *et al.*, 2002).

Después de medio siglo de extracción intensiva, la presión artesiana en el sistema de agua subterránea de la cuenca ha descendido y las manifestaciones naturales de la descarga se han reducido a unos pocos manantiales en el piedemonte de algunas de las montañas que rodean la cuenca. Excepto por la evapotranspiración natural, el flujo de descarga de agua subterránea es posiblemente poco significativo. La extracción intensa generó un cambio de condiciones confinadas a no confinadas (o libres) ya que la superficie potenciométrica está ahora a unos 30 m por debajo del nivel de la base del acuitardo en una superficie importante y creciente con el tiempo (Edmunds *et al.*, 2002).

Actualmente el flujo de agua subterránea en el plano horizontal tiene patrones similares a las condiciones originales pre-bombeo, es decir tiene una dirección general desde las montañas que rodean la cuenca hacia la planicie lacustre (*Figura 8*), con la diferencia de que el flujo se desplazó hacia las zonas donde se presenta la principal reducción de la carga hidráulica, producto de la gran cantidad de extracción de agua, principalmente hacia Azcapotzalco al norte, Coyoacán, y Tlalpan en el sur (Hernández García y Carrillo-Rivera, 1997). La reducción de la carga hidráulica, se ha estimado en cerca de 1 m/año, y ya no se presenta una descarga regional natural y directa del agua subterránea (es decir a través del flujo base de ríos, de la presencia de manantiales o humedales). La evapotranspiración es la única forma de descarga en la planicie lacustre (Edmunds *et al.*, 2002).

La infiltración acaecida en la zona de montaña se descarga por medio de flujos locales formando manantiales en las partes altas, y en el piedemonte. Otros flujos de tipo intermedio y regional se forman o provienen de distancias y de recorridos de mayor profundidad, y pueden tener descarga en manantiales cerca de la frontera de la planicie lacustre, a través del acuitardo o por medio de los planos de las fallas geológicas definidas en el lago de Texcoco. Por ejemplo, Ortega (1998), indica que el agua infiltrada en la sierra del Chichinautzin puede descargar entre los sedimentos lacustres a unos 5 a 8 km hacia el centro de la planicie y como manantiales en una estrecha zona cercana a la base de las montañas.

Como lo indica Tóth (1999), cada sistema de flujo puede desarrollar diferentes firmas hidrogeoquímicas, de acuerdo con la litología, profundidad de recorrido y el tiempo de residencia. Así, el agua subterránea presente en las montañas y en los piedemontes, presenta baja concentración de sólidos totales disueltos (iones mayores), baja temperatura, pH ácido y alto contenido de oxígeno disuelto, con respecto al agua subterránea que se descarga en los niveles altimétricos más bajos. Estas características evolucionan a medida que el flujo se torna intermedio y se hacen más contrastantes si el flujo es de tipo regional (ver *Figura 4*). La descarga principal de cualquiera de estos flujos se da en la zona más baja de la planicie. En este sentido las zonas del lago de Texcoco y de Chalco, pueden ser consideradas como los principales centros de descarga de agua subterránea en la cuenca de México. La acumulación de sales en el lago de Texcoco es por mucho el resultado de la evaporación de agua subterránea (Rudolph *et al.*, 1989). La alta cantidad de sales que presenta el agua en esa área, en relación con el bajo contenido de sales disueltas de los afluentes de agua superficial que provienen de las montañas del este de la cuenca, y que son generalmente controlados por descargas de flujos locales, permite identificar un fuerte contraste de concentración salina en corta distancia (Consejo Nacional de Investigación, 1995). Lo anterior sugiere la existencia de flujos intermedios de agua subterránea. Así mismo, como lo indica Ortega (1988), piezómetros instalados en la región de Chalco han mostrado alta concentración iónica de cloruro, bicarbonato y sodio en el agua subterránea presente entre los 200 y 400 m de profundidad, lo que sugiere la presencia de flujos de jerarquía mayor a la local.

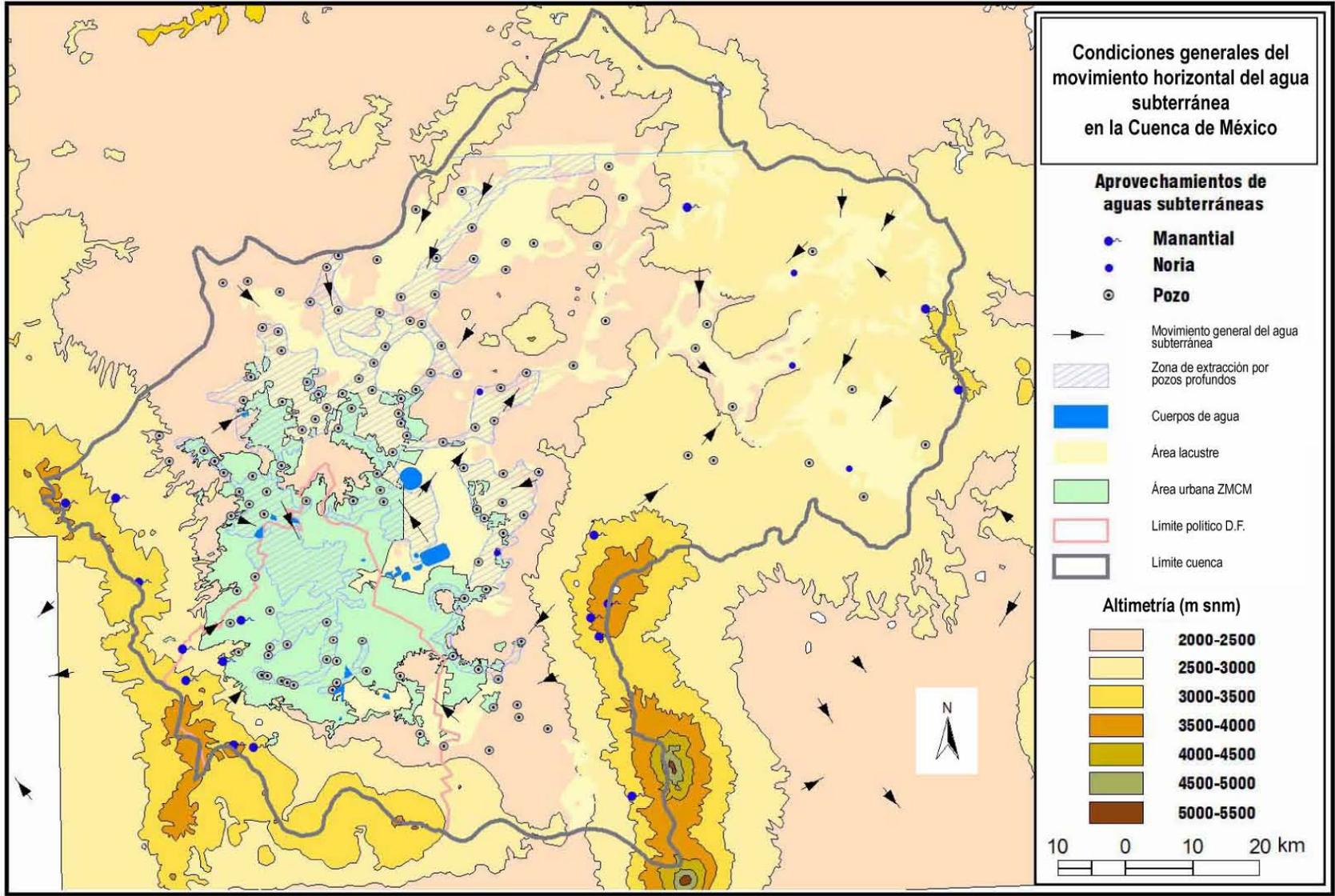


Figura 8. Dirección general de movimiento del agua subterránea en la Cuenca de México (Adaptado de: INEGI, 2002).

El agua subterránea de la sección media de la Cuenca muestra un incremento en la temperatura y la salinidad (Edmunds *et al.*, 2002). Edmunds *et al.* (2002), indican que es muy probable que esta agua se esté obteniendo de un flujo regional, que generalmente no es considerado en los modelos de comportamiento hidráulico que se han implementado para la cuenca (o parte de ésta), los cuales invocan usualmente condiciones relacionadas con el flujo en el plano horizontal, ignorando respuestas del sistema que sólo pueden ser interpretadas mediante los datos de la química del agua subterránea. Estos flujos pueden estar relacionados con el manantial que se encontraba en el Peñón de los Baños y que existió hasta los años 1960. En 1882, Puga (citado por Huizar-Alvarez *et al.*, 2004) midió la temperatura del agua de este manantial, obteniendo valores que variaron entre 44.5°C y 46°C con un contenido de NaCl de 987.5 mg/l.

En la actualidad, la obtención de agua en esa zona se realiza por medio de un pozo, donde Edmunds *et al.* (2002) y Huizar-Álvarez (2004) midieron en el agua subterránea una temperatura de 44°C (en términos prácticos la misma temperatura obtenida por Purga) y un alto contenido de sales (sólidos totales disueltos, 2,535 mg/l; Cl, 650 mg/l; Ca, 25.7 mg/l; Mg, 190 mg/l, Na, 632 mg/l). Lo anterior se interpreta como una extensiva interacción agua-roca en la profundidad del sistema. Igualmente, la alta concentración de K (71 mg/l) indica una progresiva reacción del agua con minerales de la secuencia volcánica (Edmunds *et al.*, 2002). Por otro lado, mediante el geotermómetro de sílice se ha calculado que la temperatura mínima de equilibrio a profundidad es de 163°C, lo que sugiere que este flujo alcanza una profundidad de 2,500 m (utilizando un gradiente geotérmico de 3.16°C/100 m). La evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en la Cuenca de México, permite deducir que el agua termal del Peñón de los Baños está relacionada con una importante fuente de agua profunda originada en flujos de tipo regional, inducida por la extracción intensiva llevada a cabo en esta zona (Edmunds *et al.*, 2002).

En general, las zonas de descarga subterránea están concentradas en la planicie lacustre y a lo largo de la margen de ésta. Así, se pueden identificar tres zonas generales de descarga de flujos de agua subterránea (*Figura 9*):

Zonas de descarga de flujos locales. Ubicada principalmente hacia el suroeste de la cuenca, se presentan manantiales en las partes montañosas y límite de la planicie lacustre. Los estudios hidrogeoquímicos (Edmunds *et al.*, 2002, Huizar-Alvarez *et al.*, 2004), indican baja concentración de sólidos totales disueltos (180 mg/l) y de iones mayores (Cl, 5-9 mg/l; Ca, 9-17 mg/l; Mg, 8-13 mg/l, K, 4-5 mg/l). La concentración típica de la actividades del radiocarbono, expresada en porcentaje de carbón moderno (pcm), se encuentra entre los 81 y los 51 pcm, estos valores de carbono¹⁴ indican un agua subterránea moderna (Edmunds *et al.*, 2002)

Zonas de descarga de flujos intermedios. Se ubica hacia el centro de la planicie lacustre, principalmente en la zona del antiguo lago de Texcoco. El agua subterránea encontrada a 30 m de profundidad tiene alta concentración salina y presenta evidencia de efectos de la evaporación lacustre en la cuenca (Rudolph *et al.*, 1989). La concentración de Cl en esta zona está entre 25 y 100 mg/l. Los análisis isotópicos de carbono⁻¹⁴ (50.9 y 53.8 pmc), sugieren que la edad de recorrido de los flujos de agua subterránea que descargan en esta área puede llegar a los 3,000 años (Edmunds *et al.*, 2002).

Zona de descarga de flujo regional. Este flujo se pueden identificar entre los conos volcánicos del Terciario, sobre la línea noreste-sureste desde la sierra de Guadalupe a la sierra de Santa Catarina en lo que se llamaba el Peñón de los Baños donde, como se indicó anteriormente, se presentaban hace más de 20 años tres importantes manantiales que producían agua termal con alto contenido en sales. El agua extraída actualmente por medio de pozos, indica temperatura superior a los 40°C. Según análisis isotópicos de carbono⁻¹⁴ (de 2 a 12 pcm), este flujo pueden tener una edad superior a los 6,000 años (Edmunds *et al.*, 2002). Otra característica importante, es también, el alto contenido de K, Mg y Ca, así como la alta concentración de B y Li lo que le imprimen una característica de flujo regional.

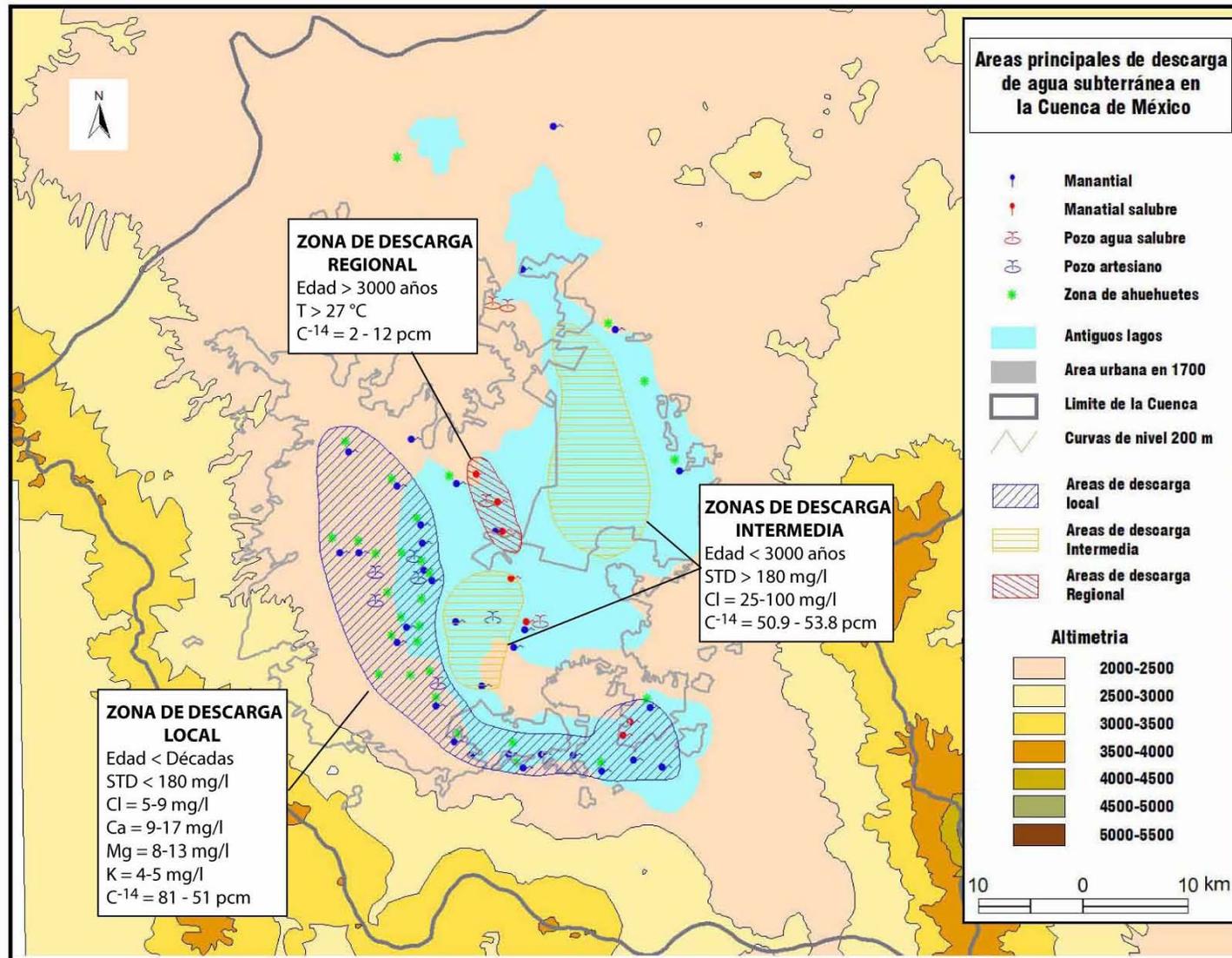


Figura 9. Principales zonas de descarga de agua subterránea en la Cuenca de México (Adaptado de: Durazo y Farvolden, 1989, Edmunds et al., 2002, Ortega, 1988)

2 EL PAPEL DE DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA EVOLUCIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La Cuenca de México es una extensa zona donde descargan diversos tipos de flujos de agua subterránea. La diversidad de la descarga se ve claramente representada en la conformación ambiental de la cuenca, factor que ha sido determinante en la conformación espacial de los asentamientos poblacionales, así como también, en muchas de las tendencias urbanas de la evolución de la Ciudad de México.

Gracias al desarrollo de ciertas tecnologías de aprovisionamiento, los habitantes de la Cuenca lograron rebasar el determinismo impuesto por las condiciones ambientales para acceder al agua. No obstante, paralelamente a estos avances tecnológicos, los habitantes han debido enfrentar crecientes dificultades para acceder al agua potable y para evitar las innumerables manifestaciones ambientales negativas que han hecho su aparición con la explotación del agua subterránea.

Como se verá en este capítulo, existe una importante relación entre la evolución de la ciudad y los sistemas de flujo de agua subterránea. En esta relación es posible distinguir tres períodos determinantes: *i)* un primer período, durante el cual el acceso al agua fue condicionado por la proximidad de fuentes de descarga de agua subterránea, principalmente los manantiales; *ii)* un segundo período, en el cual la perforación de pozos y la distribución del agua por medio de tuberías y canales generaron importantes cambios en la ocupación poblacional del espacio; y finalmente, *iii)* un tercer período, caracterizado por un fuerte crecimiento de la población y el comienzo de la importación de agua desde cuencas externas, ampliando la influencia de la Ciudad de México a otras regiones.

2.1 Los sistemas de flujo de agua subterránea y la polarización ambiental de la Cuenca de México

La evolución de la Ciudad de México ha sido ampliamente estudiada por numerosos autores (Aguilar, 1999, 2003, Delgado, 1988, 2003, Delgado *et al.*,

1999, Garza, 1987, Unikel *et al.*, 1978). Una visión interesante es la presentada en el artículo titulado “*Grandes tendencias de la expansión urbana de la Ciudad de México*” (Delgado *et al.*, 1999). En esta investigación los autores compilan diferentes reflexiones sobre la expansión de la ciudad distinguiendo cuatro grandes grupos de factores de la expansión urbana: los factores de tipo histórico, los cambios económicos, los procesos de expansión y de densificación de la ciudad, y los aportes de la sociología y de la antropología.

Es interesante retomar de este documento, el grupo de factores relativo a los hechos históricos, el poblamiento antiguo y la segregación espacial. Al respecto, los autores indican que desde el punto de vista histórico, fueron factores importantes en la expansión de la ciudad, *i)* los núcleos urbanos y la red de asentamientos que existían en la Cuenca de México antes de la conquista, y *ii)* la polarización socio-espacial de estos asentamientos debida a las condiciones históricas y ambientales.

Como se explicó en la sección anterior, el funcionamiento general de los sistemas de flujo en la cuenca, permite identificar tres zonas importantes de descarga de agua subterránea (*Figura 9*): una basta zona en la parte baja de las sierras del suroeste de la cuenca, donde flujos de agua subterránea locales se descargan en grandes cantidades y con buena calidad fisicoquímica para el consumo humano; y otras dos zonas hacia el centro-norte y este de la cuenca donde descargan flujos intermedios y regionales, con condiciones menos aptas para el consumo humano. Esta distribución espacial de las descargas de agua subterránea en la cuenca, dividió la ciudad en dos (Delgado *et al.*, 1999), entre un oeste con fácil acceso a agua de buena calidad y en cantidades considerables, y un este caracterizado por la presencia de aguas salobres y condiciones ambientales difíciles para la conformación de asentamientos humanos.

La división ambiental de la Cuenca, repercutió en los desarrollos urbanos que fueron surgiendo. Como lo indica López de la Rosa (2003), los primeros indicios de asentamientos urbanos en la cuenca tienen más de 2000 años. Al parecer, durante ese tiempo el grueso de la población de la cuenca se concentraba en los

núcleos urbanos de Cuicuilco, Teotihuacan, Tula y Tenochtitlan. En un principio, la ubicación de estos asentamientos, fue en gran parte resultado de las condiciones ambientales en un lugar determinado y lo propicias que fueran estas para habitar. Entre estas condiciones ambientales, era primordial la presencia de agua tanto en cantidades como en condiciones físico-químicas aceptables para el consumo humano. Delgado, *et al*, (1999) indican que estos centros configuraron una extensa red de asentamientos, con relaciones sociales, políticas y económicas muy estrechas. Esta red ha sido un factor determinante en la conformación actual de la Ciudad de México y en muchas de las tendencias actuales de expansión (Delgado *et al.*, 1999).

Para los primeros pobladores de la Cuenca la presencia de agua en el área donde se establecía un asentamiento era un factor de gran importancia y así lo expresaban en la manera de denominar los centros urbanos. Por ejemplo, Luís Reyes (citado por López de la Rosa, 2003 :57) evoca el significado de la palabra náhuatl “*Altépetl*”, que era el termino utilizado por los indígenas para denominar los centros de mediano tamaño:

“*Altépetl* se ha traducido normalmente como pueblo, aunque en náhuatl es una contracción de *yn atl yn tepetl*, difrasismo que significa “el agua, el cerro”, refiriéndose a dos elementos necesarios para que un sitio fuera habitable...”

Otro ejemplo concreto es la palabra “*Tollan*”, utilizada para denominar las poblaciones más prestigiosas de la cuenca. León-Portilla (citado por López de la Rosa, 2003 :66) da la siguiente descripción de esta palabra:

“En múltiples relaciones indígenas encontramos el vocablo *Tollan*, que literalmente significa ‘*en el lugar de espadañas o tules*’. Dicho término, sin embargo, en el contexto en cuestión, adquiere un sentido metafórico. Designa sitios donde abundan agua y vegetación. Su semántica culminó al fin como expresión del ámbito más adecuado de asentamiento para la comunidad, hasta llegar a significar la idea de población grande y floreciente, ciudad y metrópoli. Se habla de Tollan Teotihuacán, Tollan

Chollolan, Tollan Xocotitlan, Tollan Culhuacan..., (es decir) las ciudades de Teotihuacán, de Cholula, de Xocoititlan y de Culhuacan.”

De esta manera, la relación entre el funcionamiento de los flujos de agua subterránea en la cuenca y las condiciones físico-ambientales que generaron, jugaron un papel preponderante en la configuración de los espacios urbanos prehispánicos y en la correspondiente evolución de emplazamientos poblacionales. Por ejemplo, la presencia de manantiales fue un factor determinante en la ubicación de los principales asentamientos humanos (Musset, 1992). Como ya se explicó con anterioridad, en la época prehispánica los manantiales eran numerosos y con un abundante caudal en buena parte de la cuenca. Para las sociedades que habitaron en la región, éstos constituían la principal fuente de agua potable. Un gran número de asentamientos precortesianos se establecieron en cercanías del piedemonte, donde flujos locales descargaban en manantiales. Así mismo, los centros de población más notables, se ubicaron en las riveras de los lagos (Consejo Nacional de Investigación, 1995), aprovechando en su conjunto la descarga de agua subterránea que se presentaba en diversos lugares de los márgenes de la planicie lacustre. Como lo indica López de la Rosa (2003), los primeros asentamientos en la cuenca fueron pequeños grupos de vecindades que se formaron entre los años 1,500 y 1,200 a.C.. Estos asentamientos, denominados por los indios de la Cuenca como “*calpulli*” se presentaban principalmente en Xochimilco y Chalco, zonas donde las evidencias físicas indican descarga local abundante de agua subterránea. Estos sectores contaban con aguas en calidad y cantidad suficiente, era común el desarrollo de importantes ecosistemas, y en general las condiciones ambientales requeridas para los nuevos asentamientos humanos eran las necesarias. Aunque más adelante, en el periodo comprendido entre los años 700 y 300 a.C., algunos asentamientos ya aparecían al norte del lago de Texcoco, la mayoría de las poblaciones se ubicaban en la zona de Chalco y Xochimilco. De hecho, en este periodo y en esta parte de la cuenca, nació Cuicuico, el cual sería el primer “*altepec*” o pueblo de la región. Se estima en cerca de 5,000 el número de habitantes con los que contaba (López de la Rosa, 2003).

Mas adelante, a partir del año 200 a.C. aproximadamente, un importante numero de asentamientos hicieron aparición en la parte norte de los lagos, en la zona de Teotihuacan. Una explicación probable, es el desplazamiento masivo de población del sur hacia el norte de la cuenca a causa de la erupción del volcán Popocatepetl, ocurrida entre el año 800 y 215 a.C. (Macías, 2006). Es factible que este evento haya impulsado una primera polarización regional de la cuenca, distribuyendo la población principalmente entre Cuicuilco –que contaba con las abundantes fuentes de la zona de Chalco y Xochimilco –, y Teotihuacan que dominaba las salmueras ubicadas hacia el centro y norte de la cuenca, y que se formaron gracias a la descarga de flujos intermedios y regionales. Durante los siguientes 500 años, Teotihuacan aumentaría de manera importante su talla e influencia, convirtiéndose en el centro más importante de la región. López (2003) indica que Teotihuacan llegó a ser lo que los indios denominaban un “*Hueyaltépetl*” o gran asentamiento, que en la época de su mayor apogeo pudo concentrar una población cercana a los 80,000 habitantes.

La erupción del volcán Xitle, ubicado en la parte baja del Ajusco, en el curso del siglo cuarto de nuestra era (López de la Rosa, 2003), provoco la desaparición de Cuicuilco, y es probable que haya tenido repercusiones importantes en el funcionamiento de los sistemas de flujos de agua subterránea de la cuenca, y por ende, en los ecosistemas relacionados con estos. Como lo indica López de la Rosa (2003), la zona más afectada fue la de Chalco-Xochimilco, que hasta entonces era una de las zonas de la cuenca con mayores fuentes de obtención de agua potable, y una de las más ricas en ecosistemas aprovechables por los pobladores. El impacto de este evento sobre el equilibrio ambiental de la región fue considerable, y provocó un nuevo desplazamiento masivo de la población que habitaba en la zona de influencia de Cuicuilco hacia Teotihuacan, la cual con un clima mucho más árido y con reducidas fuentes de agua potable, no contaba con los recursos ambientales suficientes para recibir la nueva población. Las consecuencias fueron la escasez general de alimentos y el surgimiento de epidemias, que con el paso de los años desencadenaron en la decadencia de Teotihuacan. El resultado fue que una importante cantidad de la población se

disgregó hacia otros centros poblacionales, muchos fuera de la cuenca (López de la Rosa, 2003).

Si bien, los diferentes eventos volcánicos y la decadencia de Teotihuacan provocaron la dispersión de una buena parte de la población, la mayor parte se concentro en nuevos centros urbanos que se consolidaron principalmente al sur, aprovechando la abundancia de fuentes hídricas y de ecosistemas relacionados. Entre estos se pueden evocar los “*altépetl*” de Azcapotzalco, Iztapalapa, Chalco, Tlatelolco y Tenochtitlan. En el siglo XII de nuestra era, llegan a la cuenca los aztecas, quienes, aprovechando la existencia de varios manantiales, se asentaron en Chapultepec (Consejo Nacional de Investigación, 1995). En 1325, estos se desplazaron a unas pequeñas islas en el lago para fundar la ciudad de Tenochtitlan, desde donde continuaron aprovechando manantiales cercanos para abastecerse de agua potable. Para los aztecas el acceso al agua era muy importante, y de hecho, la utilizaban en gran cantidad en su vida cotidiana. En contraste con las costumbres de los conquistadores, estos acostumbraban el baño diario, lavaban sus ropas regularmente, como también las calles de la ciudad (Consejo Nacional de Investigación, 1995). El rápido crecimiento de asentamientos Aztecas, aumentó también las necesidades de agua, por lo cual en 1424, iniciaron una guerra contra otras tribus con el objetivo de lograr el control de los manantiales de Chapultepec, Coyoacán y Xochimilco. Posteriormente crearon calzadas, y a lo largo de éstas, canales, con el fin de llevar el agua hacia la gran Tenochtitlan (Durazo y Farvolden, 1989). Aun tres siglos después, ya en la época de la colonia, la municipalidad de la ciudad continuaba usando varios de los manantiales usados por los aztecas, para suministrar agua potable a la población.

A su llegada a la Cuenca de México en 1519, los españoles iniciaron un proceso de consolidación basado en los asentamientos ya existentes. Así, y como lo indican Delgado, *et al.* (1999), los conquistadores heredaron la estructura de asentamientos prehispánica y su eterna división territorial “... *entre un sur fértil y un norte árido que con los años se convirtió en zona de emplazamiento industrial*”. Como se vera en la siguiente parte, los españoles a su llegada siguieron de

manera involuntaria la concepción indígena sobre los elementos necesarios para que un sitio fuera habitable: agua, cerro y vegetación abundante.

2.2 El arribo de los españoles a la Cuenca de México: la herencia de la polarización espacial

La llegada de los españoles a la cuenca, fue también la llegada de una nueva forma de comprender el medio natural (Musset, 1992). Como lo indica Musset (1992), en la Cuenca de México “...*el agua ha sido lo que se ventila en un enfrentamiento plurisecular entre dos civilizaciones opuestas por entero, la de los españoles y la de los indios*”. Los indios, antiguos habitantes de la región, intentaron con innumerables dificultades la no fácil tarea de adaptarse a su ambiente. Por el contrario, los españoles intentaron adaptar el ambiente natural a su forma de vida.

Eran visiones diferentes. Por una parte, en la concepción urbana de los aztecas, el ideal era vivir en un medio lacustre, imitando su modelo mítico de vida insular¹. De esa manera los aztecas iniciaron Tenochtitlan, y la hicieron evolucionar acomodándola al medio y desarrollando tecnologías constructivas que se lo permitieron. Como lo dice Musset (1992:170):

“La capital azteca no tenía, sin embargo, el aspecto tradicional de una ciudad lacustre formada por palafitos: las descripciones hechas por los españoles no hablan de casas edificadas sobre pilotes (...). En el caso de la antigua Tenochtitlan, el centro de culto estaba situado en un islote, pero los barrios residenciales estaban construidos sobre la laguna (...), la estructura urbana de Tenochtitlan estaba adaptada al medio lacustre y sus habitantes continuaron por largo tiempo, después de la conquista viviendo al ritmo de los lagos”

Por el contrario, para los españoles el agua que rodeaba la ciudad era un problema y sus conocimientos tecnológicos no eran apropiados para enfrentar

¹ Como lo indica Musset (1992), entre los aztecas existía el mito de “la isla original” o “*Aztlán*”, el cual equivaldría al paraíso. Eso explicaría, la elección de los islotes del lago de México para iniciar la construcción de Tenochtitlan.

este tipo de medio natural. En un sentido más profundo, en la mentalidad de los conquistadores, las aguas estancadas representaban enfermedad y epidemia (Musset, 1992). Sin embargo, la conformación de los emplazamientos humanos de la cuenca de México durante el periodo colonial, fue el reflejo de la distribución de los antiguos asentamientos. A pesar de que el modelo urbano español no encajaba con el modelo urbano indígena, los conquistadores decidieron aprovechar las poblaciones indígenas más importantes para comenzar el proceso de expansión conquistador, heredando de paso, la división de la Cuenca. Así, cuando los españoles llegan a la Cuenca de México, Tenochtitlan era la ciudad indígena más importante, y en ella se concentraban el poder político y económico de la región. La imagen de poder de esta ciudad azteca, era crucial para facilitar la consolidación de los españoles como los nuevos gobernantes. Por esta razón, los conquistadores decidieron asentarse en Tenochtitlan y afrontar aquel medio lacustre tan contrario a su ideal urbano.

Sin embargo, como lo indica Musset (1992:170) “... *dos sistemas de pensamiento desembocan en soluciones diferentes en la gestión de un mismo espacio*”. Es así que los españoles, se dieron a la tarea de drenar los lagos que rodeaban la ciudad, proceso que comenzarían en el siglo XVI y no culminarían sino hasta después de finales del siglo XIX. Este cambio drástico en la manera de gestionar el mismo entorno, generó nuevos esquemas de expansión de la ciudad y a largo término provocó la aparición paulatina de innumerables manifestaciones ambientales poco deseadas por los habitantes, entre las cuales, los cambios relacionados con el agua subterránea fueron predominantes.

Antes del drenado de los lagos, los asentamientos se dispersaban en torno a ellos. Con el drenado, este esquema se transformó en un crecimiento constante del área urbana en torno a la antigua Tenochtitlan, extendiéndose sobre la planicie lacustre (*Figura 10*). Como se puede ver en la *Figura 10*, la tendencia de crecimiento de la ciudad fue generalmente hacia el oeste y suroeste de la cuenca, buscando siempre beneficiarse de la descarga natural de agua subterránea. La zona que presentaba las descargas más abundantes, de más fácil acceso y de mejor

calidad era la zona de descarga local, donde se encontraban los manantiales de Chapultepec al oeste y de Xochimilco y Chalco al sur. Durante los primeros 500 años después de la conquista, el proceso de expansión se vio restringido por la dificultad en el drenado de los lagos y las fuertes inundaciones que en varias ocasiones sobrellevaron los habitantes de la ciudad. Una vez lograda la desecación de la planicie lacustre y gracias a nuevas tecnologías –entre las cuales está la perforación de pozos profundos y la capacidad de abastecerse con el agua subterránea –, desapareció de forma importante el determinismo que limitaba el crecimiento de la ciudad.

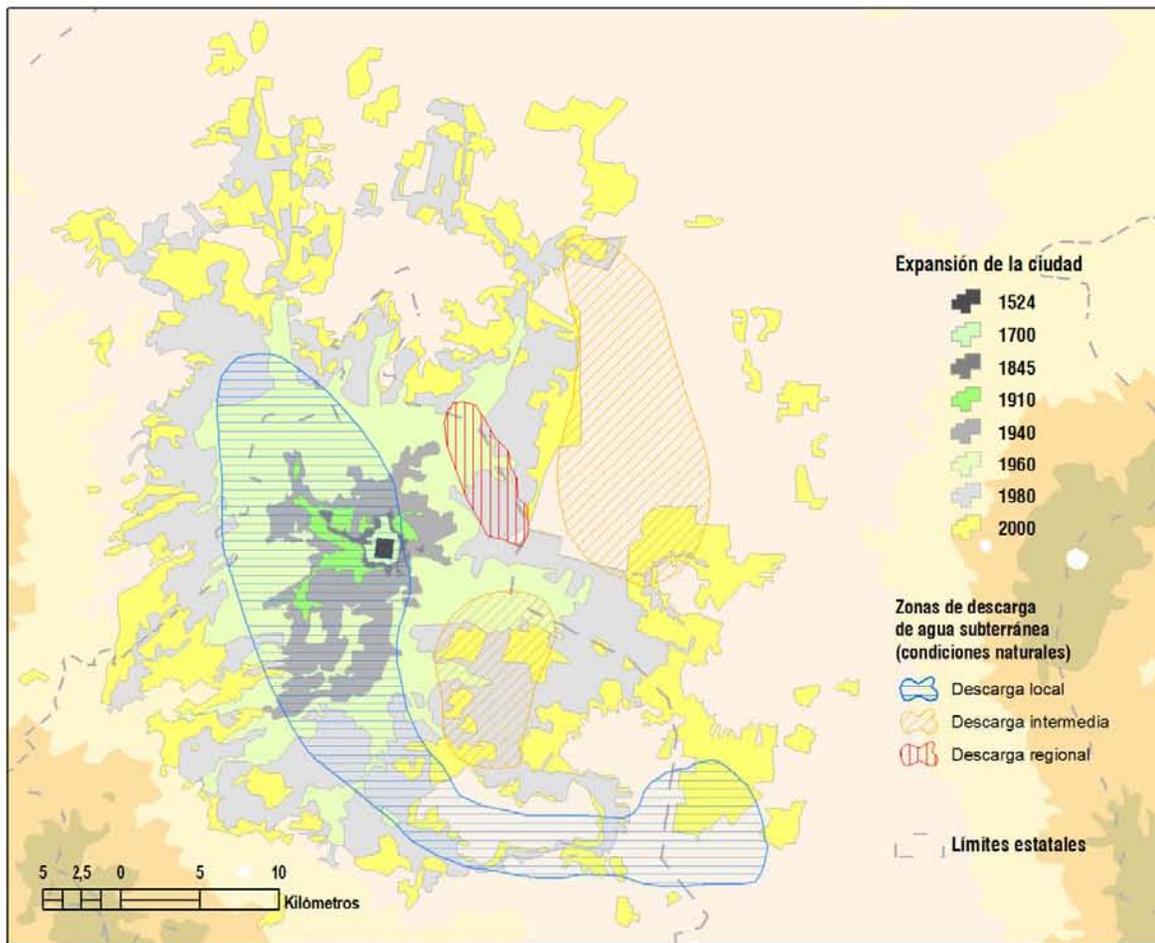


Figura 10. Expansión de la ciudad de México con respecto a las zonas de descarga de agua subterránea.

En ese sentido, es posible ver como en pleno proceso de colonización la herencia de la división del espacio de la Cuenca de México, continuó ahondándose. Durante el transcurso de la conquista y la colonia, la polarización espacial de la ciudad siguió siendo marcada por la distribución espacial de las fuentes de agua, las cuales reflejaban básicamente la distribución de las descargas de agua subterránea. Como lo indica Musset (1992), hasta el siglo XIX, los manantiales y acueductos jugaron el papel más relevante en la conformación del espacio de la ciudad (1992: 87):

“el oriente fue abandonado paulatinamente por las clases acomodadas de origen español, a favor de la zona poniente, en donde desembocaban los dos acueductos principales². Sus surtidores favorecían el poblamiento de esta zona, al permitir un acceso más fácil al agua. Además, los ricos podían esperar obtener una merced de agua, que les daría agua a domicilio, símbolo del éxito social. (...) En cambio, los barrios al oriente, asomados al lago salado, perdieron su atractivo.”

Musset (1992: 88), hace también, un símil entre el papel de los acueductos en aquella época y el papel de las grandes vías de comunicación durante el siglo XX:

“Las poblaciones, incluso las desheredadas, se instalaban sobre el trayecto del caño, al igual que hoy en día se puede seguir el progreso de la urbanización a lo largo de las líneas del metro o de las autopistas.”

Para hacer frente a la evidente polarización de la ciudad, los habitantes intentaron por medios técnicos terminar con la centralización de las fuentes de agua al oeste. Este objetivo se logró parcialmente, con el desarrollo de la red de abastecimiento de agua potable, que se adelantó principalmente entre los siglos XVIII y XIX. Sin embargo, esto no fue suficiente para romper con el esquema espacial que se desarrollaba en la ciudad. En efecto, mucha de la población –principalmente la indígena –se encontraba marginada al acceso al agua potable, cuya red de distribución seguía beneficiando la población más acomodada.

² Musset se refiere a los dos acueductos con lo que contó la ciudad hasta pasado el principio del siglo XX: El de Chapultepec y el de Santa Fe.

Como se verá en la parte siguiente, la aparición de tecnologías que permitieron la explotación de agua del subsuelo, disminuyó las limitaciones para obtener agua potable. La utilización de pozos perforados fue determinante para la población de la cuenca. Esta nueva tecnología cambió la manera de obtener agua potable y modificó la manera en la que la sociedad se apropió del entorno. La extracción de agua subterránea del sistema acuífero de la cuenca por medio de un pozo profundo, permitió acceder de manera menos limitada a las fuentes hídricas y fue un importante factor de cambio en el esquema de expansión de la ciudad. Sin embargo, rápidamente harían su aparición efectos secundarios producidos por esta nueva forma de obtención del vital líquido.

2.3 Las mutaciones de la explotación de las fuentes hídricas en la Ciudad de México a partir de la explotación de agua subterránea mediante pozos profundos

Como ya se ha examinado a lo largo de este documento, la Ciudad de México se ha caracterizado por una bipolaridad histórica entre un oeste beneficiado de un buen acceso al agua y un este que sufre de constantes problemas de aprovisionamiento. En el proceso de romper esta bipolaridad, a finales del siglo XIX la explotación del agua subterránea apareció como la técnica más eficaz y económica para abastecer de agua una buena parte de la población, a tal punto, que durante el siglo XX esta tecnología se convertiría en el principal modo de acceder y aprovisionar la Ciudad de México de agua potable (*Figura 11*).

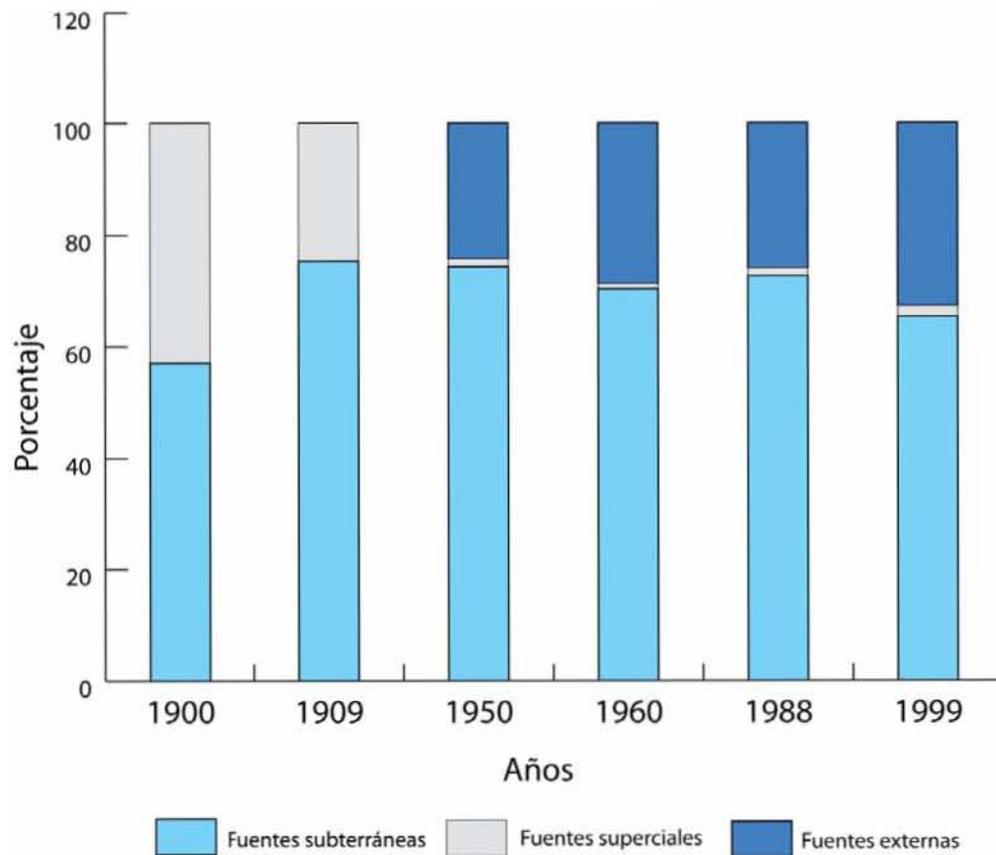


Figura 11. Fuentes de agua de la Ciudad de México durante el siglo XX (Bribiesca, 1960b, INEGI, 2002)

2.3.1 Las explotación del agua subterránea factor de descentralización de las fuentes hídricas

Con la explotación de agua subterránea, la ciudad logró mantener a lo largo del siglo XX las exigencias permanentes de agua por parte de los habitantes. En la gráfica mostrada por la *Figura 12* (ver *Tabla 1*) es posible observar la evolución de la dotación de agua potable en función del crecimiento de la población y del aumento histórico del caudal de abastecimiento. La dotación tomada en cuenta en esta figura, es la dotación total del sistema. Esta representa el volumen total de agua con la cual se alimenta el sistema de distribución de agua potable de la ciudad para aprovisionar a todos los habitantes de la ciudad.

Año	Población	Caudal (m ³ /s)	Dotación m ³ /habitante/día
1900	345,000	1.1	0.263
1910	471,000	1.7	0.311
1920	661,000	2.2	0.287
1930	1,049,000	3.1	0.260
1940	1,560,000	4.3	0.238
1950	2,872,000	10.8	0.324
1960	4,910,000	21	0.369
1970	8,355,000	36	0.372
1980	13,879,000	40	0.312
1990	15,138,037	57.1	0.361
1999	17,844,829	62.9	0.340

Tabla 1. Dotación de agua potable por habitante de la Ciudad de México durante el siglo XX (Adaptado de: Bribiesca, 1960a, Schteingart y Torres, 1997)

Como es posible observar en la *Tabla 1*, la dotación de agua a lo largo del siglo XX ha sido siempre mayor de 0.2 m³ por habitante por día. Para tener una idea de lo que representa una dotación de ese volumen, es posible hacer referencia a las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2006), según la cual, 0.02 m³ de agua potable por día representan la cantidad mínima con la que una persona prepara sus alimentos, se hidrata y se hace una limpieza básica. Un volumen de 0.05 m³ por día, asegura que una persona pueda lavar su ropa y enseres y tomar una ducha. Una cantidad superior a 0.1 m³ por persona por día, constituye un acceso óptimo al agua potable y significa un nivel aceptable de confort y de bienestar. Contrastando con estos estándares de la OMS, de la *Figura 12* se puede deducir que la dotación por habitante en la Ciudad de México durante el siglo XX ha permitido garantizar a su población un nivel confortable de abastecimiento. Sin embargo, las tendencias de la dotación mostradas en esta figura, han estado siempre lejos de representar la realidad de toda la población.

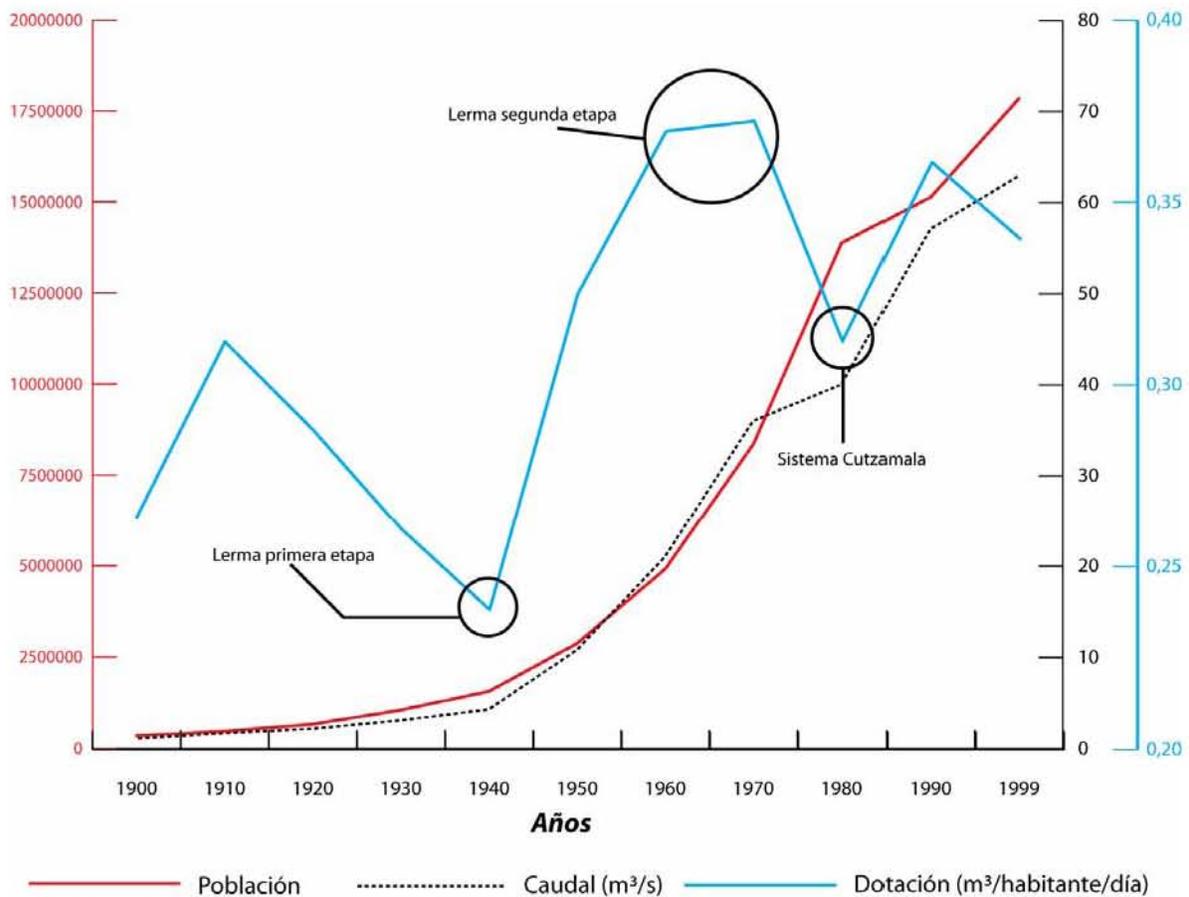


Figura 12. Dotación de agua potable por habitante de la Ciudad de México durante el siglo XX (Adaptado de: Bribiesca, 1960a, Scheingart y Torres, 1997)

Al observar la curva de la dotación de agua por habitante de la Ciudad de México a lo largo del siglo XX es posible remarcar la presencia de discontinuidades importantes. Estas variaciones han sido significativas, y coinciden con fluctuaciones de la capacidad de aprovisionamiento de la ciudad y de las fuentes hídricas de las que ella disponía. La primera variación importante se presentó durante la primera década del siglo XX, cuando la naciente explotación del agua subterránea permitió elevar fuertemente la dotación por habitante. La explotación de agua del subsuelo generó nuevas potencialidades de desarrollo para la ciudad y permitió descubrir fuentes hídricas insospechadas. Igualmente, favoreció la descentralización de las fuentes de aprovisionamiento de agua para la población y rompió con el periodo precedente, durante el cual, éstas no eran aprovechadas

sino por la población que vivía a proximidad de los dos acueductos situados al este de la ciudad.

La explotación del agua subterránea se inicio en 1846 cuando se generalizó la extracción de agua del subsuelo por medio de pozos profundos. Estos pozos, alcanzaron en algunos casos una profundidad cercana a los 40 m (Consejo Nacional de Investigación, 1995). La importancia de los pozos para el aprovisionamiento de agua aumento rápidamente, y ya en 1902 el 42% del agua de la que disponía la ciudad (*Tabla 2*) provenía de aproximadamente 1,370 pozos (Izazola, 2001).

Fuente	Caudal (m ³ /s)
Chapultepec	0.21
Desierto de los Leones y Santa Fe	0.15
Río Hondo	0.29
Pozos	0.28
TOTAL	0.93

Tabla 2. Fuentes de abastecimiento de la Ciudad de México en 1910 (Adaptada de: Bribiesca, 1960a)

Entre 1910 y 1930 la dotación sufre una importante disminución, que se puede explicar por el proceso de consolidación por el cual pasaba la ciudad. La centralización de múltiples actividades urbanas, tanto administrativas como comerciales, marcaron el inicio de un periodo de crecimiento demográfico con tasas de crecimiento superiores al 3%, mientras que el caudal de abastecimiento de la ciudad no aumentaba en la misma proporción.

Así por ejemplo, en la década de los años 1920 se presentó un fuerte aumento del área de la ciudad. Como lo indica Delgado (1988), este aumento se generó principalmente porque muchos de los propietarios de las haciendas que rodeaban el centro urbano, presionados por las medidas de expropiación de tierras originadas en medio de la revolución mexicana, decidieron fraccionarlas y venderlas. En 1929, con la aplicación de la nueva Ley Orgánica del Distrito y

Territorios Federales, la ciudad fue dividida en 13 Delegaciones (Delgado, 1988) y le fueron anexadas algunas colonias vecinas, como Tacubaya, San Pedro de los Pinos, Mixcoac, y Tacuba. Sin embargo, muchas de las colonias anexadas no contaban con buena prestación de servicios públicos, y algunas recibían agua de pésima calidad. Tal era el caso de Mixcoac y Tacubaya, que eran abastecidas de agua proveniente de Los Ajolotes, Santa Fe y del Desierto de los Leones (Bribiesca, 1960b).

El crecimiento demográfico fue aun mayor a partir de 1930, estimulado por la implantación de las primeras zonas industriales hacia el norte de la ciudad, principalmente en las delegaciones Azcapotzalco y Gustavo A. Madero (Delgado, 1988). Este crecimiento industrial produjo una fuerte demanda de mano de obra, motivando la creciente inmigración de población (Aguilar, 1999). Como lo indican Ezcurra, *et al* (1999), entre 1940 y 1950 cerca del 80% del crecimiento demográfico de la ciudad se debió a la inmigración de población generalmente de origen campesino y de clase trabajadora, proveniente de todo el país.

Como respuesta al fuerte aumento de las necesidades de agua resultado del elevado crecimiento demográfico, los gobernantes de la ciudad decidieron aprovechar las ventajas ya mostradas por la explotación de agua subterránea. Así, en las décadas de los 1930 y 1940, se comenzó a incrementar el caudal de agua potable de la ciudad mediante la perforación de nuevos pozos, al punto que en 1940 el agua subterránea representaba más del 60% de las fuentes de abastecimiento de la ciudad (*Tabla 3*). Entre 1936 y 1944, se perforaron unos 93 pozos con profundidades superiores a los 100 m (Benítez-Eslava, 2005), y al finalizar la década de 1940, gran parte de las delegaciones del Distrito Federal cubrían sus necesidades de agua con la obtenida mediante pozos profundos (Bribiesca, 1960a).

Tanto la población que se instalaba al norte, cerca de los nuevos centros industriales, como los habitantes del centro de la ciudad, se beneficiaron del acceso al agua potable. Sin embargo, gran parte de la población que arribó a la ciudad, generalmente de escasos recursos económicos, se asentó hacia el este

cerca del antiguo lago de Texcoco. No muy diferente de su condición actual, esta era una zona muy marginal, susceptible a inundaciones, lejos de los sistemas de suministro de agua potable, y de hecho, desprovista de casi cualquier servicio básico.

Fuente	Caudal (m ³ /s)
Desierto de los Leones y Ajusco	0.2
Xochimilco	1.6
Lerma	3.5
Pozos municipales	6.5
Pozos privados	2.6
TOTAL	14.4

Tabla 3. Fuentes de abastecimiento de la Ciudad de México en 1940 (Adaptada de: Bribiesca, 1960a)

A fines de la década de 1940, la política del gobierno federal fue la de atender las nuevas demandas de agua mejorando el acueducto de Xochimilco, construyendo nuevos pozos de extracción y extendiendo las redes de distribución a las nuevas delegaciones y colonias (Bribiesca, 1960a).

La mayor parte de los nuevos pozos municipales de extracción de agua subterránea se perforaron en el actual centro histórico y en el suroeste de la ciudad (Bribiesca, 1960a). Estos pozos aumentaron notablemente el caudal de agua asequible. Pero este aumento benefició primordialmente los barrios del centro y oeste, y no tuvo la capacidad de cubrir las insuficiencias de agua de los habitantes del este, principalmente de aquellos asentados en los municipios de Netzahualcóyotl y Texcoco, donde la mayor parte de las poblaciones seguían marginadas.

En 1940 la dotación neta era 0.240 m³/habitante/día (Bribiesca, 1960a), la más baja en todo el siglo, pero que en teoría era suficiente para suplir las necesidades de la población. No obstante, persistían los graves problemas en la distribución del líquido y el agua no llegaba de manera eficiente a una buena parte de los

habitantes. Ante esto, la decisión del gobierno de la ciudad para mejorar la oferta de agua fue construir el sistema Lerma, idea que ya había sido considerada en 1930 cuando se vislumbro la posibilidad de conducir el agua del río Lerma y los manantiales de esa zona hacia la ciudad. Finalmente, esta obra se llevó a cabo entre 1942 y 1951. Como se observa en la *Figura 11*, la inclusión del agua obtenida del sistema Lerma tuvo un gran efecto en la dotación de la ciudad, la cual alcanzó en 1950 un volumen de 0,325 m³/habitante/día. Sin embargo, una vez más, este aumento en la oferta de agua no beneficio todos los sectores de la ciudad, favoreciendo principalmente a las zonas industriales.

2.3.2 La explosión urbana de la Ciudad de México y la reproducción de la bipolarización hídrica de la ciudad

De cara a los crecientes requerimientos de agua, los habitantes de los nuevos asentamientos y colonias que se iban formando con el permanente crecimiento de la ciudad, comenzaron, sin mayores criterios técnicos ni de planificación, a perforar pequeños grupos de pozos y a crear redes de abastecimiento de agua para sus barrios (Departamento del Distrito Federal, 1954). Así, gran parte de la red urbana de distribución de agua era insuficiente y poco funcional. Por ejemplo, un informe del Departamento del Distrito Federal (1954) indica que para el año de 1954, 600,000 habitantes de la ciudad ubicados principalmente en la región noreste no tenían acceso a la infraestructura de distribución de agua potable o sólo recibían agua unas pocas horas al día. Esto indica que el problema no era ordinariamente la llamada “dotación”, que como se ha mostrado, generalmente era importante y en teoría suficiente para suministrar agua potable a toda la población. El verdadero problema era la incapacidad de la administración del distrito para responder con una gestión eficiente a las nuevas necesidades de agua de la población que crecía de manera rápida y constante.

Finalizando los años 1950, la dotación por habitante de la ciudad era superior a los 0.320 m³/habitante/día, cerca de alcanzar la máxima dotación por habitante que tendría la ciudad a lo largo del siglo. Como lo muestra la *Figura 12*, en menos de 10 años la dotación aumento en más de 0.100 m³/habitante/día. Esto se debió en

gran media al desarrollo de la primera etapa del sistema Lerma, las mejoras en el acueducto de Xochimilco, y la creación de nuevos campos de pozos al sur de la ciudad. Sin embargo, las estrategias gubernamentales, junto al auge industrial resultado de la segunda guerra mundial y de las nacientes políticas de sustitución de importaciones, sostuvieron el crecimiento constante de la población, y así mismo de las necesidades de agua. Aun con la dotación por encima de los 0.300 m³ por habitante, el acceso al agua era aun deficiente. Como se indicó anteriormente, a mediados de la década 1950, cerca de 600,000 habitantes tenían dificultades para acceder al servicio de agua. Tomando en cuenta que para el año 1959 la ciudad tenía una población cercana a los 5'000,000 millones de habitantes (Bribiesca, 1960a), es posible indicar que más del 12% de de la población no tenían acceso regular al agua potable.

La dotación de agua neta con la que contaba la ciudad por habitante no era repartida en forma equitativa. Las ya existentes zonas industriales de las delegaciones Gustavo A. Madero y Azcapotzalco junto con las nuevas zonas industriales que se ampliaron hacia Ecatepec, al noreste de la ciudad y hacia Tlanepantla y Naucalpan, al noroeste (Ezcurra *et al.*, 1999), consumían gran parte del volumen de abastecimiento de la ciudad. Así mismo, la formación de nuevos barrios de clase alta se concentró en el este de la ciudad por donde se iniciaba la distribución de agua proveniente del acueducto de xochimilco y del reciente sistema Lerma, en detrimento de las delegaciones ubicadas en el lado opuesto de la ciudad. Como lo indica Benítez-Eslava (2005), el agua que provenía del sistema Xochimilco primero se distribuía hacia el centro de la ciudad a partir del tanque del Molino del rey, ubicado en las partes altas de Chapultepec. Una segunda sección de tanques, ubicada en Chapultepec, recibía el agua de Lerma y distribuía una parte hacia las nuevas zonas industriales del norte y otra parte hacia el centro de la ciudad. De esta manera, el origen de las fuentes de abastecimiento y la conformación del sistema de distribución de la ciudad, perpetuaban la bipolarización hídrica de la ciudad entre.

Durante la década de 1960, el ritmo del crecimiento poblacional de la ciudad no se detuvo y la tasa de crecimiento se mantuvo por encima del 5% (Aguilar, 1999). La inmigración hacia la ciudad continuó, y las clases más pobres se siguieron concentrando en el este, producto de una escalada en la subdivisión ilegal de tierras. De hecho como lo indica Aguilar, *et al* (1995):

“Quizás el ejemplo más impresionante es el de Ciudad Netzahualcóyotl, que aumentó a su población de 65.000 habitantes en 1960 a 650,000 en 1970; actualmente (NR. 1995) tiene una población de cerca de 2 millones. El crecimiento urbano acelerado condujo a la proliferación de urbanizaciones ilegales (...). En 1968 la prohibición de nuevas urbanizaciones residenciales en el Distrito Federal fue revocada, lo que estimuló el crecimiento de nuevas áreas residenciales, especialmente al sur.”

En razón del fuerte aumento de las necesidades de agua, a mediados de los años 1960 se decide la construcción de una segunda etapa en el sistema Lerma. Esta obra fue culminada en 1975 con la puesta en funcionamiento de 250 nuevos pozos profundos y una producción de 14 m³/s de agua. Con el tiempo esa obra tuvo fuertes repercusiones ambientales en la región, por lo que la extracción de agua subterránea se redujo a tan solo 6 m³/s (Benítez-Eslava, 2005) (*Tabla 4*).

Fuente	Caudal (m ³ /s)
Desierto de los Leones et Ajusco	0.2
Xochimilco	2.4
Lerma	6.0
Pozos municipales	6.5
Pozos particulares	2.5
Chiconautla (pozos)	3.0
Peñon viejo (pozos)	0.3
TOTAL	20.9

Tabla 4. Fuentes de abastecimiento de la Ciudad de México en 1960 (Adaptada de: Bribiesca, 1960a)

Igualmente, se construyeron nuevos sistemas de pozos al oeste y sudoeste de la ciudad, que paradójicamente no beneficiaban a toda la población de esas zonas. En efecto, la red de distribución de agua era insuficiente y en general defectuosa, y por ende, no alcanzaba los nuevos barrios populares. Por lo contrario, las colonias económicamente mejor acomodadas y las nuevas zonas industriales accedían fácilmente al agua subterránea, ya que generalmente podían construir sus propios pozos y desarrollar las redes necesarias para la distribución.

En la década de 1970, la tasa de crecimiento descendió al 2.6%. Nuevos asentamientos de clase media se ubicaron al norte, en la zona de influencia de la carretera hacia Querétaro, donde la industria pesada ya se había instalado con fuerza (Aguilar *et al.*, 1995). Por otra parte, hacia el este y noroeste, los patrones de ocupación ilegal continuaron repitiéndose, y nuevos grupos poblacionales extendieron la ocupación de zonas marginadas en Ecatepec y Netzahualcóyotl, aun más lejos de los sistemas de distribución de agua. Las políticas con respecto al agua en el Distrito Federal, seguían enfocadas en aumentar la dotación de la ciudad, para poder abastecer la creciente población. Entre 1970 y 1980 la dotación tuvo un nuevo descenso (*Figura 12*). Es en este momento que la comisión de aguas del Valle de México elabora un plan de acción inmediata, con el fin de cubrir la creciente demanda de agua potable de la ciudad. El plan tenía dos etapas: la primera etapa tenía como objetivo cubrir las necesidades de agua entre 1973 y 1980. En la segunda etapa, se buscarían las fuentes de agua necesarias para cubrir la demanda hasta el 2020 (Comisión Nacional del Agua, 2004).

La primera etapa, se llevó a cabo aprovechando las fuentes de agua de la Ciudad. Este se conformó por el sistema de pozos del norte (Tizayuca-Payuca), el sistema de pozos Los Reyes-Ecatepec, el sistema de pozos Los Reyes-ferrocarril, Teoloyucan, el sistema de pozos Texcoco, y el de Mixquic Santa Catarina. La segunda etapa, estimaba la utilización de fuentes externas a la ciudad. Entre 1976 y 1982, se llevó a cabo la construcción del sistema Cutzamala, localizado a 127 km al oeste de la ciudad (*Figura 18*), y 1,100 m debajo de la altura de la cuenca. Este sistema fue luego ampliado en dos etapas, la última finalizada en 1993. Hoy

en día, este sistema provee a la ciudad cerca de más de 14 m³/s (*Tabla 5*). No obstante, la fuente principal de agua en la Ciudad de México es de origen subterráneo de la cual se toman 41.1 m³/s. Lo anterior, sin tener en cuenta que la mayor parte del agua del sistema Lerma proviene de la extracción de agua subterránea.

Fuente	Caudal (m ³ /s)
Lerma	5.8
Cutzamala	14.8
Fuentes subterráneas	41.1
Fuentes superficiales	1.2
TOTAL	62.9

Tabla 5. Fuentes de abastecimiento de la Ciudad de México en 1999 (Comisión Nacional del Agua, 2004)

2.4 Los sistemas de flujo de agua subterránea en la actual dinámica urbana de la Ciudad de México

Actualmente la Ciudad de México presenta nuevos procesos de expansión urbana con escalas espaciales de dimensión regional. La ciudad pasó de crecer de manera conurbana y continua, como lo indicaba el modelo clásico de anillos conurbados, a desarrollar una serie de procesos urbanos y socio-económicos, tales como, la fragmentación espacial y la redistribución de actividades económicas a nivel regional o la desaparición de límites entre el centro y la periferia (Aguilar, 2003).

Como se verá en este apartado las nuevas dinámicas urbanas y poblacionales, como también, las nuevas escalas que ha alcanzado la ciudad, han repercutido sobre los sistemas de flujo de agua subterránea de la Cuenca de México.

2.4.1 Desconcentración de la población del centro hacia la periferia de la Ciudad: Mala distribución de la dotación

Como lo explican Aguilar (Aguilar, 1999, Aguilar, 2002, Aguilar, 2003) y Delgado (Delgado, 2003, Delgado *et al.*, 1999), los procesos de poblamiento de la Ciudad de México se han caracterizado durante las últimas décadas, por un doble movimiento representado en una fuerte caída del crecimiento demográfico en la parte central de la ciudad, y un fuerte aumento de la población en los municipios periféricos aledaños, comúnmente con tasas 6 veces mayores al promedio de la ciudad.

Según Aguilar (2002), diferentes factores están ligados a esta disminución: *i)* la crisis económica que conoció México durante los años 1970 provocó una baja en el empleo del sector manufacturero, *ii)* el pasaje de un modelo de sustitución de importaciones a un modelo liberal exportador estimuló el desplazamiento de la industria hacia centros urbanos próximos a la ciudad, *iii)* el sismo de 1985 y la coyuntura desfavorable produjeron un deterioro importante en la calidad de vida de la ciudad. Así mismo, Aguilar (2002), hace múltiples constataciones relativas a la redistribución de la población:

“*i)* un despoblamiento del centro histórico de la ciudad; *ii)* una mayor concentración demográfica en la zona urbana correspondiente al Estado de México que en el Distrito Federal; *iii)* un crecimiento acelerado de la periferia metropolitana...”

Así, por ejemplo, entre 1960 y 1970, los municipios de el Estado de México perteneciente a la zona de conurbación tuvieron un crecimiento demográfico promedio del 10%, mientras que el crecimiento de delegaciones del Distrito Federal se limitaba a un 7% (INEGI, 2002). Esta tendencia se amplificó en el curso de las décadas de 1980 y 1990 a el punto que para el año 2000, la zona urbana correspondiente al Estado de México concentraba el 52% de la población de la ciudad (Aguilar, 1999). Esta evolución es confirmada también por el hecho de que las delegaciones centrales del Distrito Federal tengan en actualmente tasas de crecimiento negativas.

Como se puede observar en las *Figuras 13 y 14*, las cuales relacionan la extracción total de agua potable por municipio de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México con la dotación por habitante y la tasa de crecimiento anual en la década de 1990, los municipios que han conocido las mayores tasas de crecimiento son los situados al noroeste, a lo largo de la ruta que conduce a Querétaro, y al este, a lo largo de la ruta que lleva a Puebla. En términos de consumo y explotación de agua, esto significa que la redistribución de la población se ha efectuado principalmente hacia los municipios que históricamente han tenido dificultad para el acceso a las fuentes de agua potable, y cuya dotación de agua por habitante es inferior al promedio de $\text{m}^3/\text{habitante}/\text{día}$ de agua potable de las delegaciones del Distrito Federal.

Así mismo en la *Figura 14*, se puede observar con claridad cómo en la actualidad la división hídrica de la ciudad, descrita en este documento, se mantiene hoy en día vigente. Así, al presente, la mayor parte de municipios ubicados al noroeste del Distrito Federal tienen dotaciones inferiores a los $0.17 \text{ m}^3/\text{habitante}/\text{día}$. A este respecto, el INEGI (INEGI, 2002) indica por ejemplo que, durante el año 2000, la dotación por habitante en el Distrito Federal fue de 0.34 m^3 por día, mientras que los municipios conurbados situados en el Estado de México tenían una dotación que no superaba los $0.258 \text{ m}^3 /\text{día}/\text{habitante}$.

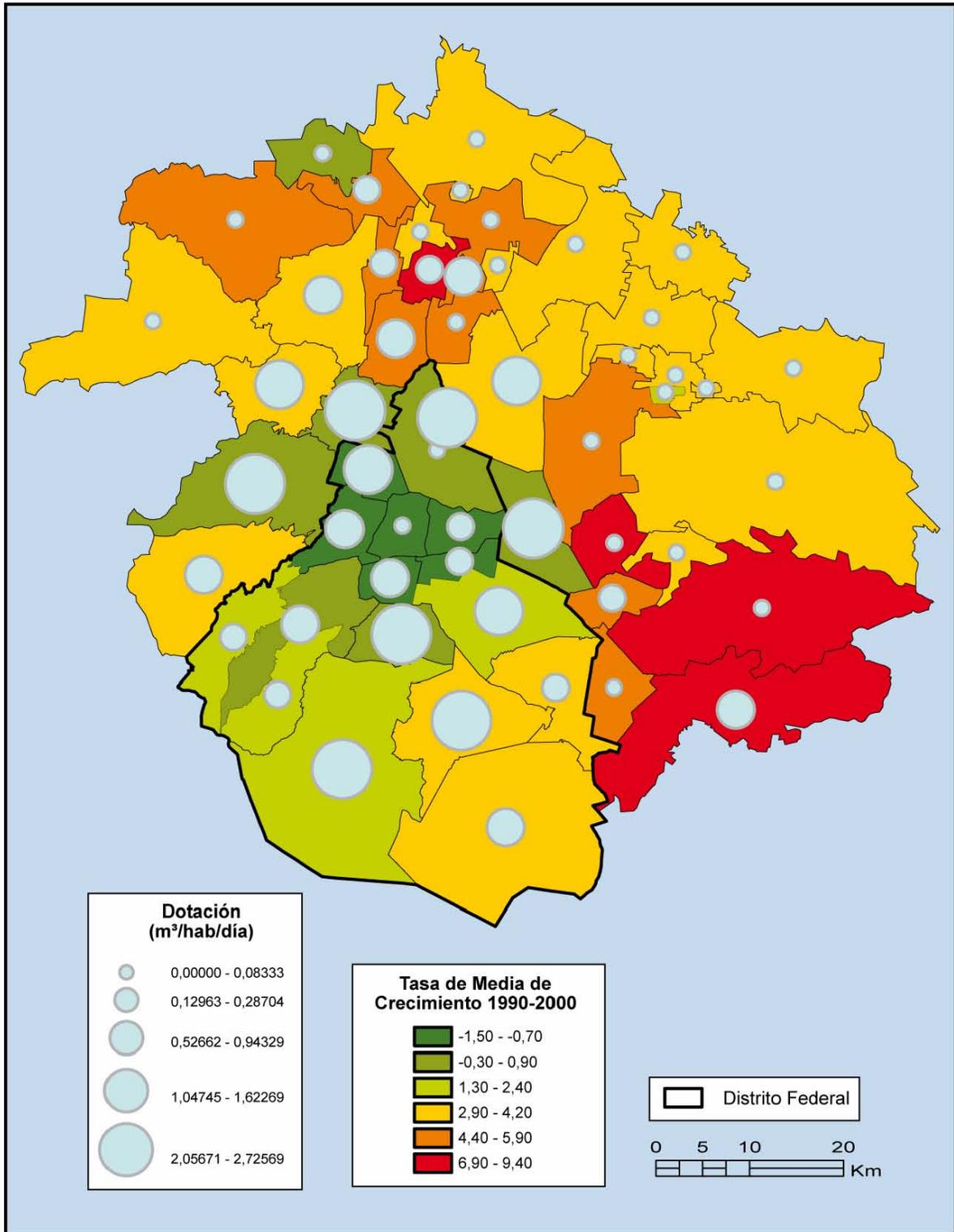


Figura 13. Tasa media anual de crecimiento poblacional en la Ciudad de México entre 1990-2000 y dotación por habitante por municipio (basado en INEGI, 2002) (Datos en Anexos 1 y 2)

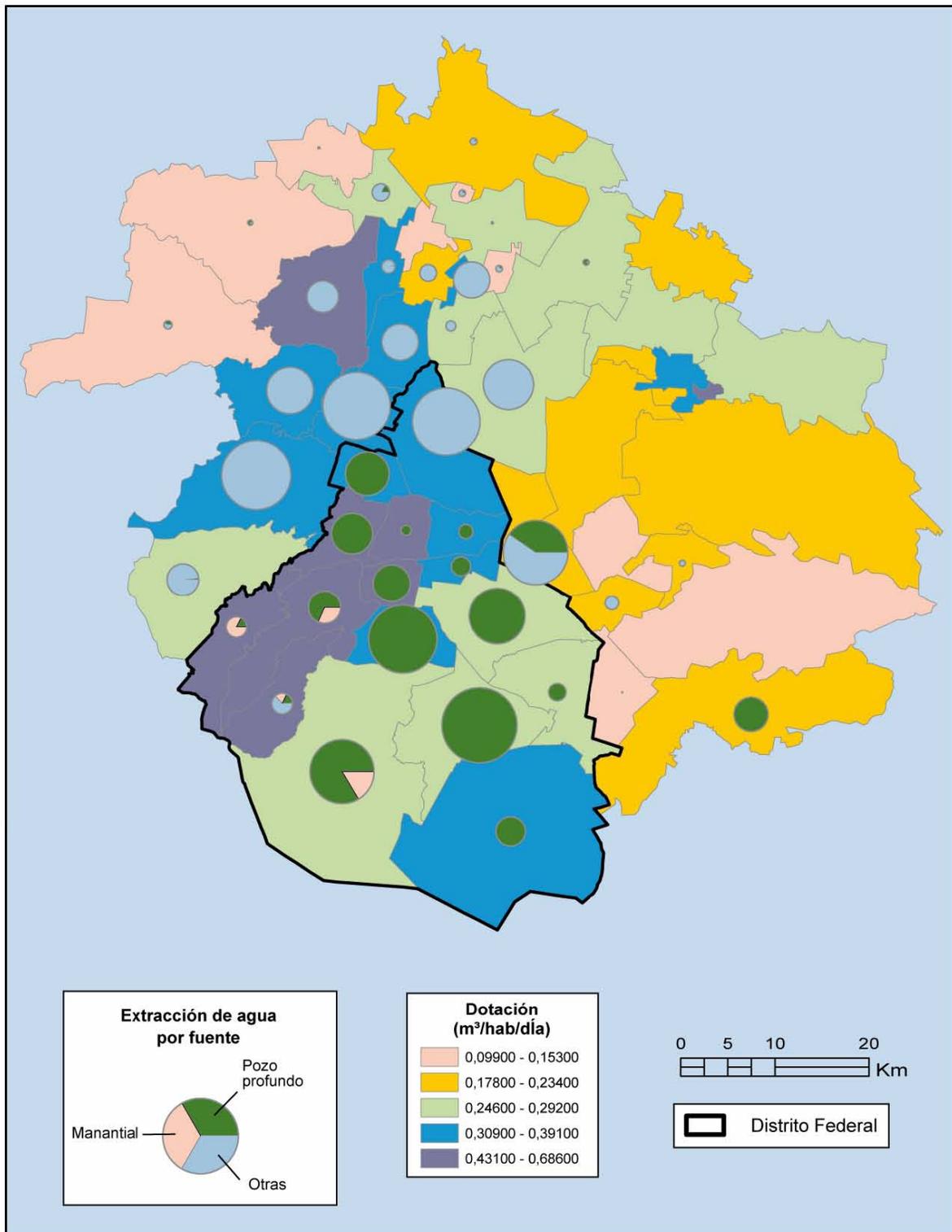


Figura 14. Dotación de agua por habitante y total de captación de agua potable por municipio (Basado en INEGI, 2002) (Datos en Anexos 1 y 2)

Ahora bien, en la *Figura 15*, se relacionan la dotación por municipio con una estratificación multivarial, llevada a cabo por el INEGI (INEGI, 2002), la cual se elaboró con base en el porcentaje de viviendas con agua entubada, el porcentaje de viviendas con electricidad, el porcentaje de viviendas con drenaje, el porcentaje de viviendas con piso diferente a tierra, el porcentaje de viviendas y promedio de ocupantes por cuarto, el porcentaje de viviendas con sanitario exclusivo y el porcentaje de viviendas con gas o electricidad para cocinar. Como lo indica el INEGI (INEGI, 2002),

“el resultado de la estratificación muestra los grandes bloques que conforman la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, según la mayor o menor calidad de las viviendas”

Como se puede observar en la *Figura 15*, la gran parte de los municipios clasificados en los estratos bajos y muy bajos, se encuentran también al norte, este y sur del Distrito Federal, presentando así bajas dotaciones de agua potable. Así mismo, el rápido crecimiento de la población en la periferia aumenta el número de habitantes a tener dificultades para acceder al agua potable, sin que la red de distribución tenga la capacidad de servir de agua a los nuevos utilizadores, o de sufrir por lo efectos secundarios de la explotación del agua subterránea como en el caso de la subsidencia.

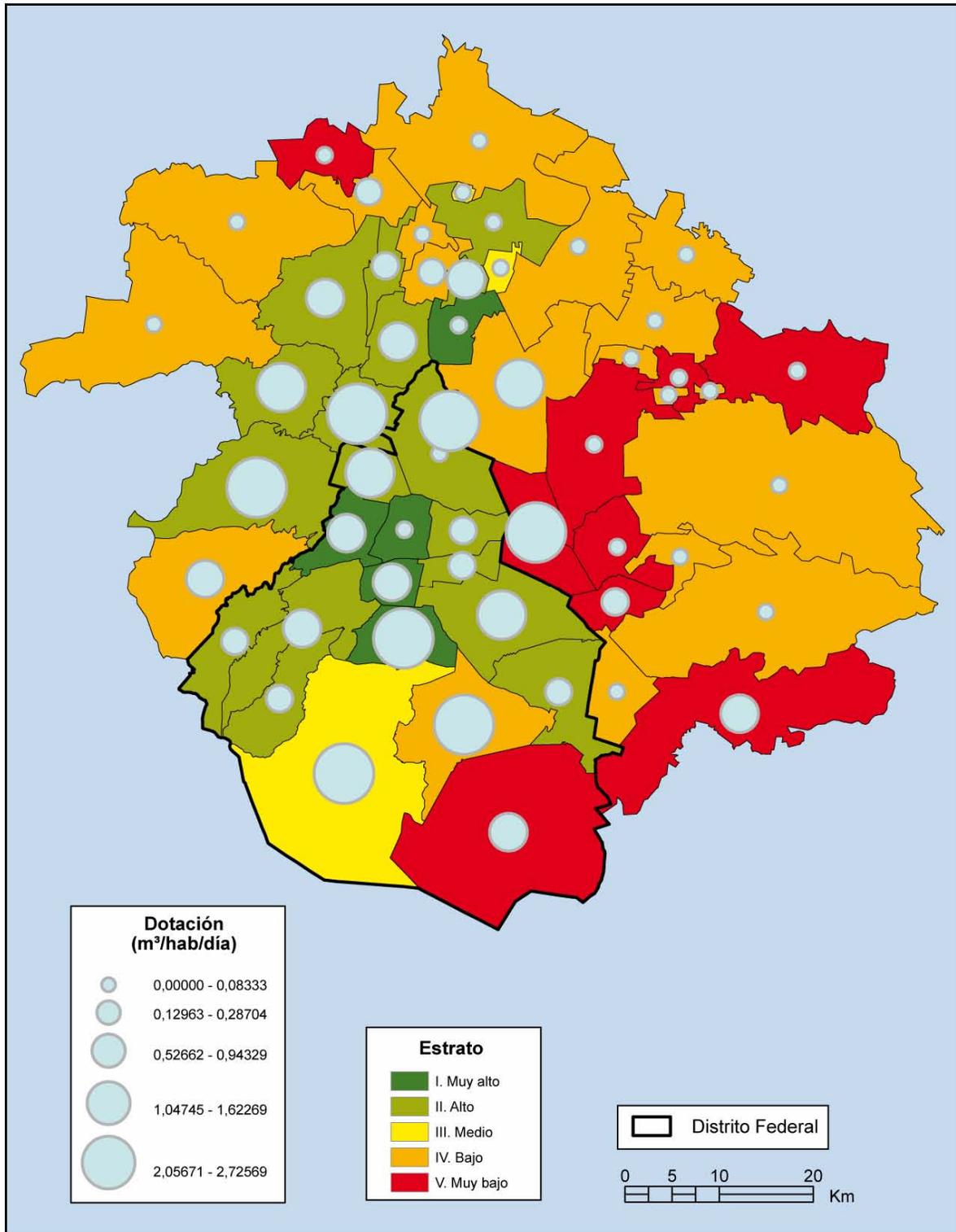


Figura 15. Clasificación INEGI por estratos según la calidad de las viviendas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y dotación municipal de agua por habitante (adaptado de INEGI, 2002) (Datos en Anexos 1 y 2)

Es imposible negar los esfuerzos que hacen los entes públicos de la Ciudad y del Estado de México para resolver la inequidad en el acceso al agua. Entre estos, se encuentra por ejemplo la implantación del *Plan Hidráulico* de 1982 (Departamento del Distrito Federal, 1982). Este plan realizó un importante análisis del sector hidráulico de la ciudad desde los aspectos técnicos como económicos y sociales. Este análisis presentó primero los problemas principales antes de ser resueltos: la deficiencia en el servicio de agua potable para más de 1.2 millones de habitantes, la insuficiencia de alcantarillado que afectaba a más de 2 millones de personas, y las numerosas y perpetuas fugas de agua que afectaban (y aun afectan) el sistema. El plan predecía, que si los problemas no eran resueltos antes del año 2000, 9 millones de habitantes estarían privados del servicio de agua y 9.6 millones, de los servicios de evacuación de aguas negras. Para hacer frente a la alarmante situación del “*sector hidráulico*” de la ciudad, proponía 4 objetivos concretos: *i)* hacer eficiente el uso del agua y evitar las fugas de agua, *ii)* reutilizar las aguas usadas después de un tratamiento previo, *iii)* importar agua de cuencas externas para satisfacer las necesidades futuras y *iv)* poner en marcha planes de buena gestión de agua.

En el marco de este plan hidráulico las autoridades de la ciudad establecieron el “*programa de uso eficiente del agua*” (Departamento del Distrito Federal, 1990). Iniciado en 1989, este programa tenía como objetivo reducir el consumo de agua de la ciudad, gracias a una gestión más eficaz de las fuentes hídricas. El primer objetivo fue el de bajar la dotación por persona de 0.39 a 0.362 m³ por habitante al día. Es así, que se llevaron a cabo acciones como la de 1989 por ejemplo, en la cual el gobierno de la ciudad inició la instalación y sustitución de inodoros de bajo consumo en lugares públicos, edificios comerciales y en viviendas particulares. En 1990, esta campaña había permitido reemplazar más de 350,000 sanitarios de 0.16 m³, por equipos de 0.06 m³. Como lo indica Postel (1993), esta renovación de inodoros permitió a la ciudad economizar cerca de 28 millones de m³ de agua, que correspondían en la década de 1990 a la dotación anual de 250,000 habitantes.

Otras acciones han tenido igualmente una importante influencia: la implantación progresiva de impuestos al agua, la elaboración de un programa de detección de fugas y la renovación de antiguos sistemas de distribución.

Como se vio anteriormente con la importación de agua de los sistemas de Lerma y Cutzamala se aumentó en 14 m³/s el caudal de abastecimiento de la ciudad. Las autoridades previeron distribuir los caudales de agua obtenidos de estos sistemas, hacia las periferias urbanas del este y noroeste. Para hacerlo, tomaron la decisión de construir un circuito de distribución de agua entorno a la ciudad, en un perímetro de 220 km (Benítez-Eslava, 2005). La construcción de este circuito fue dividida en dos secciones. La primera sección, al norte, fue denominada “*microcircuito*”, y su construcción fue encargada a la Comisión Nacional del Agua. La segunda sección al sur, fue llamada “*acuiferico*” y fue puesta bajo responsabilidad del Sistema de Aguas del Distrito Federal (Sistema de aguas de la Ciudad de México, 2005). Las dos secciones parten desde el túnel de Huixquilucan, ubicado al oeste de la ciudad, en el punto donde llegan las aguas de los sistemas Lerma y Cutzamala para entrar a la ciudad (*Figura 16*). El acuiferico tiene un diámetro de 5 m y la capacidad de transportar un caudal de hasta 25 m³/s. Éste se extiende por el subsuelo hasta la delegación de Milpa Alta donde el circuito se cierra por la conexión con el microcircuito. Este último, transporta por su parte un caudal inferior, pues el diámetro de sus tuberías es de 1 m. El microcircuito pasa por los municipios conurbados de Naucalpan, Atizapan, Coacalco, Ecatepec, hasta Milpa Alta al sureste de la ciudad.

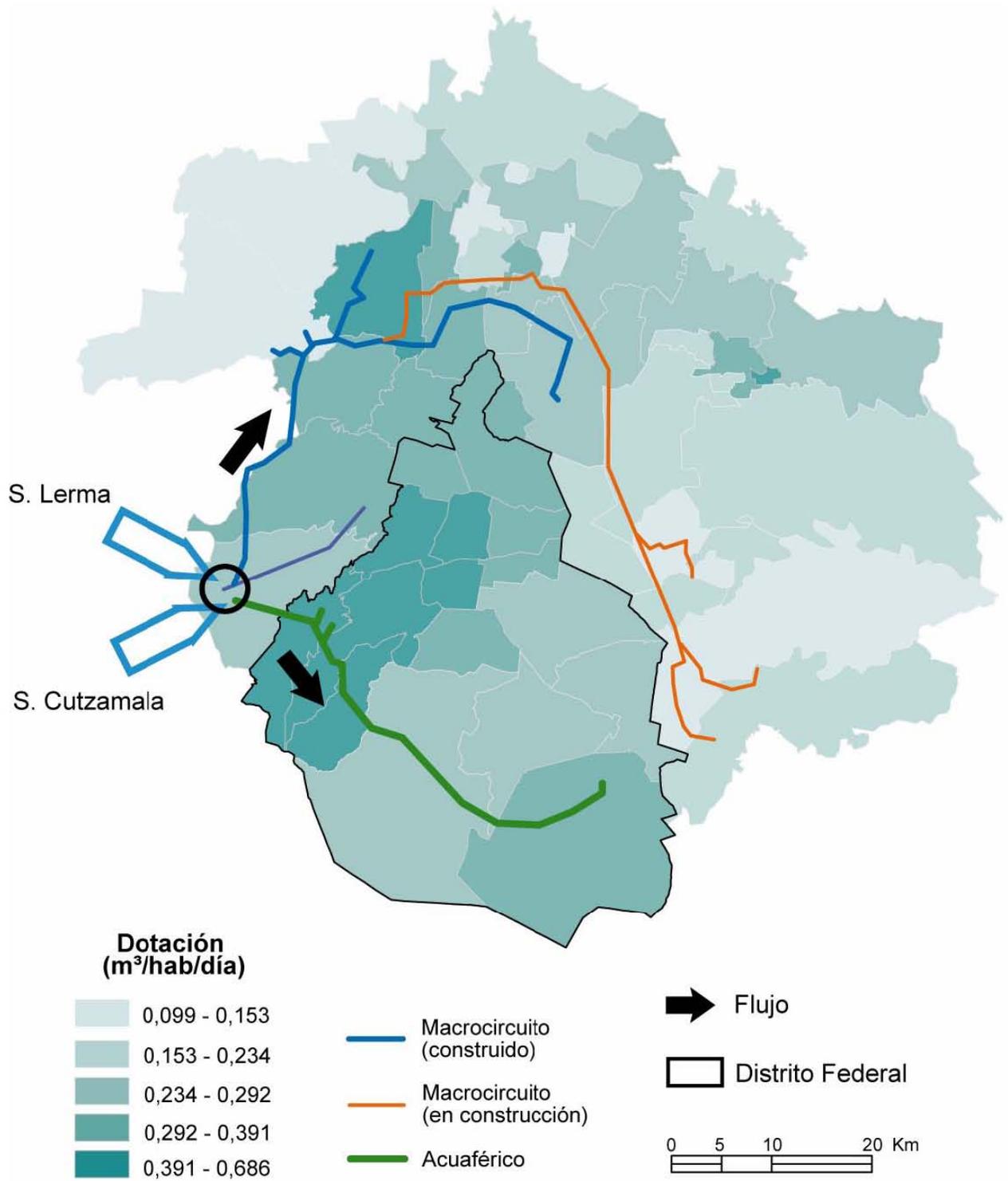


Figura 16. Circuitos de distribución de agua y dotación municipal en la Ciudad de México (basado en Comisión Nacional del Agua, 2004, INEGI, 2002)

Si bien no existen cifras precisas sobre los resultados de estos proyectos y sus efectos sobre la inequidad en la distribución del agua, es posible hacer algunas deducciones del panorama general:

i) Estos circuitos fueron concebidos para aumentar la dotación por habitante de algunos municipios y delegaciones de la periferia urbana con la esperanza de distribuir de manera justa los caudales de agua entre toda la población de la ciudad. No obstante, la desigualdad se concentra ahora entre los caudales distribuidos hacia cada una de las entidades políticas que conforman la ciudad de México. Por ejemplo, los municipios del Estado de México conurbados a la ciudad reciben solamente 5.2 m³/s de los 14.8 m³/s suministrados por el sistema Cutzamala (es decir tan sólo el 35% del caudal), no obstante que reagrupan más de 6 millones de habitantes. Por el contrario las Delegaciones pertenecientes al Distrito Federal reciben un caudal de 9.6 m³/s (mas del 64% del caudal total) para tan sólo 4 millones de habitantes que habitan en sus límites (2005, Comisión Nacional del Agua, 2004, INEGI, 2002, Perló *et al.*, 1998).

ii) Los cálculos del diseño hidráulico de estos proyectos fueron realizados tomando como base el caudal total que tendrá la ciudad con los “*futuros*” aportes de fuentes externas. Si bien el sistema fue concebido para un caudal de 18 m³/s, el caudal asequible en el último tramo, es de tan sólo 0.25 m³/s (Rocha *et al.*, 2003). Así, la sección sur del circuito, que fue materialmente terminada en el año 2000, no ha podido entrar en pleno funcionamiento debido a la insuficiencia de caudal. Es por esto que los municipios situados hacia el este de la ciudad en la parte final de los circuitos, en términos generales los más poblados de la ciudad, no se han podido beneficiar de estas obras. La obtención del caudal total previsto depende aún de la terminación de una etapa adicional del sistema Cutzamala (Rocha *et al.*, 2003).

En suma, los cuatro factores analizados en las figuras anteriores (producción de agua potable por municipio, dotación de agua potable por habitante, crecimiento medio anual y calidad de la infraestructura habitacional) llevan a concluir que las nuevas tendencias poblacionales de la Ciudad de México están produciendo un realce de la siempre presente división hídrica de la ciudad determinada por el

funcionamiento de los sistemas de flujos de agua subterránea en la Cuenca de México. Así, a pesar de los esfuerzos de los gobernantes por resolver las desigualdades en el acceso al agua y las obras llevadas a cabo para esto, una creciente parte de la población vive en medio de un acceso muy limitado al agua potable. Dos casos particularmente relevantes, ilustran esta problemática: Iztapalapa y el Valle de Chalco.

La delegación Iztapalapa, está situada al este del Distrito Federal. Ella es actualmente, la delegación más poblada de la Ciudad de México. Cuando el proceso de crecimiento poblacional acelerado de la ciudad comenzó en los años 1940, una gran parte de los inmigrantes de pocos recursos se asentaron en ésta delegación. Estos aprovecharon los grandes terrenos no cultivados que fueron apareciendo con la desecación de los lagos y de los canales de agua que existían en la zona, para construir sus viviendas. El crecimiento demográfico de esta delegación fue vertiginoso; de 76,621 habitantes en 1950, la delegación pasó a tener más de 1'170,000 en el 2000 (Gobierno del Estado de México, 2003).

Una parte de esta población se concentró poco a poco en los barrios marginales de las zonas montañosas de la delegación (Sierra Santa Catarina, Cerro de la Estrella y el Peñón del Marqués). La gran parte de la población afectada por la falta de agua se localiza en estas regiones montañosas. El agua falta en los sectores que están fuera de la capacidad de distribución de la red o en los cuales la presión del agua es insuficiente para circular por las redes. Sin disponer de datos precisos, las estimaciones indican que alrededor de 80 colonias, es decir unos 500,000 habitantes de la delegación, no disponen de un servicio regular. De hecho, las cifras oficiales indican que el 32% de la población total se encuentra en estado de racionamiento de agua (Sistema de aguas de la Ciudad de México, 2005). Las estimaciones de las autoridades de la delegación Iztapalapa indican que los habitantes afectados disponen de una dotación media de tan solo 80 m³/día (Gobierno del Estado de México, 2003).

Es por lo anterior que es frecuente ver la población de estas colonias aprovisionarse de agua por medio de los camiones cisternas municipales, que en

algunos casos pasan una vez por semana. En ocasiones los aportes de estos camiones no son suficientes para proveer a todas las colonias que tienen necesidad, por lo que es frecuente que algunos habitantes pasen varias semanas sin recibir agua (Molina, 2005). Además, es común que el agua distribuida por estos camiones sea de muy mala calidad, de hecho, como lo indican diferentes notas periodísticas llevadas a cabo en esta delegación (Molina, 2005, Noguez, 2006), los habitantes no utilizan el agua para consumo humano, dejándola únicamente para el lavado de ropa, y si la calidad lo permite, también para ducharse. Para el consumo humano, la población de las zonas sin servicio corriente de agua, tienen la costumbre de comprar botellones de agua.

Irónicamente, el agua subterránea que se extrae actualmente por medio de pozos profundos (140 m³/s), es suficiente para abastecer a toda la población (0.218 m³/habitante/día) (INEGI, 2002). Sin embargo, la alta concentración de sales en el agua obtenida de más de 100 pozos profundos no la hace fiable para el consumo humano (ONU-HÁBITAT y SEDESOL, 2006). Esto puede deberse a la falta de rigurosidad al comprender e interpretar el funcionamiento de los sistemas de flujo de la zona, problema que se refleja por ejemplo, en la incorrecta utilización de técnicas de extracción del agua, las cuales probablemente no controlan eficazmente los flujos profundos de agua saturados en sales, lo que puede ser controlado de forma eficiente y económica sin la producción de residuos contaminantes (ver caso de San Luis Potosí por Carrillo-Rivera y Cardona en Price, 2003).

Pero esta ironía es mayor en los municipios localizados en el Valle de Chalco al sureste de la Ciudad. Al igual que en el caso de Iztapalapa, su evolución demográfica es el resultado de procesos de migración masiva de población hacia la periferia de la ciudad. En 1950, el entonces municipio de Chalco tenía 22,000 habitantes. Como en el caso de Iztapalapa, el sector urbano de Chalco se extendió sobre terrenos de origen lacustres utilizados en su mayoría por los urbanizadores irregulares. A partir de los años 1970, este municipio se constituyó

en uno de los principales receptores de inmigrantes que llegaban a la Ciudad de México (Gobierno del Estado de México, 2003).

La tasa de crecimiento demográfico de Chalco aumentó rápidamente. A fines de los años 1970, esta tasa era de 6.3%, en los años 1980 alcanzó el 14%. En 1990, este municipio contaba con 282,000 habitantes. De cara a tal expansión, las autoridades del Estado de México, dividieron el municipio en dos: Chalco y el Valle de Chalco (Gobierno del Estado de México, 2003). Es en este momento que los gobiernos municipales llevaron a cabo campañas de regularización de urbanizaciones irregulares e intentaron mejorar el cubrimiento de los servicios públicos en las numerosas colonias ilegales.

Como se ha indicado anteriormente, el valle de Chalco es un sector importante de descarga local de aguas subterráneas, donde era posible encontrar numerosos manantiales de buena calidad para el consumo humano. Esta abundancia, permitió que el municipio tuviera un periodo de autosuficiencia hídrica hasta mediados de los años 1990. Sin embargo, los dos municipios tienen graves problemas de suministro de agua. Por ejemplo, Chalco se aprovisiona de agua proveniente de 21 pozos profundos, no obstante, el municipio tiene graves problemas de abastecimiento de agua potable. Al parecer esta situación está directamente ligada a que de los 21 pozos, solamente 7 son destinados a proveer los habitantes del municipio. El agua extraída de los 14 pozos restantes es suministrada al Distrito Federal (De la Cruz, 2002).

Otro grave problema de los municipios de Chalco y Valle de Chalco es el hundimiento de terreno, que como se verá en el siguiente capítulo es originado por la extracción intensiva de agua subterránea. Como lo indica Ortega (1999), el Valle de Chalco se ha hundido 6 m desde 1960, y se piensa que éste será de 14 m en el 2010. El fuerte hundimiento del terreno ha tenido fuertes repercusiones en los municipios indicados. Cada año, en la temporada de lluvias, el río La Compañía, que evacua las aguas negras de la ciudad, se desborda inundando todas la zonas afectadas por la subsidencia (Bitran *et al.*, 2001). Este problema

recurrente provoca problemas graves de insalubridad y ocasiona graves daños en la infraestructura habitacional de las colonias más pobres.

Esta situación comienza a modificar los esquemas de expansión urbana en el Valle de Chalco. Tales problemas de subsidencia acompañada por inundaciones, conjugados con las elevadas tasas de crecimiento demográfico (que según el INEGI (INEGI, 2002) sobrepasan actualmente el 5%), han llevado a la población a instalarse de manera ilegal sobre las periferias montañosas. La constitución de nuevas colonias marginales, cada vez más inaccesibles, complica la construcción de nueva infraestructura de distribución de agua potable.

Estos dos casos, son representativos de la problemática del acceso desigual al agua en la Ciudad de México, dicotomía que se ha perpetuado a lo largo de la historia de la Ciudad de México. Los ejemplos de las delegaciones de Iztapalapa y Chalco ilustran la difícil situación de un este estéril, cuyo aprovisionamiento falla constantemente, de cara a un oeste beneficiado de suficientes fuentes hídricas.

2.4.2 Los sistemas de flujo en la regionalización de la Ciudad de México

Como lo indica Delgado (2003), cuando la extensión de la ciudad la lleva a tener características regionales, los procesos de análisis urbanos y de población alcanzan dos escalas geográficas: *i*) la producida por la expansión de la periferia conurbada y *ii*) la expansión dispersa fragmentada, denominada por Delgado (2003) “*urbanización sprawl*” y donde se pueden estudiar diferentes fenómenos a nivel regional.

Esta difusión espacial de la ciudad y los procesos relacionados han producido una serie importante de cambios en la utilización del agua en la Cuenca de México. Por ejemplo, un proceso asociado con la regionalización de la ciudad, y que comienza a tener una importante influencia en los sistemas de flujos de agua subterránea es el de la relocalización industrial.

Como lo explica Aguilar (1999), entre los años 1940 y 1970, gracias al modelo de sustitución de importaciones, México conoció un fuerte crecimiento económico. La

segunda guerra mundial favoreció el comercio y la exportación de productos mexicanos. En la Ciudad de México, que en 1970 contaba con cerca de 9 millones de habitantes, esta política representó el estancamiento de la agricultura y llevo a concentrar el 46% de la industria mexicana en la ciudad (Aguilar, 1999).

Sin embargo, entre 1970 y 1987 emergió un nuevo modelo económico consistente en el desarrollo de nuevas exportaciones, siguiendo la lógica de las nuevas tendencias de flexibilización de la producción (Aguilar, 1999). Así, las políticas gubernamentales generaron la desconcentración industrial y favorecieron el desarrollo de otras ciudades. Este nuevo modelo impulso, entre otros, la fragmentación territorial de procesos productivos, la preponderancia de innovaciones tecnológicas, el aumento de ventajas logísticas en diferentes zonas, como también, la creación de sistemas de comunicación más rápidos (Aguilar, 1999). Los gobernantes crearon innumerables estímulos fiscales y concibieron nuevos parques industriales, con el fin de desarrollar polos de crecimiento. Estas políticas fueron eficaces y como resultado un importante porcentaje de la industria de la Ciudad de México se deslocalizó hacia otros centros urbanos como Toluca, Puebla o Cuernavaca.

Como lo indica Aguilar (2002) estos procesos se expresan con claridad a través de las cifras de empleo en el sector manufacturero. En 1970 por ejemplo, la Ciudad de México concentraba el 42% del empleo manufacturero y aportaba el 48% de la contribución de este sector en el PIB nacional. Para el año de 1993, estas proporciones bajaron al 26% y 33% respectivamente. Lo anterior ha tenido efectos importantes sobre el consumo y explotación de agua en la Ciudad. Por ejemplo, en el año 1993 el sector industrial de México consumía el 17% del agua con la que disponía la ciudad, frente al 67% destinado al sector domestico (Consejo Nacional de Investigación, 1995). Este porcentaje ha disminuido en 7 puntos desde el año 2000, y ya en el 2002 este porcentaje no representaba más del 10% (INEGI, 2002) (*Figura 17*). Así mismo, el Instituto Nacional de Estadística indica que entre el año 2000 y 2002 las derivaciones comerciales e industriales disminuyeron en un 1%.

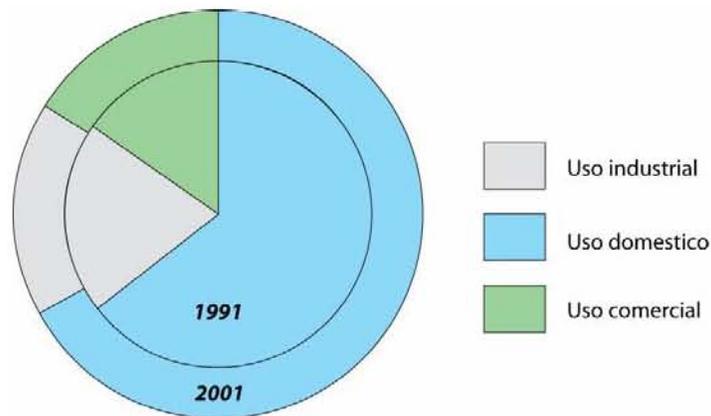


Figura 17. Usos del agua en la Ciudad de México (adaptado de INEGI, 2002)

Ahora bien, es importante precisar que esta disminución en el consumo del agua a nivel industrial se puede igualmente explicar por la aplicación de tarifas de consumo a partir de los años 1990, las cuales se ha extendido ostensiblemente con el tiempo. Durante la última década se han efectuado diferentes campañas de instalación de medidores de agua notablemente a los grandes consumidores, entre los que se encuentra una buena porción de las industrias manufactureras de la ciudad. Como lo indica el Consejo Nacional de la Investigación (1995), en los países en vía de desarrollo el sector industrial tiene la tendencia a utilizar mejor el agua y a obtener de ella un mejor costo/beneficio. Es entonces probable que con el pago de tarifas de consumo las industrias de la Ciudad de México *i)* han optimizado sus procesos de producción con el fin de reducir su consumo de agua o *ii)* han deslocalizado sus establecimientos hacia centros urbanos lejanos de la capital con el objetivo, entre muchos, de beneficiarse de costos más favorables por la obtención del agua necesaria para llevar a cabo sus actividades productivas.

Por otra parte, como lo indica Delgado (2003) uno de los principales difusores de la influencia de la ciudad a nivel regional es la construcción de grandes infraestructura, como es el caso de las obras de captación de agua. El autor aclara que el efecto de difusión no es un atributo “*per se*” de una infraestructura, pero sí es un factor cuyas ventajas espaciales son aprovechadas de forma concertada por

múltiples actores. Los sistemas de importación de agua de Lerma y Cutzamala, son ejemplos concretos de este tipo de difusión (*Figura 18*)

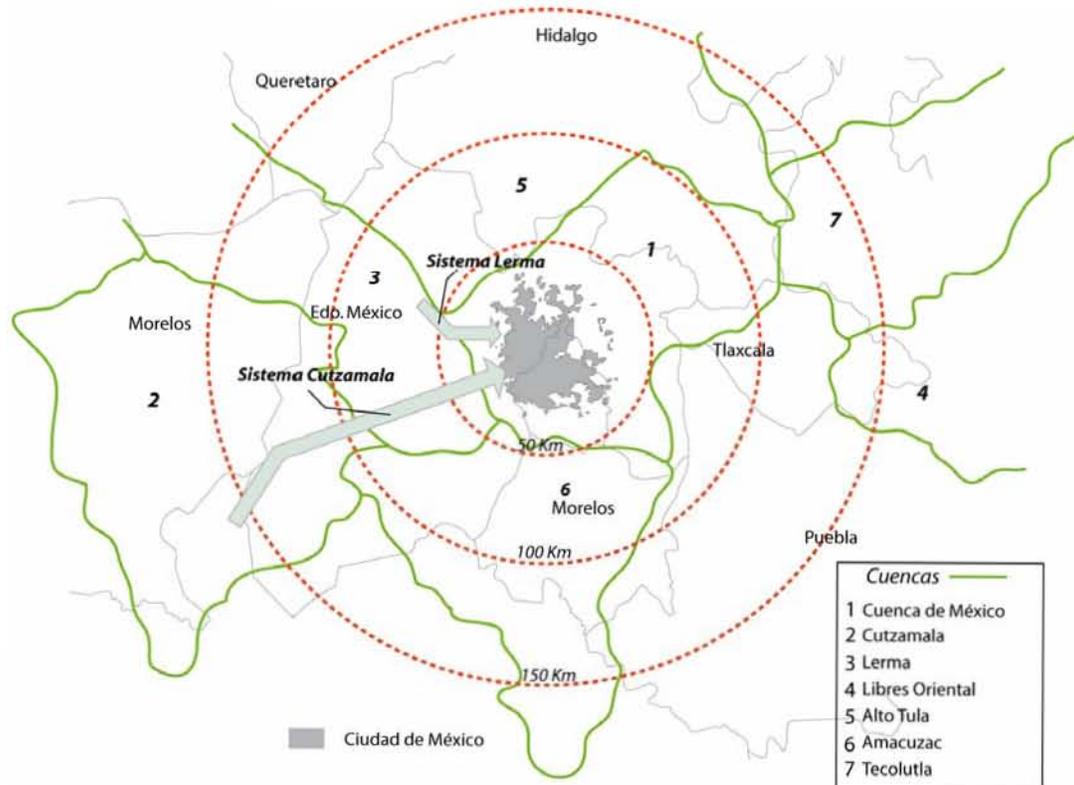


Figura 18. Fuentes externas de agua de la Ciudad de México (Adaptado de Benítez-Eslava, 2005)

Como se indicó anteriormente, el sistema Lerma fue el primer sistema de importación de agua para la Ciudad de México. Ubicado a 62 km, suministra a la Ciudad de México 14 m³/s de agua tomada de más de 200 pozos perforados en el Valle de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, ambas localizadas en la cuenca alta del río Lerma (Esteller y Díaz-Delgado, 2002). Como lo indica Delgado (2003), la explotación de agua mediante el sistema Lerma, disminuyó notablemente el rendimiento de las áreas agrícolas de la región, generando nuevos flujos de migración de campesinos en busca de nuevas fuentes de sustento. Así mismo, Esteller y Díaz-Delgado (2002), indican que la construcción del corredor industrial Toluca-Lerma, actualmente uno de los más productivos del país, y el rápido aumento poblacional que generaron las nuevas actividades manufactureras, se

vieron beneficiadas por la existencia del sistema, generando un aumento de los caudales de extracción. Como resultado de la explotación intensiva, actualmente se presenta en la zona de la cuenca alta del río Lerma agrietamientos y subsidencia de terreno, así como, desecación lenta de los sistemas húmedos del sector.

Como se ha podido ver a lo largo de este capítulo, en la Ciudad de México los sistemas de flujo de agua subterránea han sido y son la principal fuente de abastecimiento de agua potable. En este sentido, las zonas de descarga de agua subterránea funcionan como un motor más que preponderante de la evolución de la ciudad y deben ser por lo tanto protagonistas permanentes en el desarrollo de las políticas urbanas que determinan su futuro. Sin embargo, el conocimiento de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México sólo ha sido determinado y aplicado en trabajos de tipo científico (y ha sido olvidado en su aplicación práctica en los problemas cotidianos de abastecimiento de agua y de desarrollo territorial. Lo que es más evidente, es que las características de las zonas de descarga de agua subterránea, no han sido consideradas en detalle y con especial atención, por lo que no sorprende que se tengan problemas ya comunes como el desecamiento de lagos, el hundimiento de la ciudad, cambios de calidad de agua, entre otros.

Al dejar de un lado este conocimiento, las manifestaciones negativas relacionadas a la explotación de las fuentes hídricas de la ciudad, han alcanzado amplitudes muchas veces inesperadas, como es el caso de la subsidencia debida a la extracción de agua subterránea. Como se vera en el siguiente capítulo, la equivocada interpretación de la subsidencia como un fenómeno relacionado con el agotamiento de las fuentes hídricas y la *sobreexplotación* del agua subterránea, y no con las condiciones hidrogeológicas de las zonas de descarga, ocasionó que las políticas de urbanización de la Ciudad de México propiciaran asentamientos densamente poblados en zonas muy vulnerables a la aparición de esta manifestación.

3 SUBSIDENCIA EN LA CUENCA DE MÉXICO: MUESTRA PALPABLE DE LA ESCALA TEMPORAL Y ESPACIAL DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA

En el proceso de búsqueda de nuevas fuentes de aprovisionamiento de agua para la ciudad, el agua subterránea fue la solución más notable. Sin embargo, también hicieron su aparición una serie de efectos colaterales relacionados con la explotación del agua del subsuelo. Entre éstos estaban la desaparición de manantiales y la consecuente desaparición de ecosistemas dependientes de los sistemas de flujos de agua subterránea. Pero tal vez, el efecto negativo más notable en la ciudad por la amplitud espacial de sus repercusiones y la importante cantidad de daños que ha producido sobre la infraestructura urbana, ha sido la subsidencia de terreno.

Como se verá en este capítulo, la aparición de este fenómeno y la gran extensión de su afectación, hicieron tangible la extensión espacial regional de los sistemas de flujos de agua subterránea de la Cuenca. No obstante, también generó un proceso de animadversión por parte de las autoridades gestoras del agua contra la explotación de agua subterránea, y es actualmente un argumento común para generar predicciones catastróficas y excesivas en respaldo del concepto recurrente de “*sobreexplotación*” de agua subterránea.

La subsidencia se considera a menudo como el miembro pobre en la familia de los riesgos, esto quizás porque raramente suceden hechos directos que deriven en muertes. A excepción de algunos eventos espectaculares, como cuando hay un derrumbe en una cueva o en una mina vieja, generalmente la subsidencia no es visualmente dramática. De todas formas la subsidencia puede afectar ciudades enteras y puede dañar innumerable infraestructura. En muchos países, el costo total de un hundimiento puede ser igual o mayor que los daños producidos por un derrumbe o un terremoto. Por ejemplo, en los Estados Unidos el costo estimado por el *National Research Council* (1991), por daños e inundaciones producto de la subsidencia de suelo superaba en 1991 los 125 millones de dólares. Se piensa que si las áreas afectadas fueran enumeradas plenamente, se establecerían

claramente las relaciones causa-efecto y de alguna manera se pudieran asignar valores a los diferentes elementos naturales afectados en el proceso de subsidencia, la cifra sería sustancialmente mayor.

La subsidencia sucede en muchas áreas de diferentes partes del mundo, particularmente en regiones litorales muy pobladas (Hu *et al.*, 2004). La mayor parte de las áreas poblacionales más importantes, probablemente empezaron a sufrir subsidencia después de la Segunda Guerra Mundial, cuando aumentaron fuertemente las tasas de extracción de agua, aceite y gas. En 1995 se reportaron unas 150 ciudades en el mundo, donde la subsidencia era substancial (Barends *et al.*, 1995). Como lo indica Poland (1984), a fines de los años 1970 Japón tenía el mayor número de áreas con problemas de subsidencia que cualquier otro país (cerca de 40). En Tokio y Osaka se observó subsidencia mayor a 4 m en el periodo de 1928 a 1943.

Uno de los procesos de subsidencia más conocido por la importancia de la zona que afecta, es el que sucede en Venecia, Italia. Esta ciudad litoral y topográficamente baja, siempre ha estado sujeta a inundaciones causadas por la marea alta. En la zona del puerto de Marghera, debido a la fuerte extracción de agua subterránea para uso industrial, la subsidencia en el periodo de 1930 a 1973 llegó a ser de 0.15 m (Bouwer, 1978). Actualmente la tasa de hundimiento está entre 0.001 m y 0.005 m/año (Carbognin *et al.*, 2004).

Otra importante ciudad con problemas de subsidencia es Londres, Inglaterra. La subsidencia observada en buena parte de la ciudad es debida principalmente a la compactación de depósitos de arcilla causada por el abatimiento de la superficie piezométrica, de entre 0.6 y 0.18 m (Bouwer, 1978) y que en 1976 fue de 0.35 m. En el distrito de Cheshire, en Gran Bretaña, la subsidencia en 1977 alcanzó los 15 m (Poland, 1984).

En los Estados Unidos, más de 44,000 km² de superficie presentan subsidencia. De éstos aproximadamente 8,000 están relacionados con la minería, 26,000 con la extracción de agua subterránea y 9,400 km² con el drenaje de suelos orgánicos

(Soliman *et al.*, 1998). Las zonas afectadas en este país son muchas; en el denominado Valle de San Joaquín, California, la extensión de la subsidencia es de aproximadamente 13,500 km². En Baton Rouge, Louisiana, la superficie piezométrica se ha abatido 60 m desde el comienzo de la extracción de agua en 1890, lo que, en el distrito industrial donde se ha concentrado la extracción, ha causado una subsidencia de 0.3 m. En el área de Houston-Galverson, Texas, la subsidencia ha sido de 1,5 m (Bouwer, 1978).

En México la subsidencia se presenta en diferentes zonas y principalmente en ciudades asentadas en la región del Cinturón Volcánico Transmexicano. La información respecto a las ciudades donde se observa subsidencia es relativamente escasa. La *Figura 19* indica los principales casos de subsidencia ocurridos en el país.

El estado de Guanajuato, en el centro de México, presenta un importante número de zonas afectadas por subsidencia y agrietamiento, relacionadas con la extracción de agua subterránea, principalmente en la región de Celaya, Irapuato y en el Valle de Santiago. En la ciudad de Salamanca, ubicada en Irapuato, el proceso de subsidencia está reportado desde los años 1980 y todo indica que está relacionado con la extracción de agua subterránea realizada por medio de unos 1,600 pozos (Mejía *et al.*, 2001); esto ha generado la activación de fallas geológicas y agrietamiento del terreno en áreas urbanas y rurales produciendo considerables daños en la infraestructura urbana e instalaciones industriales. Borja y Rodríguez (2004), sugieren que las fallas producidas han facilitado la entrada de sustancias contaminantes desde la superficie a los sistemas de agua subterránea, y han causado daños a la infraestructura. El promedio de hundimiento del suelo es de 0.06 m/año. En Juventino Rosas, un pequeño asentamiento poblacional al noreste de Salamanca, el hundimiento acumulado es cerca de 2 m. Así mismo, en León, Guanajuato se ha calculado que el área del aeropuerto de esa ciudad, ha presentado subsidencia de 1.25 m en diez años.

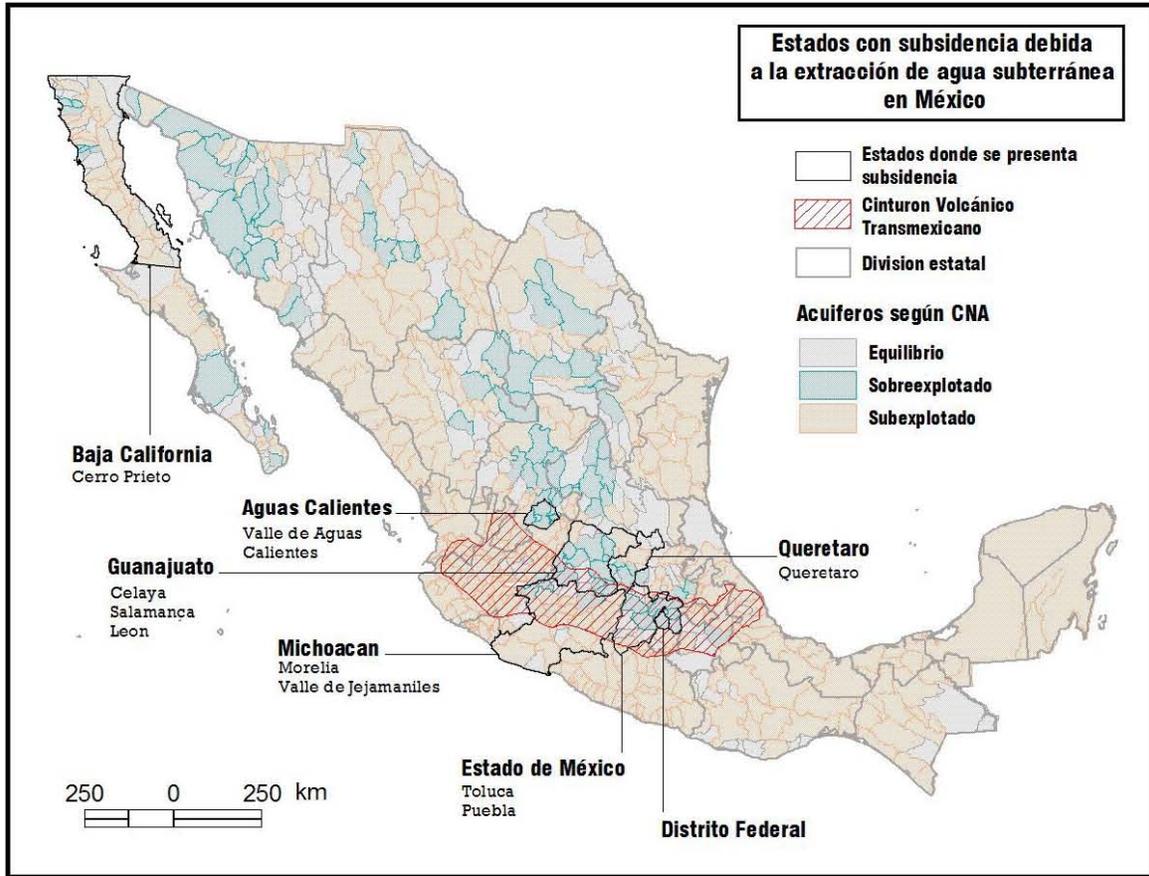


Figura 19. Estados con subsidencia atribuida a la extracción de agua subterránea en México

Procesos de subsidencia también han producido agrietamientos y fallas en el área de la ciudad de Aguascalientes. Según Arroyo (2003), ésta es debida a la extracción de agua subterránea en los últimos 10 a 15 años. Así mismo, en la región occidental de la ciudad de Querétaro se han registrado agrietamientos en el terreno y subsidencia del suelo a lo largo de una traza que las autoridades locales han interpretado como una falla geológica. Esta grieta y la subsidencia del terreno han ocasionado daños importantes a la infraestructura urbana (Aguirre-Díaz *et al.*, 2000). El hundimiento en Querétaro, puede llegar a los 0.5 m al oriente de la ciudad y al poniente puede ser de 1.1 m (Manilla *et al.*, 2001).

En Morelia, Michoacán, la subsidencia se inició a principios de la década de 1980, Garduño-Monroy *et al.*, (2001) indican que las primeras grietas que eran casi

imperceptibles, evolucionaron hasta convertirse en fallas con movimientos diferenciales de 1.0 m. El movimiento vertical anual en las fallas es de 0.04 a 0.06 m.

La subsidencia puede también ocurrir donde hay extracción de agua termal, utilizada generalmente para desarrollar energía eléctrica. Aunque la literatura enumera pocos casos, en México se presenta subsidencia por extracción de agua subterránea geotermal utilizada para generar electricidad. En Tejamaniles, en el estado de Michoacán, se encuentra el campo geotérmico de Los Azufres en donde después de 6 años de extracción de agua termal se ha medido una subsidencia de 0.16 m (Manilla *et al.*, 2001). En Baja California, en el campo geotermal de Cerro Prieto, se extrae agua termal desde 1973 por medio de 127 pozos para la producción de energía geotérmica. Esto ha producido procesos de subsidencia que presenta velocidad mínima de hundimiento de 0.08 m/año y una máxima de 0.12 m/año (Glowacka *et al.*, 2000).

3.1 El fenómeno de subsidencia: Generalidades físicas y factores que influyen

La UNESCO (1992) en el Glosario Internacional de Hidrología, define la subsidencia como *i)* la decantación de los sedimentos que arrastra una corriente de agua y *ii)* como el descenso de nivel de una zona considerable de superficie de terreno debido al arrastre del material líquido o sólido subyacente o a la eliminación de materiales solubles por disolución en agua. Sin embargo, otros autores consideran que la subsidencia relaciona el movimiento vertical y/o lateral del subsuelo y los efectos asociados en la superficie y es esencialmente una respuesta superficial al proceso de compactación de sedimentos en diferente profundidad del subsuelo (Whittaker y Reddish, 1989)

Las causas de la subsidencia son múltiples, éstas pueden tener un origen natural. En ese sentido los más comunes pueden ser movimientos tectónicos, respuestas sísmicas, procesos de erosión natural (meteorización de terrenos, deslizamientos, etc.). Así mismo pueden tener origen antrópico, tales como los resultantes de actividades de explotación minera, extracción de agua subterránea, extracción de

petróleo, extracción fluidos geotermales, disolución de suelos orgánicos por actividades agrícolas, extracción de agua subterránea de unidades arcillosas, inundación de zonas secas con depósitos de baja densidad, entre otras actividades humanas relacionadas con el fenómeno. Como lo indica Whittaker y Reddish (1989), importantes procesos suceden en el subsuelo cuando se presenta extracción de agua, u otro tipo de fluido depositado en éste. Evidentemente el interés de esta sección es la subsidencia debida a la extracción de agua subterránea.

Cuando hay extracción de agua subterránea del subsuelo se presenta un reacomodamiento de éste, dando origen a la compactación de suelos o a grandes fallas y fracturas. La mayor subsidencia se presentan cuando el descenso en el nivel freático es alto, y el espesor de los acuíferos o acuífardos es grande y muy compresible (Bouwer, 1978)

La teoría que sentó las bases de la consolidación y describe la relación entre el cambios de niveles de agua y la deformación del sistema acuífero, es la teoría de Terzahi, en la que, como lo indica Bouwer (1978), el factor crucial es el esfuerzo efectivo o presión íntergranular en el acuífero y otros materiales subterráneos. Este esfuerzo efectivo es la presión trasmitida a través de los puntos de contacto de partículas individuales (grava, arena, limo o arcilla). Cuando el esfuerzo efectivo se incrementa –por ejemplo, poniendo más carga en el material granular– los granos individuales se mueven relativamente el uno contra el otro produciendo consolidación del material. En general un acuífero puede presentar consolidación reversible, o irreversible, pero la mayor parte de subsidencia es permanente (U.S. Geological Survey, 1999)

La deformación reversible (*Figura 20*) Puede ocurrir en todos los materiales granulares del subsuelo. En general esta teoría indica que cuando el soporte suministrado por el fluido que se encuentra entre los poros de un material disminuye por el retiro de éste, como sucede cuando disminuye el nivel freático, el soporte faltante se trasfiere al esqueleto del material, causando reacomodo de las partículas y por consiguiente un grado determinado de compactación. Si el fluido

retorna, lo que puede suceder cuando se recupera el nivel freático en el sistema de flujo de agua subterránea, el fluido retoma parte del soporte dado a la estructura y provoca expansión. De esta manera, un material acuífero puede expandirse o contraerse, conforme el sistema se esté recuperando o abatiendo. Estas fluctuaciones crean pequeñas deformaciones y desplazamientos en el acuífero, y son comunes en las unidades acuíferas como resultado del cambio en el nivel freático (U.S. Geological Survey, 1999).

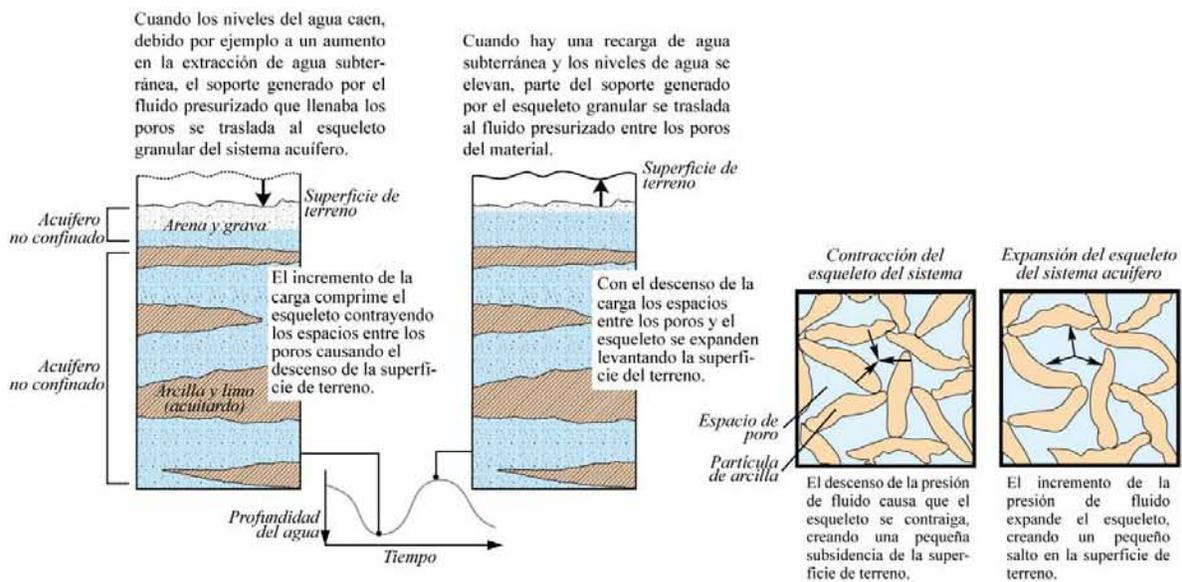


Figura 20. Deformación reversible de un sistema acuífero (Adaptado de U.S. Geological Survey, 1999)

El nivel de esfuerzo en la compactación reversible, es calificado de esfuerzo de preconsolidación. Cuando la carga en el esqueleto de un acuitardo excede este esfuerzo de preconsolidación, las partículas que conforman el esqueleto pueden sufrir un permanente reordenamiento, resultando en **compactación irreversible** (Figura 21).

Un bombeo permanente provoca el descenso de los niveles de agua subterránea y aumenta el estrés en los acuitardos más allá del umbral de pre-consolidación. En consecuencia el acuitardo se compacta de manera permanente.

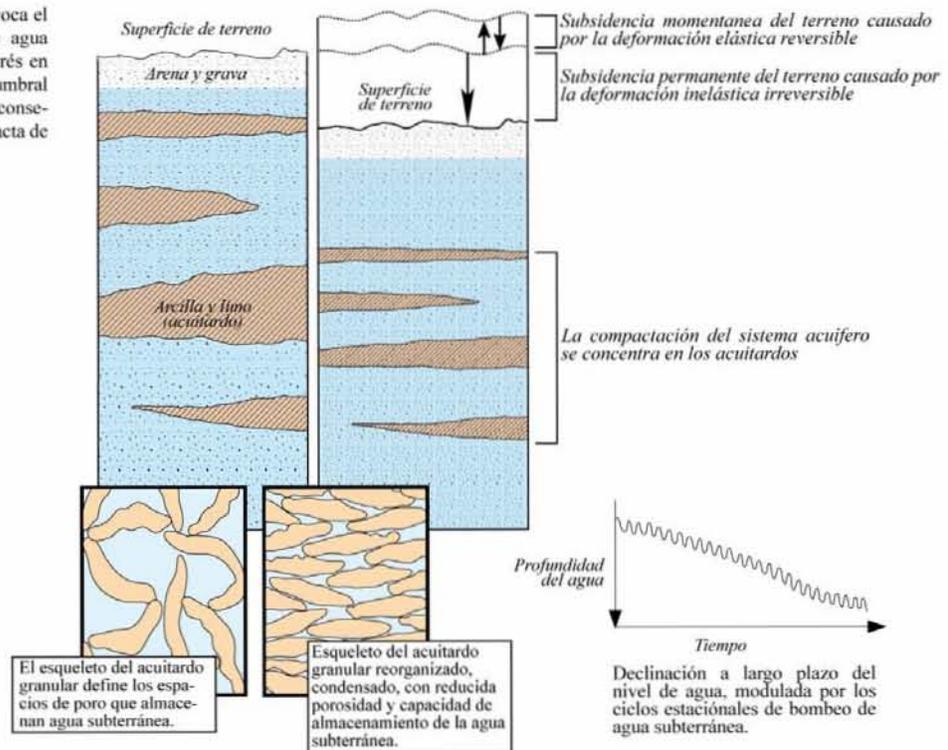


Figura 21. Deformación irreversible de un sistema acuífero (Adaptado de U.S. Geological Survey, 1999)

Terzaghi plasmó su teoría en la siguiente ecuación:

$$\sigma_T = \sigma_e + \rho \quad (1)$$

Donde:

σ_T Esfuerzo total

σ_e Esfuerzo efectivo

ρ Presión de poro

La ecuación (1) es evidente si se imaginan las fuerzas verticales en un acuífero considerado en un plano horizontal (Figura 22). La fuerza descendente en este plano es igual a el peso de todo lo que esta sobre ella. Sin embargo, hay también una fuerza ascendente en el fondo del plano que es debida a la presión hidráulica,

que se da por la adición entre el esfuerzo efectivo o presión intergranular y la presión de poro que es llevada y transmitida por los granos individuales en sus puntos de contacto. Como se indicó anteriormente los cambios prolongados en los niveles de agua subterránea inducen a la subsidencia permanente (*Figura23*).

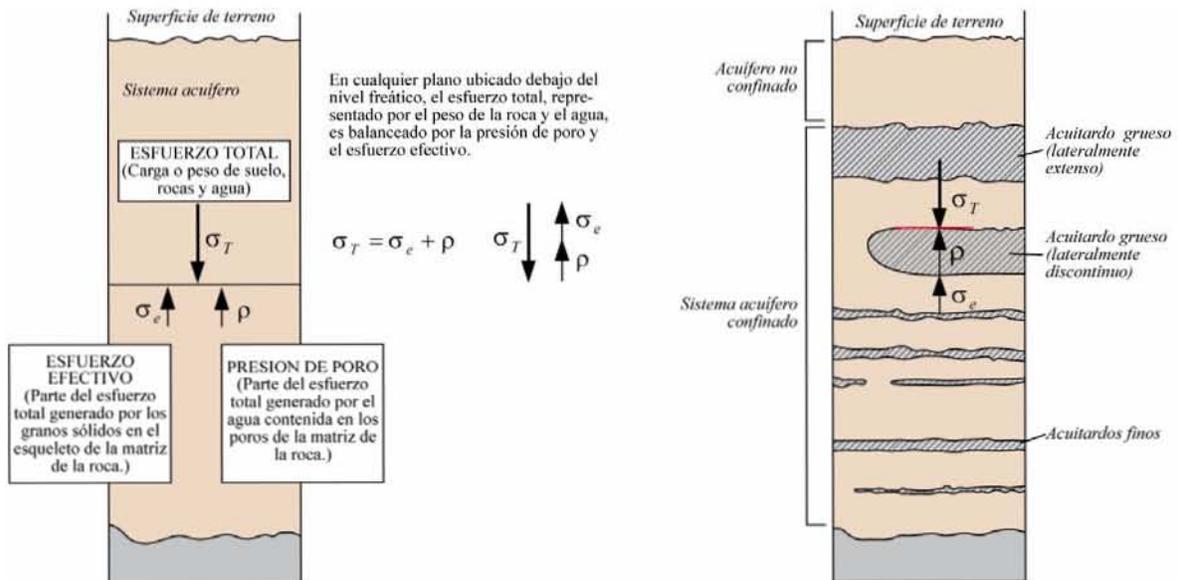


Figura 22. Principio de la fuerza efectiva (Adaptado de U.S. Geological Survey, 1999)

Cuando la causa principal de la subsidencia es la extracción de agua subterránea, es importante interpretar y entender exhaustivamente el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea. Como lo indican Hernández y Carrillo-Rivera (1997), al incorporar el funcionamiento los sistemas de flujo de agua subterránea en los procesos de subsidencia se pueden incorporar cuatro aspectos estrechamente ligados con la reducción del agua en poro: *i)* reemplazo de agua fría por agua caliente, *ii)* migración de agua a otro estrato geológico, *iii)* cambio de dirección de flujo ascendente (descarga) a flujo descendente (recarga) y *iv)* influencia de la construcción de infraestructura en las condiciones del suelo.

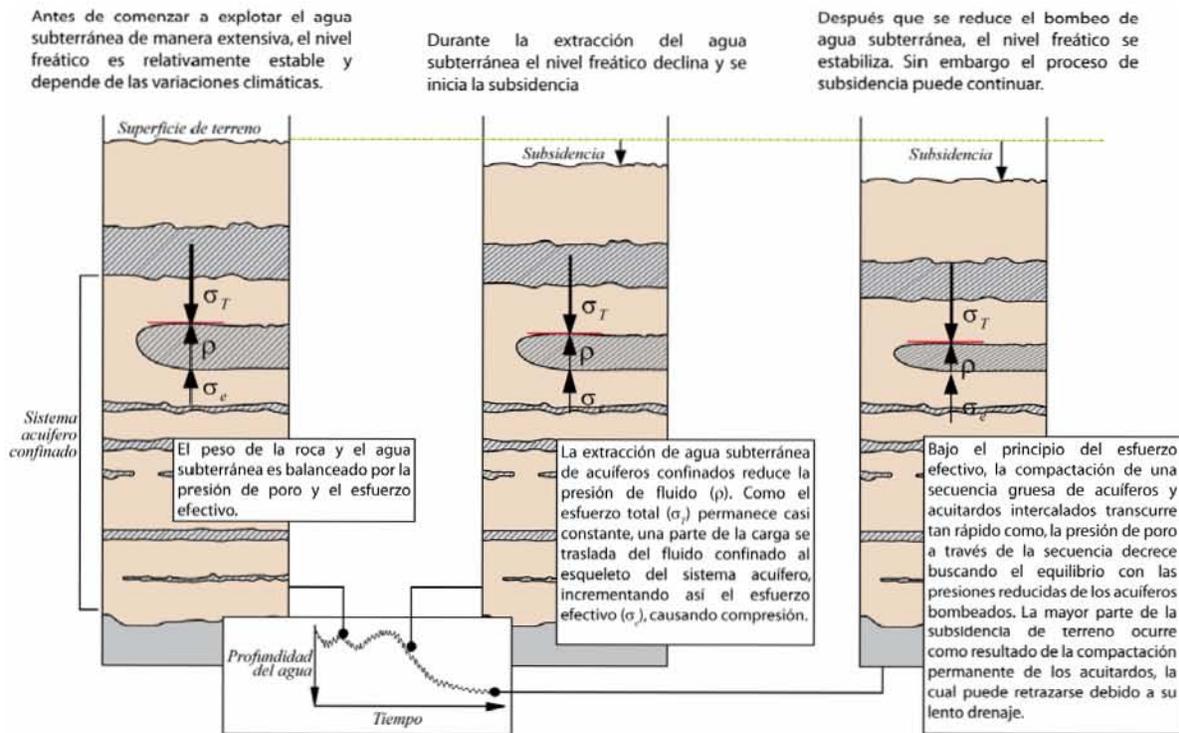


Figura 23. Evolución de la subsidencia con la extracción de agua subterránea acuífero (Adaptado de U.S. Geological Survey, 1999))

3.2 Evolución de la subsidencia en la Ciudad de México

La subsidencia de la Ciudad de México está relacionada con la extracción de agua y la consecuente disminución en la presión intersticial. Es un fenómeno que ha sido más estudiado desde el campo de la ingeniería civil y por tanto ha estado mucho más relacionado con las condiciones geotécnicas del terreno que con las condiciones hidrogeológicas del agua subterránea.

La aparición de la subsidencia en la Cuenca de México se remonta a la época de los aztecas, quienes presionados por las demás civilizaciones asentadas en la región, se asentaron en las zonas lacustres y pantanosas. Gracias al desarrollo de diversas tecnologías de construcción y cimentación pudieron construir infraestructuras de gran tamaño. El relleno del suelo de esas zonas, que en muchos casos supera los 10 m, les permitió realizar construcciones de gran talla como lo fue el Templo Mayor, ubicado en lo que hoy es el Zócalo de la ciudad. Antes de ser derribado por los españoles esta edificación se elevaba a más de 36

m de altura, sobre un relleno que alcanzaba los 11 m (Mazari y Alberro, 1990). Sin embargo, como lo reportan diferentes investigaciones, muchas de las construcciones de los aztecas tuvieron hundimientos de terreno mayores a los 6.5 m (Mazari y Alberro, 1990).

Con respecto a la medición del nivel de finales del siglo XX, la Ciudad de México presenta un hundimiento actual de terreno que sobrepasa los 10 m. Esto ha sido la causa de numerosos daños en la infraestructura pública y privada, así como también, un importante factor multiplicador de los problemas por inundación que afectan a la población de diferentes zonas de la Cuenca.

Aunque las fuentes de agua subterránea con las que cuenta la Ciudad de México podrían abastecerla de agua por muchos años, hay dificultades técnicas para salvar una serie de problemas e inconvenientes que genera la extracción local (Consejo Nacional de Investigación, 1995). Como lo indica Ortega-Guerrero (1999) el abastecimiento de agua potable para la gran población de la ciudad, se obtiene en su mayor parte de la extracción de agua subterránea de una gruesa capa de material aluvial-piroclástico lacustre, que forma una unidad acuífera granular que responde a la extracción como semi-confinada y que se extiende a lo largo y ancho de la planicie de la cuenca. Esta unidad está semi-confinada por un acuitardo conformado básicamente por sedimentos de edad Cuaternaria altamente compresibles (con porosidad comprendida entre el 60 y 90%), con partículas del tamaño de arcillas y alto contenido de materia orgánica. Delgadas capas de material volcánico, comúnmente llamadas capas duras, se encuentran intercaladas en el acuitardo, y tienen rangos de espesor que van de centímetros hasta varios metros, con una extensión significativa.

A principios del siglo XX, la ciudad tuvo un sinnúmero de problemas de cimentación y estabilidad de terreno. Los primeros indicios preocupantes de la subsidencia en la Ciudad de México se presentaron casualmente como resultado de una polémica acerca de un supuesto cálculo erróneo de la pendiente hacia las puertas de San Lázaro en el canal principal de agua residual de la Ciudad. En 1925, Roberto Gayol concluyó que no se trató de un error de cálculo, y demostró

que el problema fue resultado del hundimiento de esa parte de la ciudad el cual, en su opinión, fue provocado por la, reciente construcción del sistema de drenaje (Figuroa, 1984).

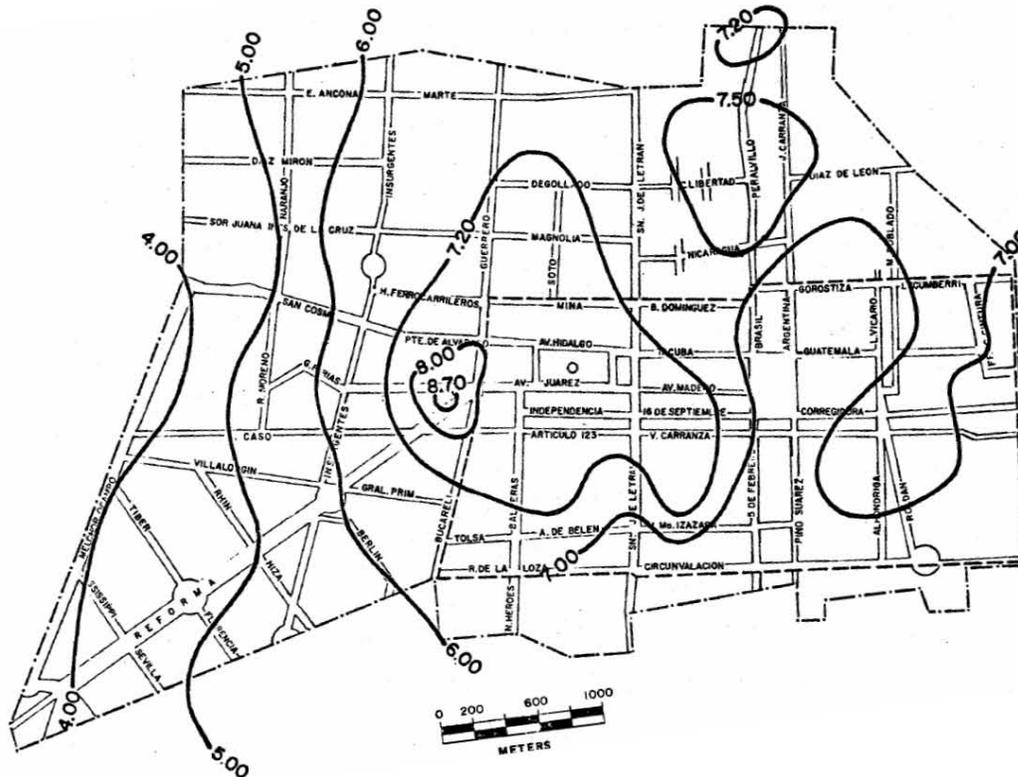


Figura 24. Subsistencia en el Centro histórico entre 1891-1973. (Adaptado de Comisión de aguas del Valle de México, 1975)

Veintitrés años después, Nabor Carrillo demostró que la principal causa de la subsidencia era la extracción de agua subterránea a través de los pozos municipales y en 1948 publicó una evaluación extensa del fenómeno (Carrillo, 1948), encontrando una relación directa entre la extracción y la magnitud de la subsidencia causada por la consolidación de la capa de sedimento lacustre, lo que luego fue corroborado por los trabajos de Marsal y Mazari (1959). A partir de las investigaciones de Carrillo y la demostración de que la principal causa de la subsidencia es la extracción de agua subterránea, las autoridades de la ciudad instalaron un sistema de 300 piezómetros multi-nivel localizados por toda la planicie lacustre, y colocaron puntos de nivelación con el fin de observar el

comportamiento de la subsidencia y el cambio de presión a diferente profundidad. La instalación de los piezómetros se acompañó de una extensa investigación del sedimento lacustre llevada a cabo por Marsal y Mazari (1959), determinando que éste presentan un alto contenido volumétrico de agua y alta compresibilidad de los sedimentos debido a la estructura del material fino que produce el alto contenido volumétrico de agua y que es la principal causa de la subsidencia.

La nivelación del terreno practicada regularmente permitió determinar la evolución de la velocidad de subsidencia en diferentes partes de la ciudad. En la parte central (actual centro histórico) se conocían datos desde 1891 (*Figura 24*). La *Figura 25*, indica que la velocidad de hundimiento en esta zona, desde principios de siglo hasta 1938, fue de 0.046 m/año, la cual se incrementó en los años 1940 a 0.16 m/año, y alcanzó la máxima velocidad de 0.45 m/año en los años 1950. En 1952 la subsidencia, reportada inicialmente en el centro de la ciudad, fue conocida para el total de la ciudad. Con la aparición de la subsidencia, surgieron también fracturas superficiales principalmente a lo largo del Paseo de la Reforma y las calles paralelas dentro de la zona del acuitardo, y en la parte noroeste de la ciudad (Figueroa, 1984).

En el año de 1954, después de una serie de fuertes inundaciones que afectaron principalmente el centro histórico, la en ese entonces Comisión de Aguas del Valle de México tomó la medida de detener la extracción de los pozos ubicados en la ciudad, buscando así detener el hundimiento del terreno. Los pozos cerrados fueron remplazados con nuevos campos de extracción de agua subterránea en la periferia. Por la trascendencia que este plan ha tenido en muchas de las políticas de gestión de agua llevadas a cabo en la Ciudad de México durante buena parte del siglo XX, este documento se analiza con mayor detalle en el siguiente numeral (3.3.1).

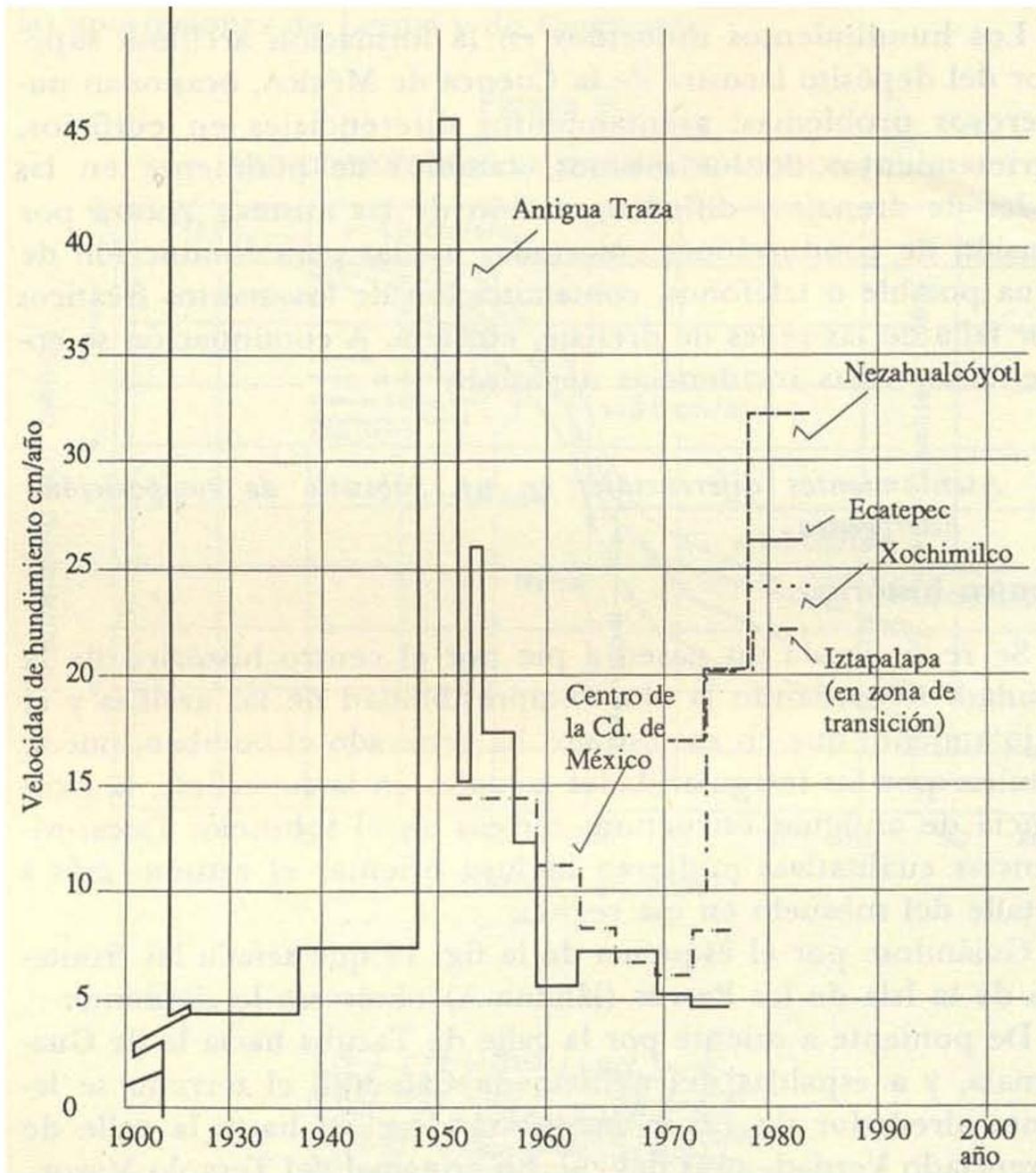


Figura 25. Velocidad de subsidencia en diferentes áreas de la Ciudad de México (Tomado de Mazari y Alberro, 1990)

La importación de agua de otras cuencas como es el caso de los sistemas Lerma y Cutzamala, fue otra medida tomada con el fin de detener la subsidencia disminuyendo la explotación de las fuentes de la ciudad, y de paso aumentado el caudal de agua. Sin embargo, las medidas de control tomadas para eliminar o

controlar el hundimiento del terreno no fueron efectivas. La veda de extracción de agua subterránea disminuyó el hundimiento en el centro histórico de la ciudad (Figuras 25 y 26), pero la redistribución de la extracción, y la creación de campos de pozos en Chalco, Tláhuac, Xochimilco y Netzahualcóyotl, zonas de descarga natural de agua subterránea, resultó en el traslado del problema a estos sectores, regionalizándolo. Además, como lo indican Esteller, *et al* (Esteller y Andreu, 2005, Esteller y Diaz-Delgado, 2002), la extracción de agua subterránea mediante los pozos del sistema Lerma, generó la aparición de subsidencia acompañada de agrietamiento de terreno en la parte alta de la Cuenca del río.

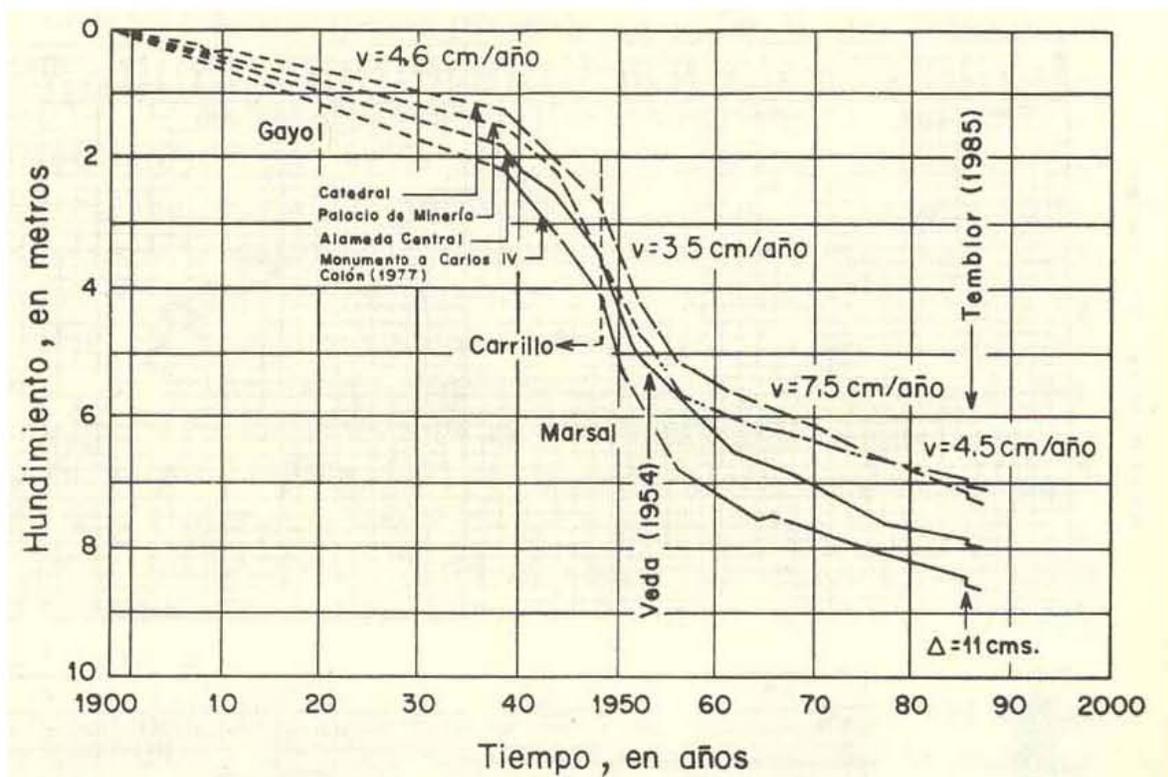


Figura 26. Subsistencia en el Centro Histórico (Figuroa, 1973)

Diferentes campañas de nivelación llevadas a cabo entre 1983 y 1996 (Werner *et al.*, 2000), permitieron determinar una velocidad máxima de subsidencia de 0.28 m/año, en la zona del aeropuerto de la Ciudad de México (Figura 27). Así mismo se observa el aumento de la velocidad de subsidencia en la región de Chalco de 0.125 m/año a 0.225 m/año. En la zona del antiguo lago de Texcoco se tiene al

presente un lago artificial que es usado para el control de inundaciones. Este fue formado a fines de los años de 1960, mediante la instalación de una red de pozos de extracción de agua subterránea instalados sobre el estrato lacustre que bombeó agua durante 7 meses continuos, periodo en el cual se logro inducir una subsidencia de 3 m.

Aunque por diversas razones la información sobre la evolución de la subsidencia en la Cuenca de México de los últimos 20 años es de difícil acceso y obtención, actualmente es posible encontrar en la literatura especializada documentos que han desarrollado su análisis por medio de la comparación de imágenes satelitales de diferentes periodos de tiempo. Esta comparación, aunque carece de especificidad, permite revisar la conformación de la subsidencia a nivel regional en la última década.

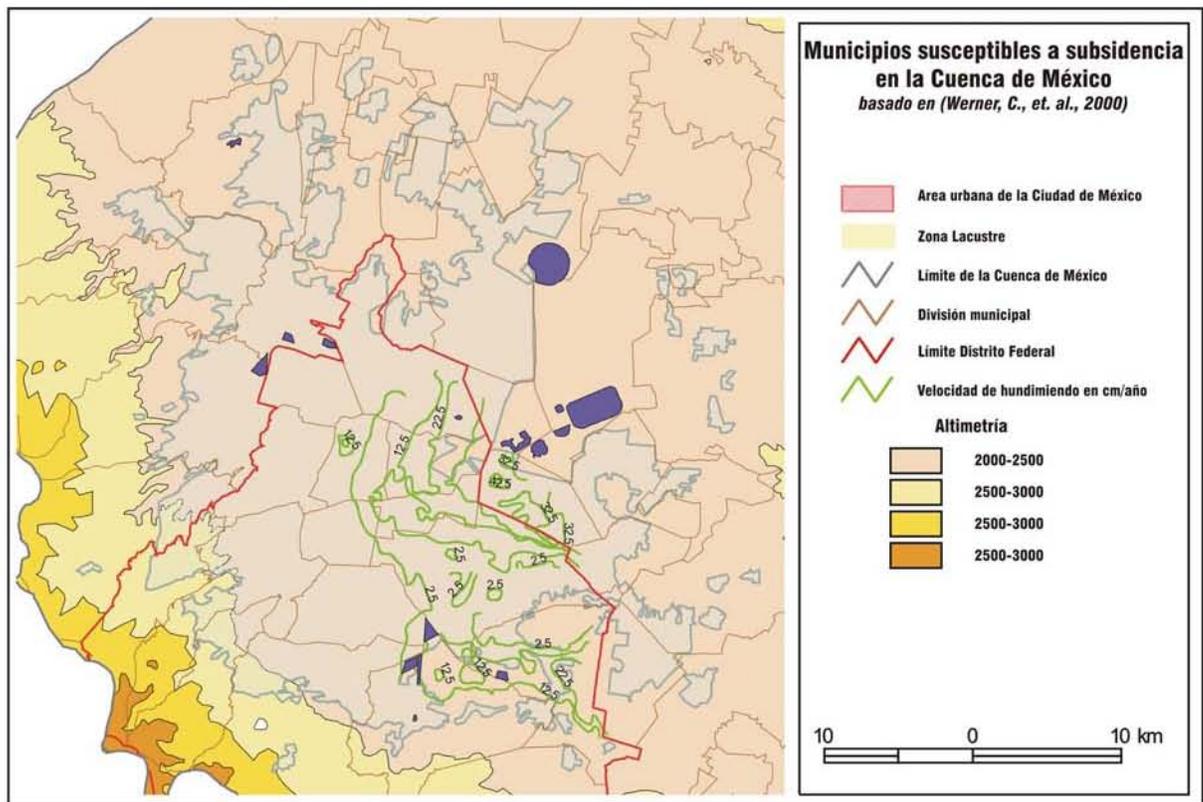


Figura 27. Velocidad de subsidencia en cm/año en la Ciudad de México entre 1983 y 1996 (Adaptado de Werner et al., 2000)

La interferometría Radar a Síntesis de Apertura (SAR, Synthetic Aperture Radar) es una técnica espacial potente que permite medir una escasa (milimétrica) deformación de la superficie terrestre a partir de datos adquiridos por satélite. Strozzi y Wegmüller (1999) monitorearon la subsidencia regional de la Ciudad de México mediante la comparación de imágenes SAR obtenidas del ERS 1 y 2 (European Remote Sensing Satellite 1 y 2) entre diciembre de 1995 y septiembre de 1997. Estos determinaron que en ese periodo la subsidencia se extendía en grandes áreas hacia el sureste y centro-noreste de la ciudad, y en muchos casos la velocidad de hundimiento superó los 0.30 m/año (*Figura 28*). Los máximos valores de hundimiento fueron detectados en la zona del aeropuerto donde la velocidad de subsidencia fue calculada en 0.47 m/año (Strozzi y Wegmüller, 1999). Así mismo, los análisis indican la agudización de los procesos de subsidencia al sureste de la ciudad (Strozzi *et al.*, 2003). Corroborando lo anterior, Cabral-Cano *et al.* (2002), indican que el hundimiento de la ciudad de México entre febrero de 1996 y enero de 2000 ha alcanzado una velocidad de 0.378 m/año en su parte este. En ese mismo periodo la parte central de la ciudad presentaba tasas de subsidencia de 0.115 m/año, aproximadamente.

Aprovechando el modelo desarrollado por Rivera (1990), Carnec *et al.*, (2000) combinaron los parámetros de subsidencia obtenidos entre 1995 y 1996 mediante el análisis de datos SAR (*Figura 29*). Este estudio confirma las conclusiones a que llegaron otros trabajos: En la actualidad, la mayor velocidad de subsidencia se encuentra en las zonas del aeropuerto-Texcoco, Chalco y en Zumpango, al noroeste de la ciudad.

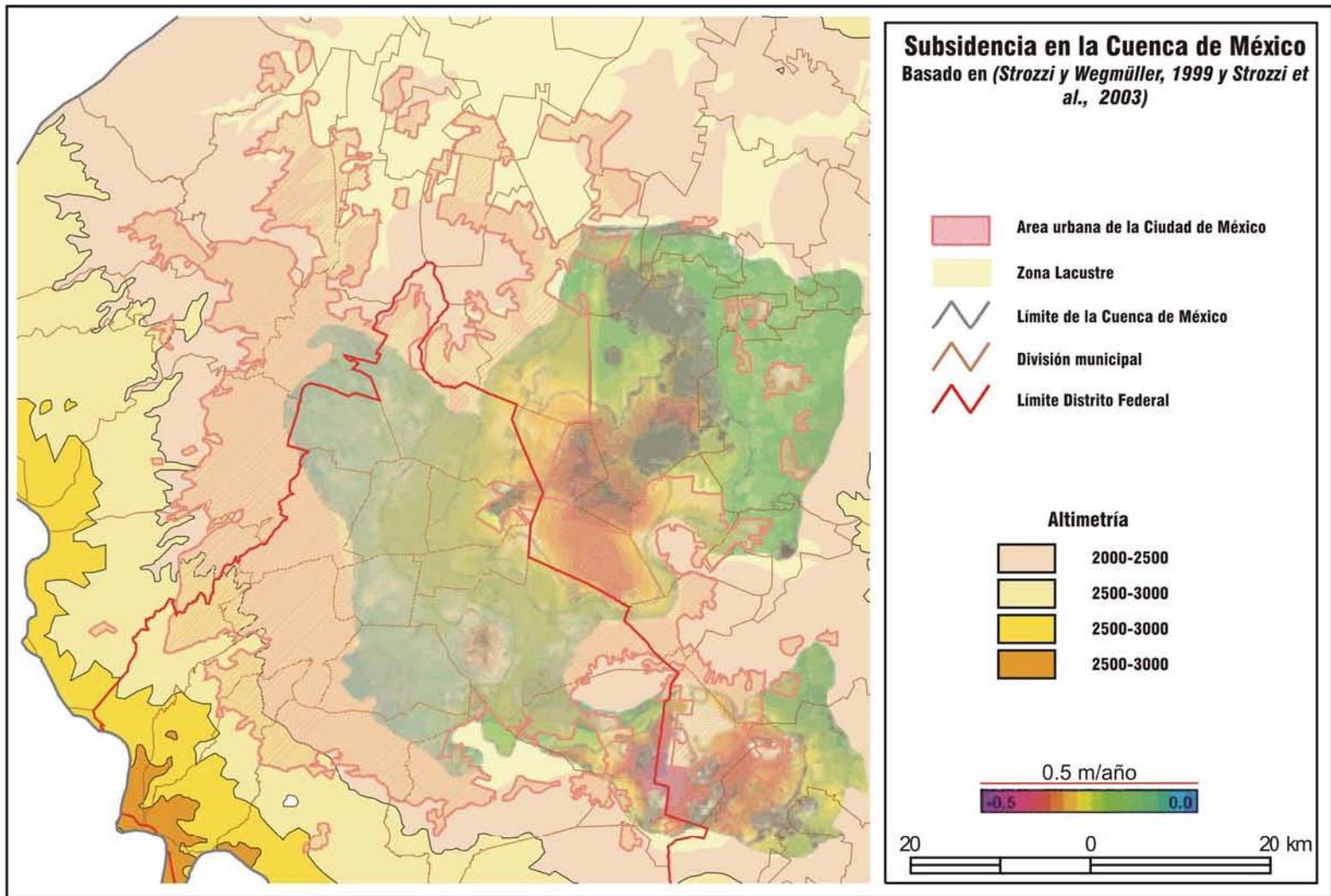


Figura 28. Velocidad de subsidencia en la Ciudad de México entre 1995 y 1997, según Strozzi y Wegmüller (1999)

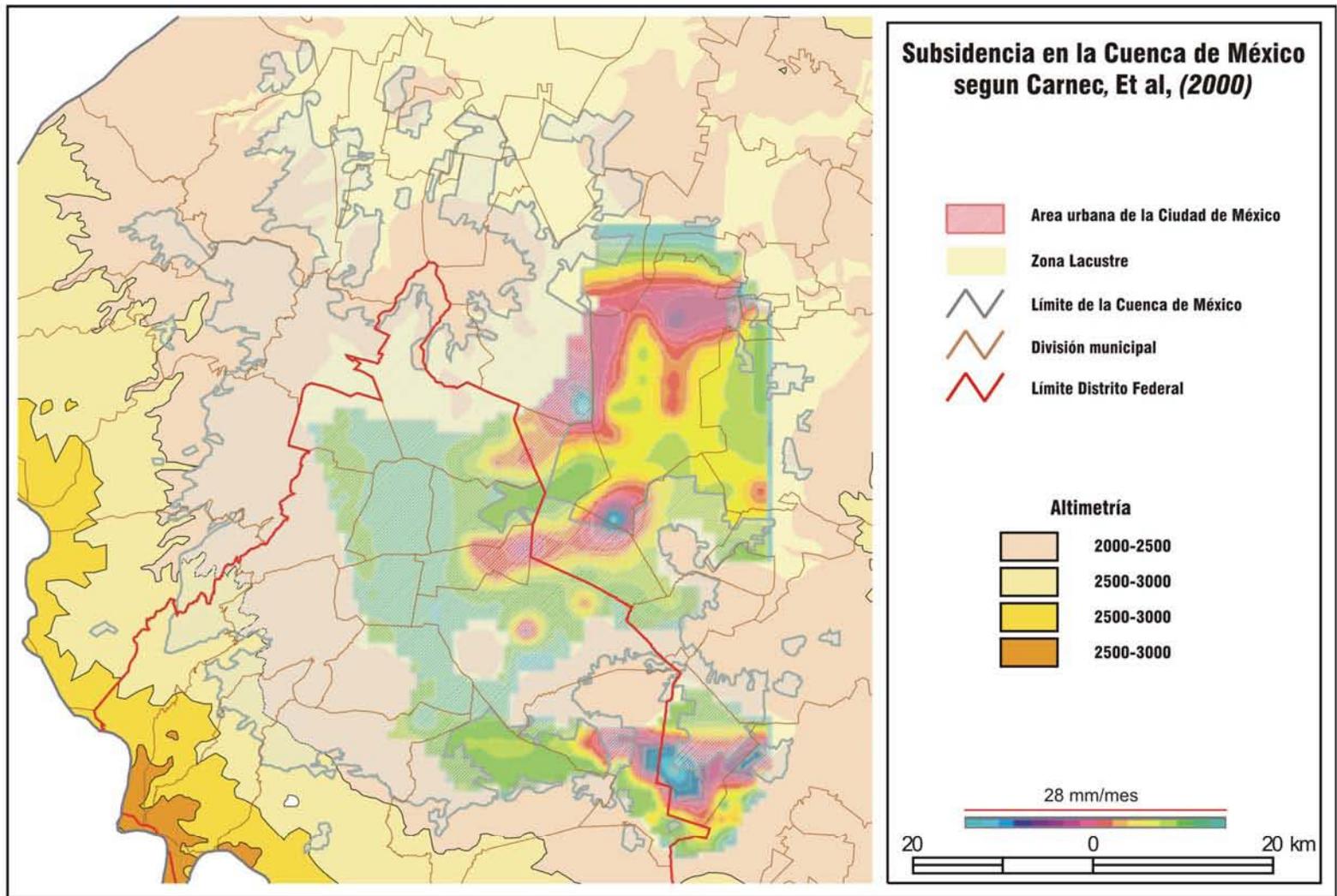


Figura 29. Velocidad de subsidencia en la Ciudad de México entre 1995 y 1996, según Carnec, et al. (2000)

3.2.1 *El plan general para resolver los problemas de hundimiento de 1954 y su incidencia en la regionalización de la subsidencia.*

Por mucho tiempo el agua subterránea fue percibida como una fuente casi ilimitada y sobre la cual se soportó en parte el explosivo crecimiento demográfico y económico de la ciudad. Sin embargo, a comienzo de siglo XX las manifestaciones negativas que fueron apareciendo, cada vez más intensas y continuas, sorprendieron a los encargados de su gestión. En ese contexto histórico, surge el plan de 1954, coherente con el limitado conocimiento del funcionamiento de agua subterránea, y que pretendía mejorar rápidamente la gestión del agua en la ciudad. Sin embargo como se mostrará en este apartado, el desconocimiento de las dimensiones espacial y temporal de los flujos de agua subterránea produjo irremediamente el efecto contrario al esperado (el de detener los hundimientos), y terminó por desencadenar el problema de la subsidencia a nivel regional.

En 1953, el jefe del Departamento del Distrito Federal creó la “Dirección General de Obras Hidráulicas del Departamento del Distrito Federal” (DGCOH), encargada de estudiar el hundimiento de suelo, de hacer proposiciones para resolverlo y de ponerlas en marcha. Un año después, esta institución presentó el *“Plan general para resolver los problemas de hundimiento, las inundaciones y el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México”* (Departamento del Distrito Federal, 1954), señalando una serie de recomendaciones a seguir con el fin de detener el hundimiento de la ciudad. La principal sugerencia del plan fue la de disminuir la extracción de agua subterránea en el sector urbano de la ciudad de 9.4 m³/s a 2.5 m³/s, con el objetivo de detener o disminuir la subsidencia. Para compensar la restricción a la extracción de agua subterránea, el plan propone transferir esta extracción hacia *“cuencas secundarias”* e *“hidrológicamente independientes”* de la cuenca hidrológica de la ciudad. Los análisis de costos y los presupuestos llevados a cabo en este plan, indicaban que la extracción de agua del subsuelo de sectores alejados de la ciudad era mucho más económica que la posibilidad de explotar fuentes hídricas superficiales lejanas.

El plan sugería la extracción de agua subterránea de diferentes sectores ubicados en las denominadas *cuencas secundarias*: De la zona de Chimalhuacán, al este de la ciudad; de Chiconautla-Teotihuacan, al noreste; y de Chalco al sur. Igualmente, se proponía aumentar la batería de pozos de Xochimilco. De esta manera, el proyecto contemplaba extraer de esos sectores 8 m³/s de agua, permitiendo así, disminuir la extracción de agua subterránea en la ciudad a 2 m³/s.

Como resultado de lo planteado en este plan, el Departamento del Distrito Federal adoptó las recomendaciones de este reporte y con la expedición de un decreto (*Decreto de veda de la Cuenca del Valle de México para la extracción de agua subterránea*), el 19 de agosto de 1954 se prohibió oficialmente la extracción de agua subterránea en la ciudad. En 1958 se construyeron 40 pozos en Chiconautla, y 13 en 1959 en el sector del Peñón del Marques. Así mismo, En Chimalhuacán se perforaron 10 pozos, y en Chalco Amecameca 18.

Si bien estas acciones permitieron aumentar el caudal de agua potable de la ciudad y disminuyeron sensiblemente el hundimiento del centro histórico, también tuvieron fuertes repercusiones negativas a nivel regional, las cuales influirían sobre las políticas de gestión del agua durante los siguientes 20 años.

Las disposiciones destinadas a detener o controlar el hundimiento del terreno no fueron del todo efectivas. En efecto, mientras la veda de extracción de agua subterránea disminuyó sensiblemente el hundimiento progresivo del centro de la ciudad, la redistribución de la explotación mediante la creación de nuevos campos de pozos, transfirió el problema a otras zonas de la cuenca confiriéndole al fenómeno una amplitud de mayor extensión. Igualmente, si bien la creación de nuevos campos de pozos benefició sectores de la ciudad que no contaban con aprovisionamiento de agua potable, éstos beneficiaron también el auge de la urbanización ilegal y el creciente mercado de especulación de terrenos. La presencia de nueva infraestructura hídrica atrajo nuevos habitantes aumentando así la concentración de población en estos sectores y de paso la población susceptible a ser afectada por problemas de inundación, de aprovisionamiento de agua potable y de marginación espacial.

En términos generales, el modelo de gestión de agua que se diseñó a partir de las recomendaciones trazadas en el plan general de 1954 y las fuertes repercusiones negativas, como lo fue el agravamiento y la regionalización de la subsidencia, pueden deberse a tres factores:

i) En esta época, los conocimientos científicos relativos al agua subterránea y a sus implicaciones eran aún muy limitados y se encontraban en plena evolución.

Las teorías sobre el funcionamiento del agua subterránea aseguraban que las cuencas hidrológicas determinaban también las fronteras del agua subterránea en el subsuelo, y se hablaba comúnmente de cuencas subterráneas. Igualmente se pensaba que a imagen de las cuencas superficiales, las cuencas subterráneas no estaban ligadas las unas con las otras. Como se indicó anteriormente, en la actualidad la teoría de los sistemas de flujo ha permitido mostrar como el agua subterránea fluye entre cuencas, y como todo cambio en una parte del sistema, puede tener repercusiones a diferentes escalas espaciales.

ii) Los datos y fuentes de información eran insuficientes y de poca fidelidad. Este problema es reconocido de manera explícita en el texto del Plan General de 1954, que deplora la falta de datos consistentes en muchos de los aspectos tomados a consideración. Por ejemplo, con respecto a la estimación de la demanda de agua y al crecimiento demográfico, el documento indica (Departamento del Distrito Federal, 1954: 15):

“Se analiza en primer termino, el crecimiento de la población **sin pretender que la predicción pueda ser correcta**, sino una simple base para determinar las posibles demandas de agua, la cual deberá rectificarse con los resultados de censos venideros. Para cuantificar el abastecimiento de los acuíferos de la Cuenca y los escurrimientos superficiales de ella, se presentan a continuación cálculos referentes a la hidrológica de México; por **ser insuficientes los datos disponibles, las estimaciones de esta parte del informe son poco precisas**”

A pesar de la carencia de guarismos científicos, era necesario hacer previsiones demográficas para poder estimar la dotación de agua en el avenir de la ciudad y las obras de ingeniería que serían requeridas. Estos cálculos se efectuaron con la ayuda de

modelos estadísticos basados en la tasa de crecimiento de la ciudad, con estimaciones que en el presente se pueden constatar de poco precisas. Para el caso de la subsidencia: si bien se tenía una idea general de la manifestación, no se conocía claramente su dimensión real, y no se disponía ni de referencias ni de datos suficientes sobre la relación entre el subsuelo y los sistemas de flujo de agua subterránea.

iii) La selección de los sectores donde construir los nuevos campos de extracción de agua subterránea, no fue preconizado ni por estudios previos socio-económicos, ni por estudios físicos. La insuficiencia de información y de conocimiento científico se reflejó también en la selección de los nuevos sectores de explotación de agua subterránea. Como lo indican Durazo y Farvolden (1989), una vez decretada la veda en 1954, la construcción y ubicación de los nuevos campos de pozos respondió más a la facilidad de acceso a los terrenos que a las condiciones hidrogeológicas del acuífero. De hecho, una de las incongruencias más importantes del documento, es la recomendación de los sitios de extracción fundada sólo en el concepto de cuencas hidrológicas independientes, dejando la realización de estudios de tipo hidrogeológico, hidrogeoquímico y sociales, como una condición a posteriori, casi secundaria.

La extracción de agua subterránea en el municipio de Chalco ilustra con claridad lo dicho anteriormente. A partir de los años 1960, siguiendo las recomendaciones del plan general de 1954, se construyeron pozos de extracción en las márgenes de la sierra de Santa Catarina, en un sector con una gran multiplicidad de procesos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, con un fuerte crecimiento demográfico y con complejas dinámicas sociales. Por ejemplo, en esta zona de la cuenca, la capa de sedimentos lacustres altamente compresibles es mayor de 300 m de profundidad (Ortega y Farvolden, 1989), y la tasa de crecimiento poblacional en la década de 1960 era superior al 6% (Gobierno del Estado de México, 2003), producto, entre otros, de la urbanización ilegal y la creciente migración hacia la ciudad. Sin embargo, estas condiciones no fueron determinadas con claridad antes de seleccionar a Chalco-Amecameca para la descentralización de la explotación de agua subterránea. Con el aumento constante de la extracción de agua subterránea, que gracias a la construcción del campo de pozos

de Santa Catarina era a fines del siglo XX cercana a 8 m³/s (Ortega-Guerrero, 1999), se generó en esta área una de la subsidencia de terreno más severa del mundo. Como lo indica Ortega-Guerrero (2006), la velocidad de hundimiento actual es mayor a los 4 m/año, y la subsidencia acumulada hasta 1991 es de 10 m. Esto ha afectado la red de drenaje de aguas negras que en muchos tramos ha dejado de ser funcional. La repercusión es tal, que en la temporada de lluvias estas zonas sufren intensas inundaciones, afectando zonas urbanas de alta densidad poblacional, conformadas en su mayoría por habitantes de bajos recursos económicos.

3.3 Controles de la Subsidencia en la Cuenca de México

En la literatura especializada, diferentes autores (Carrillo-Rivera *et al.*, 1997, Cruickshank, 1985, Hernández García y Carrillo-Rivera, 1997, Ortega-Guerrero, 1999, Rivera, 1990) han concentrado sus esfuerzos en intentar representar los procesos de consolidación causantes de la subsidencia observada en la Cuenca. Evidentemente, el proceso es complejo, aun más cuando su principal característica es la variación de los parámetros hidráulicos que controlan los flujos de agua subterránea durante la consolidación (principalmente la conductividad hidráulica), haciendo de éste un proceso no lineal con el tiempo (Cruickshank, 1985).

Con la idea de representar los procesos de consolidación de suelo en la Cuenca de México, diversos autores han intentado reproducir el complejo proceso, determinando diferentes supuestos que permiten simplificar su modelación. Desde el punto de vista del acuitardo a escala regional, estos supuestos son dos: *i*) la respuesta de los parámetros hidráulicos es no lineal con el tiempo y *ii*) la consolidación se manifiesta preferentemente en el plano vertical; lo que permite realizar un análisis en una dimensión del proceso de consolidación (Ortega-Guerrero, 1999). Ortega (1999) considera que los supuestos más importantes son: *i*) en primer lugar que el cambio del flujo vertical en el acuitardo de un sistema semi-confinado (como lo es el sistema acuífero de la Cuenca) es válido no únicamente para analizar el cambio en la carga hidráulica, sino también, para simular el proceso de subsidencia, y *ii*) debido a la prevalencia del componente vertical del flujo de agua subterránea en el acuitardo, el componente de flujo horizontal tendría poca influencia.

Para sustentar estos supuestos (Ortega-Guerrero, 1999) expone el fuerte contraste de conductividad hidráulica entre el acuífero y el acuitardo, donde la conductividad del acuífero es varios órdenes de magnitud mayor, lo que hace que el flujo lateral inducido en el acuitardo por la despresurización en un acuífero adyacente sea insignificante, y por lo tanto el proceso es casi unidimensional en el sentido vertical.

Los supuestos anteriormente mencionados ya habían sido considerados por Rivera (1990) quien desarrolló una metodología con el fin de modelar simultáneamente a escala regional el flujo de agua subterránea y la respuesta de la subsidencia. Usando valores regionales promedio en el acuitardo y condiciones límite basados en diferentes evidencias tomadas de un balance de agua regional, Rivera (1990) representó el flujo lateral en el acuífero en dos dimensiones y un flujo vertical unidimensional en el acuitardo sobrepuesto, incorporando los cálculos en una formulación casi tridimensional. El modelo intenta explicar la evolución de la compactación no lineal y la subsidencia total en sistemas multi-capa, integrando soluciones numéricas del flujo de agua subterránea con la ecuación unidimensional de Terzaghi.

Si bien estos modelos han dejado algunas indicaciones de cómo puede evolucionar la subsidencia en la cuenca, usualmente no incorporan factores que pueden tener fuerte significación sobre el proceso. Entre los más importantes se destacan los dos siguientes:

i) La disminución de la saturación de agua de un material acuífero, producto generalmente del descenso del nivel freático, provoca así mismo la disminución de la conductividad hidráulica en varios órdenes de magnitud (Freeze y Cherry, 1979, Hunt, 2004, Nielsen *et al.*, 1973, Stephens, 2000). Como se puede observar en las *figuras 30, 31 y 32*, la conductividad hidráulica es una variable altamente dependiente de la saturación del suelo, de manera tal, que una arena altamente saturada tiene una conductividad hidráulica cercana a los 10^{-2} cm/s, contrario a una arena en condiciones de instauración la cual presentará una conductividad hidráulica varios millones de veces menor (Stephens, 2000).

En la Cuenca de México la tasa de descenso del nivel freático es en promedio de 1.4 m/año. Esto significa que las condiciones hidráulicas en un área importante del acuífero han cambiando de condiciones de semi-confinamiento a condiciones libres. Lo anterior ha generado grandes porciones de saturación parcial en la parte del acuífero ubicada entre el nivel freático actual y el techo del acuitardo, disminuyendo el paso de agua del acuitardo hacia el acuífero subyacente.

Al desconectarse hidráulicamente el acuitardo del acuífero, es muy probable que se presente una drástica disminución de la velocidad de hundimiento, ya que, la cantidad de agua que migra del acuitardo y que es responsable de buena parte del proceso de consolidación, se irá reduciendo de manera exponencial (Carrillo-rivera *et al.*, 2002). Una investigación desarrollada por Carrillo-rivera *et al.* (2002) en el área de Xochimilco, determinó evidencias de este proceso. Un nivel freático localizado 46 m debajo de la base del acuitardo fue coincidente con puntos en la zona de estudio donde la velocidad de hundimiento ha disminuido casi hasta 0.0 m/año y de hecho en algunos casos se han presentado “rebotes” (valor de hundimiento positivo) o saltos de terreno de la zona analizada.

ii) La inducción de flujo regional (profundo) de agua subterránea por pozos de extracción profunda, indica la existencia de componentes de flujo vertical ascendente, la disminución de la magnitud del flujo descendente del acuitardo, y por tanto una disminución de su velocidad de consolidación. Diferentes investigaciones (Carrillo-rivera *et al.*, 2002, Huizar-Alvarez *et al.*, 2004) demuestran que el componente vertical descendente, considerado el principal factor de consolidación del sistema acuífero en los modelos de representación de la subsidencia, no es en muchos de los casos de la magnitud que se estima. Como se puede derivar de estas investigaciones, una importante parte del agua extraída no proviene del acuitardo, sino de flujo regional ascendente conformado por flujos inducidos de mayor profundidad.

Huizar-Alvarez *et al.* (2004) realizaron diferentes pruebas de bombeo en conjunto con mediciones de campo de temperatura y sólidos totales disueltos (STD) con el fin de interpretar el origen de cada flujo extraído en el sur de la Cuenca de México. Como lo indican Huizar-Alvarez *et al.* (2004) la interpretación de las pruebas estándar de

bombeo con medición adicional de STD y temperatura, proveen una valiosa herramienta para caracterizar el tipo de flujo en la zona de extracción de agua subterránea, y para identificar fuentes adicionales de agua inducida. Así mismo, el uso de la temperatura del agua como un trazador natural permite definir la presencia de flujo proveniente de mayor profundidad. En ese sentido, estos autores encontraron en muchos de los pozos muestreados, temperaturas superiores a los 22°C, y contenidos de STD de 919 mg/l, lo que es interpretado como agua proveniente de flujo profundo. Incidentalmente el nivel freático se encontraba por debajo de la base del acuitardo. Incluso en un trabajo anterior, Edmunds *et al.* (2002) obtuvieron muestras de agua subterránea con temperaturas superiores a los 30°C y altos contenidos de STD.

El hecho de que en el proceso de extracción se esté induciendo la extracción de flujos profundos, indica que el componente vertical descendente está perdiendo magnitud, de lo que se puede derivar que en diferentes partes de la cuenca el acuitardo no está aportando el agua que se ha estimado bajo otras condiciones, y por lo tanto el proceso de consolidación podría estar disminuyendo. Así mismo, se confirma que la componente vertical descendente tomada en consideración en la gran mayoría de los modelos que intentan representar el proceso de consolidación no es generalmente de la magnitud que se debería considerar, y por *ende*, la consolidación, los valores de los parámetros involucrados y su aplicación generalizada necesitan una revisión intensa.

Es importante anotar que estos dos factores descritos, tienen actual incidencia en las zonas donde el nivel freático ha descendido, hasta o más allá, del límite inferior del acuitardo. Considerando que la profundidad promedio del nivel freático en la Cuenca, es de unos 40 a 70 m, este proceso aun no puede ser observado en regiones donde el espesor del sedimento lacustre es relativamente mayor, como es el caso de Chalco, donde este espesor puede alcanzar los 150 m. Aun así, es deseable entender y considerar estos procesos, para ser usados en la búsqueda de soluciones al problema de la subsidencia regional. La consolidación podría ser controlada con planes apropiados de extracción de agua subterránea. En este sentido se puede anotar, por ejemplo, que la concentración de la extracción se puede llevar a cabo en zonas controladas donde se desee acelerar el proceso de desconexión hidráulica.

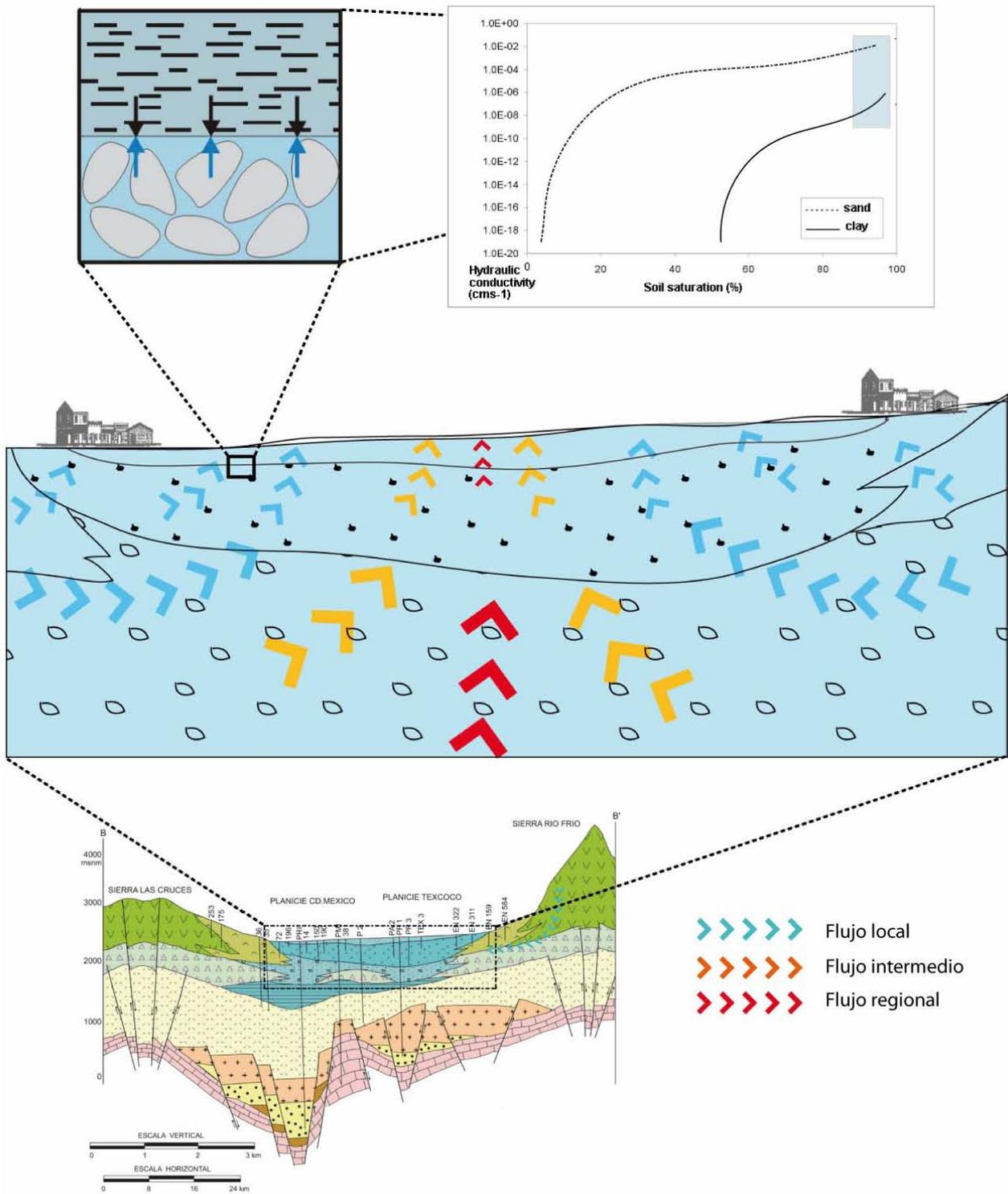


Figura 30. Sistemas de flujo en la planicie lacustre de la Cuenca de México en el siglo XIX y condiciones de la conductividad hidráulica cuando el acuitardo presentaba un alto contenido de saturación de agua (Basado en Stephens, 2000)

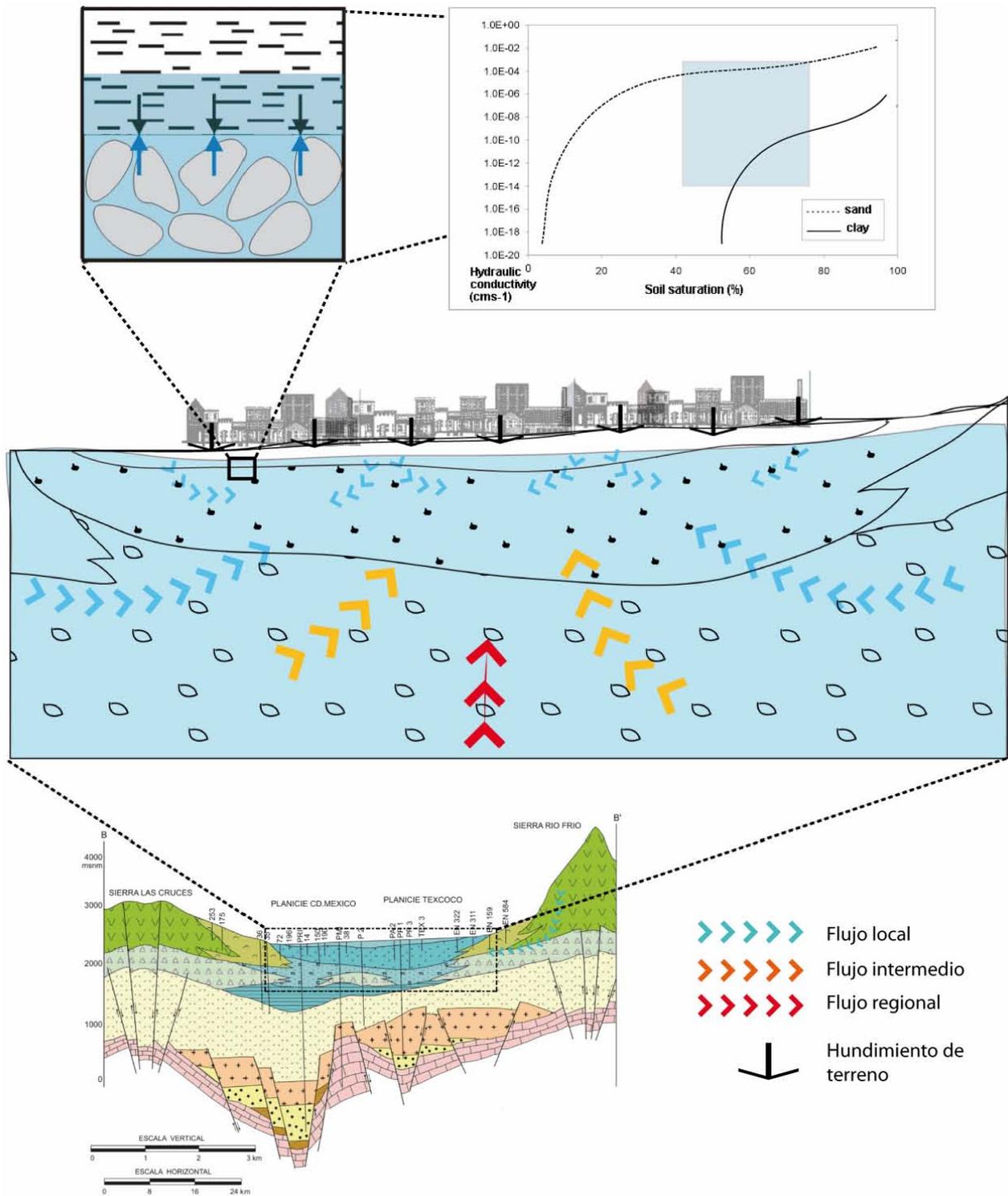


Figura 31. Sistemas de flujo en la planicie lacustre de la Cuenca de México en los años 1940 y condiciones de la conductividad hidráulica con respecto al contenido de saturación de agua (Basado en Stephens, 2000)

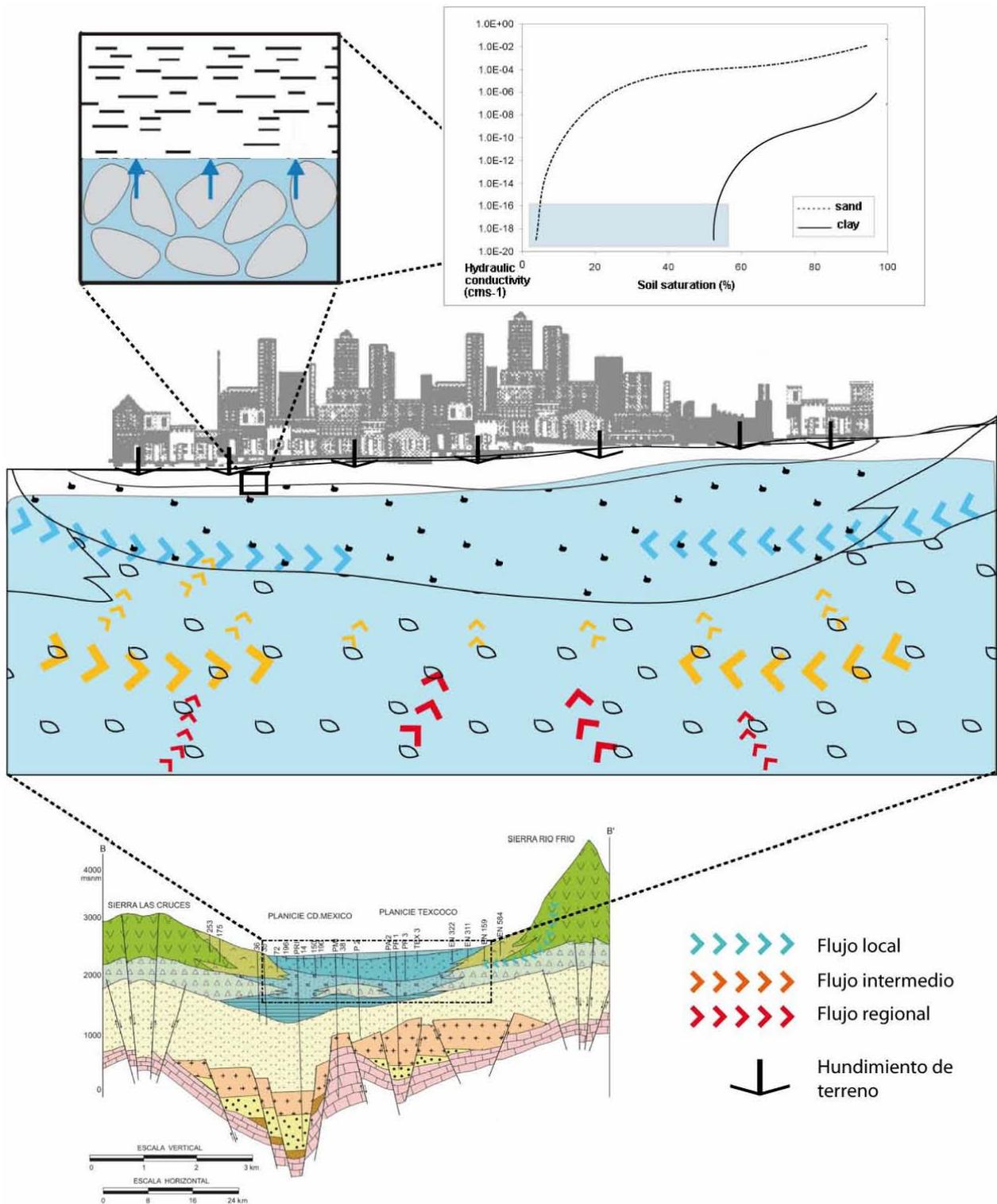


Figura 32. Sistemas de flujo en la planicie lacustre de la Cuenca de México en la actualidad y condiciones de la conductividad hidráulica con respecto al contenido de saturación de agua (Basado en Stephens, 2000)

CONCLUSIONES

A lo largo de este documento, se ha abordado la interacción de la evolución de la Ciudad de México con los sistemas de flujo de agua subterránea desde 3 aspectos principales:

- i)* El funcionamiento de los sistemas de flujo de aguas subterráneas de la Cuenca de México y cómo éstos generaron la bipolarización ambiental de la Ciudad de México entre un oeste dotado de abundantes fuentes de agua y un este desprovisto de agua.
- ii)* Cómo la bipolarización generada por el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea fue determinante en la conformación de los primeros asentamientos urbanos de la cuenca, en los consecuentes procesos de metropolización de la ciudad, y en la nueva escala regional que se está desarrollando en la actualidad.
- iii)* Las variadas dimensiones temporales y espaciales que pueden alcanzar los sistemas de flujo, importante consecuencia de la continuidad hidráulica y la propagación de esfuerzos hidráulicos entre cuerpos de agua subterránea localizados en regiones geográficas distantes, a distintas profundidades y estratos, y en variadas escalas de tiempo. Ejemplo caso: la subsidencia de terreno

Bajo condiciones naturales (antes de la desecación de los lagos y del primer bombeo de agua del subsuelo) el flujo de agua subterránea se dirigía desde las montañas circundantes de la Cuenca hacia las zonas más bajas de la planicie lacustre. En ese sentido, las múltiples fuentes históricas analizadas en esta investigación, permiten indicar que las partes bajas de la cuenca eran en su mayoría zonas de descarga de agua subterránea. Esta descarga se presentaba principalmente a través de un importante número de manantiales ubicados a lo largo de la planicie lacustre, los cuales

alimentaban extensos lagos que cubrían buena parte de la cuenca, y que presentaban variados contrastes dependiendo del flujo subterráneo del cual tenían origen.

El funcionamiento general de los sistemas de flujo en la cuenca, hacía posible encontrar a través de la Cuenca de México marcados contrastes regionales en cuanto a la calidad y la cantidad de agua descargada. Se pueden identificar tres zonas importantes de descarga: *i)* una vasta zona en la parte baja de las sierras del suroeste de la cuenca, donde *flujos locales* de agua subterránea se descargan en grandes cantidades y con buena calidad fisicoquímica para consumo humano, producto de flujos subterráneos de recarga reciente, con baja concentración de sales (STD180 mg/l, Cl, 5-9 mg/l; Ca, 9-17 mg/l; Mg, 8-13 mg/l, K, 4-5 mg/l); *ii)* una zona en el centro de la cuenca, con descarga de *flujos intermedios*, los cuales presentan edades cercanas a los 3,000 años (^{14}C = 50.9 y 53.8 pmc) y concentración alta en sales; y *iii)* una pequeña zona de descarga de *flujo regional*, localizada en lo hoy se denomina el Peñón de los Baños, y cuya presencia se registra desde la época de la colonia. Allí se presentaban hace más de 20 tres importantes manantiales que producían agua termal con alto contenido en sales. La investigaciones llevadas a cabo por Edmunds, *et al.* (2002) indican que son flujos de edades superiores a los 6,000 años, con alto contenido de K, Mg, Ca, B y Li.

En la actualidad el flujo de agua subterránea en el plano horizontal tiene patrones similares a las condiciones originales naturales, es decir tiene una dirección general desde las montañas que rodean la cuenca hacia la planicie lacustre, con la diferencia, de que la descarga se desplazó hacia las zonas donde se presenta la principal reducción de la carga hidráulica, producto de la gran cantidad de extracción de agua, principalmente en Azcapotzalco al norte, Coyoacán, y Tlalpan al sur

La conformación de los sistemas de flujo de agua subterránea y principalmente su descarga, ha jugado un rol clave en la diversidad ambiental de la Cuenca de México, y por ende, en la evolución de la Ciudad de México. Estos han proporcionado a diferentes zonas de la cuenca significativas características ambientales, las cuales se han reflejado en la manera en que sus pobladores han gestionado el espacio y fuentes hídricas.

La variedad ambiental, producto de las diversas descargas de agua subterránea, es ampliamente referida en las crónicas históricas, las cuales describen cómo el noreste de la cuenca era muy limitado en fuentes hídricas contrario a lo que sucedía en el suroeste, donde se encontraban abundantes fuentes hídricas de buena calidad para el consumo humano. Así, gran parte de la descarga se concentraba en las zonas de Chalco, Chapultepec y el lago de Texcoco, mientras que en las regiones del noreste ésta era muy limitada, o de calidad insuficiente para el consumo humano. Esta distribución espacial de las descargas de agua subterránea en la cuenca, “*bipartió*” la ciudad (Delgado *et al.*, 1999), entre un oeste con fácil acceso a agua de buena calidad y en cantidades considerables, y un este caracterizado por la presencia de aguas salobres y condiciones ambientales difíciles para los asentamientos humanos.

De esta manera, un gran número de asentamientos precortesianos se establecieron en las cercanías de los piedemontes, donde flujos locales descargaban en manantiales, y así mismo, los centros de población más notables, se ubicaron en las riveras de los lagos. A su llegada a la Cuenca de México en 1519, los españoles iniciaron un proceso de consolidación urbana basado en los asentamientos ya existentes, por lo cual, heredaron la estructura prehispánica de asentamientos y su eterna división territorial entre el NE árido y el SE fértil. Durante la conquista y la colonia, la polarización espacial de la ciudad siguió siendo marcada por la distribución de las fuentes de agua. Como lo indica Musset (1988), hasta el siglo XIX los manantiales y acueductos jugaron el papel más relevante en la conformación del espacio de la ciudad; por ejemplo la mayor parte de la población se ubicó sobre los trayectos de los caños y cursos de agua, similar a lo que se observa hoy en día a lo largo de las líneas de metro y autopistas.

En el año de 1847, la perforación del primer pozo profundo de extracción de agua, permitió acceder de manera menos limitada a las fuentes de agua y fue probablemente un importante factor de cambio en el esquema de expansión de la ciudad. El fuerte aumento del caudal de abastecimiento logrado con la extracción profunda de agua, permitió sostener así el fuerte crecimiento demográfico que tuvo la ciudad durante el siglo XX, producto de la importante implantación de zonas industriales, y las políticas de substitución de importaciones.

Gracias a la extracción de agua subterránea la ciudad ha tenido la capacidad de sostener el crecimiento industrial y poblacional de la ciudad, y mantener tasas de dotación mayores a los 200 m³/habitante/día. Sin embargo, siempre se han presentado graves problemas de distribución de agua, producto de la heredada polarización ambiental, problemas en el desarrollo de infraestructura de conducción de agua potable, el crecimiento acelerado de barrios marginales, y la concertación de caudal de abastecimiento en las zonas con poblaciones de mejor nivel económico.

El desarrollo de nuevos procesos de reconcentración de la población y de regionalización de la ciudad, dejan entrever nuevas interacciones entre la evolución urbana y los sistemas de flujo. Como se indica a lo largo del documento la ciudad pasó de crecer de manera conurbana y continua, a desarrollar procesos urbanos y socio-económicos de fragmentación espacial, reconcentración de la población del centro hacia la periferia y la redistribución de actividades económicas a nivel regional.

En términos de consumo y explotación de agua, la redistribución de la población se efectúa principalmente hacia los municipios que históricamente han tenido dificultad para el acceso al agua potable, cuya dotación de agua por habitante es inferior al promedio general de las delegaciones del Distrito Federal, y donde el desarrollo de la infraestructura de servicios públicos es limitado y clasificado por el INEGI (2002) en los estratos bajo y muy bajo. Se puede concluir entonces que las nuevas tendencias poblacionales de reconcentración de población de la Ciudad de México están produciendo un realce de la siempre presente división hídrica de la ciudad.

Otro fenómeno importante a nivel urbano considerado en esta investigación fue la difusión espacial de la ciudad a nivel regional. Este proceso de difusión espacial ha repercutido en la relocalización de actividades industriales hacia centros urbanos cercanos a la Ciudad de México, lo cual ha generado una disminución considerable en el consumo industrial de agua en la zona de la ciudad. No obstante, y haciendo referencia a dos componentes que son generalmente desconocidos o tal vez desatendidos en los estudios donde el agua subterránea es un factor predominante, la dimensión espacial y temporal de los sistemas de flujo de agua subterránea, es probable que la relocalización esté generando nuevos procesos de interacción en

puntos lejanos del sistema. La interacción de la urbanización dispersa (denominada por Delgado, 2003, como urbanización *sprawl*) con los sistemas de flujo de agua subterránea es un tema que merece ser desarrollado con mayor amplitud en investigaciones futuras.

En la Cuenca de México, la extracción intensiva del agua subterránea ha generado el descenso de los niveles piezométricos y ha producido consecuentemente subsidencia regional de terreno en gran parte de la cuenca. Esta manifestación, por demás absolutamente negativa para la infraestructura urbana, es considerada en muchos niveles gubernamentales y científicos como una prueba certera de lo que se denomina en la legislación Mexicana “*sobreexplotación de acuíferos*”. El anterior término pretende relacionar las manifestaciones negativas de la extracción de agua subterránea con su agotamiento y futuro final, y es una forma de evitar exponer la equivocada administración del agua.

Sin embargo, cuando en los análisis y estudios de agua subterránea, tanto a nivel estrictamente científico como de su gestión, se utiliza el término “*sobreexplotación*”, se está dejando de lado (o tal vez omitiendo de forma voluntaria) la, tal vez, propiedad más importante de los sistemas de flujo de agua subterránea: *la conductividad hidráulica de materiales geológicos*. Así, cuando un acuífero libre presenta descenso en el nivel freático, se olvida que para que alcance un equilibrio piezométrico se necesitan de décadas o siglos, dependiendo de lo baja que sea la conductividad hidráulica de éste. Cuando se trata de un acuífero confinado y de gran extensión, el descenso no se relaciona directamente con un cambio en el almacenamiento sino con un cambio en las condiciones elásticas del sistema (Llamas, 2000).

Es probable que la subsidencia esté generando un cambio en los esquemas de expansión urbana de las zonas afectadas. Esto se puede afirmar si se analizan diferentes factores relacionados con el problema. Políticas de planeación y urbanismo no muy claras, una gestión de agua en varios aspectos desacertada, aunado a factores de origen socioeconómico y político complejos, han generado dinámicas urbanas en áreas afectadas por la subsidencia, con las repercusiones lógicas que esto tiene sobre esta población. Por ejemplo en Chalco, las diferentes inundaciones que han afectado la

zona, han obligado el inicio de nuevos asentamientos hacia periferias altimetricamente mayores, principalmente hacia el suroeste y noroeste de la Cuenca de México(Ortega-Guerrero *et. al.* 1999). Así mismo, en un principio la oferta de agua establecida y los programas de desarrollo centralista, y actualmente los movimientos migratorios y las condiciones económicas, detonaron el aumento de asentamientos irregulares que precisaron de un mayor abasto, incrementando indirectamente la subsidencia observada en esas zonas.

Las nuevas perspectivas respecto a una gestión adecuada del agua subterránea, desarrollada frente a realidades no sólo físicas sino sociales complejas, deben superar el predominante concepto que establece el agua como un elemento aparte del todo o la creciente tendencia de sobreponerla simplemente en los planes de ordenamiento del gobierno de turno, para ser considerada clave en el desarrollo de las sociedades. En ese sentido, los efectos de gestiones de agua subterránea que no consideran el factor social, se reflejan en la desaparición de antiguas zonas de descarga y la aparición de manifestaciones negativas en áreas de relevancia ecológica y evidentemente social. La utilización del termino “*sobreexplotación*” en la legislación hídrica de la ciudad, es el resultado de la dificultad de los funcionarios públicos para entender e interpretar la literatura científica y la lenta respuesta de los sistemas de flujo, que hace de sus manifestaciones fenómenos de lenta aparición y por lo tanto de lenta respuesta gubernamental.

ANEXOS

CLAVE	MUNICIPIO	POBLACION 1990	POBLACION 2000	DENSIDAD POBLACION	DENSIDAD POBLACION	TASA DE CRECIMIEN	TASA DE CRECIMIEN	TASA DE CRECIMIEN
9002	Azcapotzalco	474688	441008	13961	12971	-0,70	-0,70	-0,70
9014	Benito Juar	407811	360478	15685	13865	-1,70	-0,60	-1,20
9003	Coyoacan	640066	640423	11853	11860	0,40	-0,50	0,00
9004	Cuajimalpa	119669	151222	1710	2160	2,40	2,30	2,40
9015	Cuauhtemoc	595960	516255	18059	15644	-1,70	-1,10	-1,50
9005	Gustavo A.	1268068	1235542	14410	14040	-0,20	-0,40	-0,30
9006	Iztacalco	448322	411321	19492	17884	-1,20	-0,40	-0,90
9007	Iztapalapa	1490499	1773343	13075	15556	2,30	1,00	1,80
9008	Magdalena C	195041	222050	3048	3470	1,50	1,10	1,30
9016	Miguel Hida	406868	352640	8845	7666	-2,00	-0,80	-1,40
9009	Milpa Alta	63654	96773	222	337	4,30	4,10	4,20
9011	Tlahuac	206700	302790	2403	3521	3,80	3,90	3,90
9012	Tlalpan	484866	581781	1564	1877	2,30	1,20	1,80
9017	Venustiano	519628	462806	15283	13612	-1,20	-1,10	-1,20
9010	Alvaro Obre	642753	687020	6695	7156	0,90	0,30	0,70
9013	Xochimilco	271151	369787	2279	3107	3,60	2,50	3,10
15002	Acolman	43276	61250	528	747	4,10	2,70	3,50
15011	Atenco	21219	34435	156	253	4,90	4,80	4,90
15013	Atizapan de	315192	467886	3752	5570	5,40	2,10	4,00
15020	Coacalco de	152082	252555	4002	6646	5,30	4,90	5,10
15023	Coyotepec		35358	707				
15024	Cuautitlan	48858	75836	1810	2809	2,90	6,50	4,40
15121	Cuautitlan	326750	453298	2917	4047	4,40	1,90	3,30
15025	Chalco	106450	217972	475	973	8,90	5,10	7,20
15028	Chiautla	14764	19620	615	818	2,10	3,90	2,90
15029	Chicoloapan	57306	77579	1685	2282	3,90	2,00	3,10
15030	Chiconcuac	14179	17972	2836	3594	1,50	3,50	2,40
15031	Chimalhuaca	242317	490772	4327	8764	9,40	4,10	7,10
15033	Ecatepec de	1218135	1622697	7710	10270	3,20	2,50	2,90
15037	Huixquiluca	131926	193468	923	1353	4,30	3,30	3,90
15039	Ixtapalca	117927	297570	427	1078	8,30	10,80	9,40
15044	Jalteco	22803	31629	1425	1977	2,50	4,40	3,30
15053	Melchor Oca	26154	37716	1308	1886	4,40	2,80	3,70
15057	Naucalpan d	786551	858711	5209	5687	1,20	0,50	0,90
15059	Nextlapan	10840	19532	159	287	5,80	6,10	5,90
15058	Nezahualcoy	1256115	1225972	17945	17514	-0,30	-0,20	-0,20
15060	Nicolas Rom	184134	269546	822	1203	4,50	3,00	3,90
15069	Papalotla	2387	3469	597	867	4,10	3,40	3,80
15070	Paz, La	132610	212694	3900	3256	5,30	4,10	4,80
15081	Tecamac	123218	172813	811	1137	3,30	3,60	3,40
15091	Teoloyucan	41964	66556	912	1447	4,60	4,70	4,70
15092	Teotihuacan	30486	44653	401	588	4,50	3,10	3,90
15093	Tepetlaoxto	16120	22729	109	154	3,30	3,70	3,50
15095	Tepotzotlan	39647	62280	203	319	5,60	3,20	4,60
15099	Texcoco	140368	204102	347	505	3,70	3,90	3,80
15100	Tezoyuca	12416	18852	955	1450	4,90	3,30	4,20
15104	Tlanepantla	702807	721415	9497	9749	0,30	0,30	0,30
15108	Tultepec	47323	93277	1690	3331	8,40	4,80	6,90
15109	Tultitlan	246464	432141	3792	6648	6,80	4,20	5,70
15122	Valle de Ch	71413	99774	1457	2036	6,60	2,80	5,00
15120	Zumpango	198092,00	323461,00	948	1548	4,40	2,00	3,40

Anexo 1. Población, densidad, y tasa de crecimiento poblacional de los municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2002)

CLAVE	MUNICIPIO	DOTACION TOTAL	ESTRATO (INEGI, 2002)	EXTRACCION TOTAL DE AGUA POTABLE*			
				TOTAL	POZO	MANANTIAL	OTRAS FUENTES
9002	Azcapotzalco	0,32	2,00	1,05	1,05	0,00	0,00
9014	Benito Juar	0,46	1,00	0,79	0,79	0,00	0,00
9003	Coyoacan	0,32	1,00	2,31	2,31	0,00	0,00
9004	Cuajimalpa	0,69	2,00	0,28	0,05	0,23	0,00
9015	Cuauhtemoc	0,49	1,00	0,08	0,08	0,00	0,00
9005	Gustavo A.	0,35	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9006	Iztacalco	0,32	2,00	0,25	0,25	0,00	0,00
9007	Iztapalapa	0,27	2,00	1,62	1,62	0,00	0,00
9008	Magdalena C	0,46	2,00	0,29	0,05	0,06	0,18
9016	Miguel Hida	0,49	1,00	0,94	0,94	0,00	0,00
9009	Milpa Alta	0,34	5,00	0,53	0,52	0,00	0,00
9011	Tlahuac	0,25	2,00	0,21	0,21	0,00	0,00
9012	Tlalpan	0,29	3,00	2,06	1,72	0,34	0,00
9017	Venustiano	0,33	2,00	0,15	0,15	0,00	0,00
9010	Alvaro Obre	0,43	2,00	0,62	0,42	0,20	0,00
9013	Xochimilco	0,27	4,00	2,73	2,73	0,00	0,00
15002	Acolman	0,29	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15011	Atenco	0,19	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15013	Atizapan de	0,31	2,00	1,18	0,00	0,00	1,18
15020	Coacalco de	0,26	1,00	0,08	0,00	0,00	0,08
15023	Coyotepec	0,14	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15024	Cuautitlan	0,35	2,00	0,13	0,00	0,00	0,13
15121	Cuautitlan	0,45	2,00	0,60	0,00	0,00	0,60
15025	Chalco	0,22	5,00	0,69	0,69	0,00	0,00
15028	Chiautla	0,39	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15029	Chicoloapan	0,23	4,00	0,03	0,00	0,00	0,03
15030	Chiconcuac	0,23	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15031	Chimalhuaca	0,14	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15033	Ecatepec de	0,26	4,00	1,34	0,00	0,00	1,34
15037	Huixquiluca	0,27	4,00	0,60	0,01	0,00	0,59
15039	Ixtapaluca	0,14	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15044	Jalteco	0,14	3,00	0,04	0,01	0,00	0,03
15053	Melchor Oca	0,10	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15057	Naucalpan d	0,36	2,00	2,35	0,00	0,00	2,35
15059	Nextlapan	0,29	2,00	0,01	0,00	0,00	0,00
15058	Nezahualcoy	0,22	5,00	2,09	0,85	0,00	1,25
15060	Nicolas Rom	0,14	4,00	0,06	0,03	0,00	0,03
15069	Papalotla	0,55	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15070	Paz, La	0,20	5,00	0,13	0,00	0,00	0,13
15081	Tecamac	0,26	4,00	0,03	0,03	0,00	0,00
15091	Teoloyucan	0,28	4,00	0,21	0,04	0,00	0,17
15092	Teotihuacan	0,19	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15093	Tepetlaoxto	0,29	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15095	Tepotzotlan	0,15	4,00	0,02	0,02	0,00	0,00
15099	Texcoco	0,23	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15100	Tezoyuca	0,19	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15104	Tlanepantla	0,37	2,00	2,25	0,00	0,00	2,25
15108	Tultepec	0,20	4,00	0,20	0,00	0,00	0,20
15109	Tultitlan	0,31	2,00	0,76	0,00	0,00	0,76
15122	Valle de Ch	0,11	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15120	Zumpango	0,18	4,00	0,04	0,01	0,00	0,03

Anexo 2. Dotación total (m³/habitante/día), estrato y extracción total de agua potable en los municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, A. (1999) Mexico City Growth and Regional Dispersal: the Expansion of Largest Cities and New Spatial Forms. *Habitat Intl*, 23, 391-412.
- AGUILAR, A. (2002) Las mega-ciudades y las periferias expandidas. *EURE (Santiago)*, 28, 121-149.
- AGUILAR, A. (2003) Globalization, regional development, and mega-city expansion in Latin America: Analyzing Mexico City's periurban hinterland. *Cities*, 20, 3-21.
- AGUILAR, A., EZCURRA, E., GARCÍA, T., MAZARI, M. y PISANTY, I. (1995) The Basin of Mexico. EN KASPERSON, J. X., KASPERSON, R. E. y TURNER, B. L. (Eds.) *Regions at risk*. New York, United Nations University Press.
- AGUIRRE-DÍAZ, G., ZÚÑIGA-DÁVILA, F., PACHECO-ALVARADO, F., GUZMÁN-SPEZIALE, M. y NIETO-OBREGÓN, J. (2000) El graben de querétaro, méxico. observaciones de fallamiento activo. *GEOS*, 20, 2-7.
- ARROYO, G. (2003) Causa y efectos de las grietas y fallas en el Valle de Aguascalientes. *Cuaderno de Trabajo, Sistema de investigación Miguel Hidalgo*. Querétaro.
- BARENDIS, F., BROUWER, F. y SCHRODER, F. (1995) Land subsidence: natural causes, measuring techniques, the Groningen Gasfields. EN BARENDIS, F., BROUWER, F. y SCHRODER, F. (Eds.) *Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, Netherlands*. Rotterdam, Balkema.
- BENÍTEZ-ESLAVA, E. (2005) Réformer le service de l'eau: Histoire, système technique et régulation de firmes. Le cas du District Fédéral du Mexique (1992-2003). Paris, Ecole National de Ponts et Chaussées.
- BIRKLE, P., TORRES RODRÍGUEZ, V. y GONZÁLEZ PARTIDA, E. (1998) The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6, 500-517.
- BITRAN, D., JIMÉNEZ, M., MORALES, E., SALAS, M., VAZQUEZ, M., MATÍAS, L., CAMACHO, K. y ACOSTA, L. (2001) Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2000. EN CENAPRED (Ed.).
- BORJA, R. y RODRÍGUEZ, R. (2004) Aquifer vulnerability changes due to faults and riverbeds in Salamanca, Guanajuato, Mexico. *Geofísica Internacional*, 4, 623-628.
- BOUWER, H. (1978) *Groundwater Hydrology*, New York, McGraw-Hill.
- BRIBIESCA, J. (1960a) El agua potable en la Republica Mexicana (Séptima y última parte). *Ingeniería hidráulica en México*, 107-125.
- BRIBIESCA, J. (1960b) Hidrológica histórica del valle de México. *Ingeniería hidráulica en México*, Julio-Septiembre, 43-59.

- CABRAL-CANO, E., DIXON, T. y SÁNCHEZ, O. (2002) InSAR and GPS Analysis of Ground Subsidence in Mexico City. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2002*. San Francisco, AGU.
- CARBOGNIN, L., TEATINI, P. y TOSI, L. (2004) Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. *Journal of Marine Systems*, 51, 345-353.
- CARNEC, C., HURÉ, A., LEDOUX, E., RAUCOULES, D. y RIVERA, A. (2000) Mapping and modeling of major urban subsidence on Mexico City from radar interferometry. *International Conference THE FRAGILE TERRITORY, Research and Application on Hydrogeological Disarray in the World*. Roma, Italy.
- CARRILLO-RIVERA, J., ANGELES-SERRANO, G., HERGT, T. y HERNÁNDEZ, G. (2002) Estudio de hidrología subterránea sobre el área de Xochimilco, Distrito Federal. México, D.F., Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal.
- CARRILLO-RIVERA, J., CARDONA, A. y MARGAIN, R. (1997) Groundwater flow and environmental impact in Mexico. *Geografía y desarrollo*, 15, 17-26.
- CARRILLO, N. (1948) Influence of artesian wells on the sinking of Mexico City. *Proceedings of the 11th International Conference on Soils Mechanics*. Holland.
- COMISIÓN DE AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO (1975) Boletín de Mecánica de Suelos Nro. 7. México.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2001) *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, México, CNA.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2004) ESTADÍSTICAS DEL AGUA. EN GERENCIA REGIONAL DE AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO Y SISTEMA CUTZAMALA (Ed.).
- CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN (1995) *El agua y la Ciudad de México*, Washington, D.C., National Academy Press
- CRUICKSHANK, V. (1985) Efectos de características variables del material confinante sobre el comportamiento de acuíferos semiconfinados. *La mecánica de suelos y la geohidrología*. México, D.F., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- DE CSERNA, Z., DE LA FUENTE, M., PALACIO, M., TRAY, N., MITRE, S. y MOTA, P. (1987) Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. *boletín México*, UNAM, Instituto de Geología.
- DE LA CRUZ, M. (2002) De 21 pozos en Chalco, sólo siete proveen de agua a sus habitantes: Martínez Ventura. México, onceNoticias.
- DELGADO, J. (1988) El patrón de ocupación territorial de la ciudad de México al año 2000. EN TERRAZAS, O. y PRECIAT, E. (Eds.) *Desarrollo urbano "desafíos de una gran metrópoli"*. México, Plaza y Valdez Editores.
- DELGADO, J. (2003) La urbanización difusa, arquetipo territorial de la ciudad-región. *Sociológica*, 51, 13-48.

- DELGADO, J., SOBRINO, L., CRUZ, E. y NIVÓN, E. (1999) Grandes tendencias de la expansión urbana de la Ciudad de México. *Control de la expansión urbana: memorias de la conferencia internacional en México*. México, Comité de políticas de desarrollo territorial de la OCDE.
- DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL (1954) Plan general para resolver los problemas de hundimiento, las inundaciones y el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México. México, D.F., Dirección General de Obras Hidráulicas.
- DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL (1982) El Sistema Hidráulico del Distrito Federal, un servicio público en transición. EN DGCOH (Ed.) Mexico, D.F.
- DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL (1990) Programa de uso eficiente del agua. EN DGCOH (Ed.) Mexico, D.F.
- DURAZO, J. y FARVOLDEN, R. (1989) The groundwater regime of the valley of Mexico from historic evidences and field observations. *Journal of Hydrology*, 112, 171-190.
- EDMUNDS, W., CARRILLO-RIVERA, J. y CARDONA, A. (2002) Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*, 1-24.
- ESTELLER, M. y ANDREU, J. (2005) Anthropogenic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico). *Hydrogeology Journal*, 378-390.
- ESTELLER, M. y DIAZ-DELGADO, C. (2002) Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. *Environmental Management*, 29, 266-278.
- EZCURRA, E., AGUILAR, A. G., PISANTY, I. y MAZARI-HIRIART, M. (1999) *The Basin of Mexico*, New York, United Nations University Press.
- FIGUEROA, G. E. (1973) El hundimiento de la ciudad de México; breve descripción. *Recursos Hidráulicos*, II, 525-534.
- FIGUEROA, G. E. (1984) Case History No. 9.8. Mexico, D. F., Mexico. EN POLAND, J. F. (Ed.) *Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal*. París, UNESCO, PHI.
- FREEZE, R. A. y CHERRY, J. A. (1979) *Groundwater*, Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall.
- GARDUÑO-MONROY, V., ARREYGUE-ROCHA, E., ISRADE-ALCÁNTARA, I. y RODRÍGUEZ-TORRES, G. (2001) Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 37-54.
- GARZA, G. (1987) Evolución de la ciudad de México en el siglo XX. *Seminario: La cuestión de la vivienda en las grandes metrópolis: el caso de la Ciudad de México*. Mexico, El Colegio de México.
- GLOWACKA, E., GONZALEZ, J. y NAVA, F. (2000) Subsidence in cerro prieto geothermal field, baja california, México. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu - Tohoku, Japan.

- GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO (2003) Plan municipal de desarrollo del municipio de Chalco. EN SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA (Ed.).
- HERNÁNDEZ, G. y CARRILLO-RIVERA, J. (1997) Estimate of non-linear subsidence response in time for the aquitard of Mexico City. *Geografía y desarrollo*, 15, 47-56.
- HERNÁNDEZ GARCÍA, G. y CARRILLO-RIVERA, J. (1997) Estimate of non-linear subsidence response in time for the aquitard of Mexico City. *Geografía y Desarrollo*, 15, 47-56.
- HU, R. L., YUE, Z. Q., WANG, L. C. y WANG, S. J. (2004) Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76, 65-77.
- HUIZAR-ALVAREZ, R., CARRILLO-RIVERA, J., ANGELES-SERRANO, G., HERGT, T. y CARDONA, A. (2004) Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 12, 436-450.
- HUNT, A. (2004) An explicit derivation of an exponential dependence of the hydraulic conductivity on relative saturation. *Advances in Water Resources*, 27, 197-201.
- INEGI (2002) *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*, México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- IZAZOLA, H. (2001) Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*.
- LLAMAS, M., HERNÁNDEZ-MORA, N. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (2000) *Uso intensivo de las aguas subterráneas, Aspectos éticos, tecnológicos y económicos*, Madrid, Fundación Marcelino Botín.
- LÓPEZ DE LA ROSA, E. (2003) *Historia de las divisiones territoriales de la cuenca de México*, México, Fundación Adolfo Christlieb Ibarrola.
- MACÍAS, J. L. (2006) Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana*, II, 379-424.
- MANILLA, A., GUARNIDA, P. y MARTINEZ, G. (2001) Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte. *Publicación técnica Nro. 172*. Queretaro, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- MARTÍNEZ, S., CARRILLO-RIVERA, J., HERNÁNDEZ, G., HERGT, T., OSORIO, M., CARDONA, A., ANGELES, G. y MÁRQUEZ, E. (2001) Diagnóstico ambiental de los recursos hídricos del Departamento Capital Provincia de La Rioja, Argentina. Estudio Técnico de Cooperación AIH, ALHSUD y UNAM con el Municipio Capital La Rioja. La Rioja, Municipio Capital de La Rioja.
- MAZARI, M. y ALBERRO, J. (1990) Hundimiento de la Ciudad de México. EN MAZARI, M. y KUMATE, J. (Eds.) *Los problemas de la Cuenca de México*. Mexico, El Colegio Nacional.

- MAZARI, M. y MARSAL, R. (1959) *El subsuelo de la ciudad de México*, UNAM.
- MEJÍA, J., RODRÍGUEZ, R. y BERLIN, J. (2001) Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. the Salamanca case 1. EN BALLESTER, A., GRIMA, J., LÓPEZ, J. A. y RODRÍGUEZ, L. (Eds.) *Investigación, gestión y recuperación de acuíferos contaminados*. Alicante, Instituto geológico y minero de España.
- MOLINA, T. (2005) La escasez de agua en la Ciudad de México. *La jornada*. México.
- MOOSER, F. (1963) La Cuenca Lacustre del Valle de México. *Ingeniería hidráulica en México*, Abril-Mayo-Junio, 47-56.
- MUSSET, A. (1992) *El agua en el valle de México*, México, Pórtico de la Ciudad de México, Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1991) *Mitigating losses from land subsidence in the United States*, Washington, D. C., National Academy Press.
- NIELSEN, D., BIGGAR, J. y ERH, K. (1973) Spatial variability of fieldmeasured soil-water properties. *Hilgardia*, 42, 215-59.
- NOGUEZ, A. (2006) Sin agua en la megalópolis. BBCMUNDO.COM.
- ONU-HÁBITAT y SEDESOL (2006) Agua y asentamientos humanos en América Latina y el Caribe EN ONU-HÁBITAT (Ed.) *Foro preparatorio al IV Foro Mundial del Agua*. México, ONU-HÁBITAT.
- ORTEGA-GUERRERO, A. (1999) Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35, 3327-3341.
- ORTEGA-GUERRERO, A. (2006) Land subsidence evolution and controlling mechanisms near Mexico City: environmental planning and management. EN MARTIN-DUQUE, J., BREBBIA, C., EMMANOULOUDIS, D. y MANDER, U. (Eds.) *Geo-Environment and Landscape Evolution II*. WIT Press.
- ORTEGA, A. (1988) Analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. Waterloo, Ontario, University of Waterloo.
- ORTEGA, A. y FARVOLDEN, R. (1989) Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 110, 271–294.
- PERLÓ, M., ESCALANTE, R. y GONZÁLEZ, A. (1998) *Diagnostico, evaluación y propuestas del sistema agua y drenaje del Valle de México*, México, Fundación Rafael Preciado.
- POLAND, J. F. (Ed.) (1984) *Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal*, París, UNESCO, PHI Working.
- POSTEL, S. (1993) Mexico's position in the global water crisis: Last oasis. *Business Mexico*, 1, 67-71.
- PRICE, M. (2003) *Agua subterránea*, México, Limusa.

- RIVERA, A. (1990) Modèle hydrogéologique quasi-tridimensionnel non-linéaire pour simuler la subsidence dans les systèmes aquifères multicouches - Cas de Mexico. Paris, l'ENS Mines de Paris.
- ROCHA, C., RODRÍGUEZ, R. y PINO, G. (2003) Informe anual 2003. EN PROCURADURÍA AMBIENTAL Y DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL D.F. (Ed.), PAOT.
- RUDOLPH, D., HERRERA, I. y YATES, R. (1989) Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City. *Geofísica Internacional*, 28, 363-408.
- SCHTEINGART, M. y TORRES, M. (1997) Políticas de agua y drenaje en la ciudad de México y su aplicación en las colonias estudiadas. EN SCHTEINGART, M. y DUHAU, E. (Eds.) *Pobreza, condiciones de vida y salud en la ciudad de México*. México, Colegio de Mexico.
- SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO (2005) Programa de gestión integral de los recursos hídricos 2004-2009. EN SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO (Ed.), Gaceta oficial del Distrito Federal.
- SOLIMAN, M., LAMOREAUX, P., MEMON, B., ASSAD, F. y LAMOREAUX, J. (1998) *Environmental Hydrogeology*, New York, Lewis Publishers.
- STEPHENS, B. (2000) *Vadose zone hydrology*, Boca Raton, Florida, CRC Press.
- STROZZI, T. y WEGMULLER, U. (1999) Land Subsidence in Mexico City Mapped by ERS Differential SAR Interferometry. *Proceedings IGARSS*. Hamburg, Germany.
- STROZZI, T., WEGMÜLLER, U., WERNER, C., WIESMANN, A. y SPRECKELS, V. (2003) JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41, 1702-1708.
- TÓTH, J. (1962) A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 67, 4375-4387.
- TÓTH, J. (1995) Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3, 4-16.
- TÓTH, J. (1999) Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7, 1-14.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1999) *Land subsidence in the United States*, Virginia, USGS.
- UNESCO (2003) *L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie : Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau*, Éditions UNESCO, Berghahn Books.
- UNESCO/OMS (1992) *Glosario Internacional de Hidrología*, Paris/Genève, UNESCO-OMM.
- UNIKEL, L., RUIZ, C. y GARZA, G. (1978) *Desarrollo urbano de México: Diagnóstico e implicaciones futuras*, México, El Colegio de México.

- VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. (1995) Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la cuenca de México. *Posgrado en Geofísica*. México, UNAM.
- VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. y JAIMES-PALOMERA, L. (1989) Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28, 133-190.
- WERNER, C., WEGMÜLLER, U., STROZZI, T. y WIESMANN, A. (2000) Gamma sar and interferometric processing software. *ERS - ENVISAT Symposium*. Gothenburg, Sweden.
- WHITTAKER, B. N. y REDDISH, D. J. (1989) *Subsidence: Occurrence, prediction and control*, Amsterdam, Elsevier.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2006) *Health aspects of plumbing*, Switzerland, World Health Organization.