

EL AGUA Y LA CIUDAD DE MEXICO

ABASTECIMIENTO Y DRENAJE ▲ CALIDAD ▲ SALUD PUBLICA
USO EFICIENTE ▲ MARCO JURIDICO E INSTITUCIONAL

ACADEMIA DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA, A.C.
ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERIA, A.C.
ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA, A.C.

EL AGUA Y LA CIUDAD DE MÉXICO

ABASTECIMIENTO Y DRENAJE • CALIDAD • SALUD PÚBLICA • USO EFICIENTE • MARCO JURÍDICO E INSTITUCIONAL

Consejo Nacional de Investigación:

Academia de la Investigación Científica, A. C.

Academia Nacional de Ingeniería, A. C.

Academia Nacional de Medicina, A. C.

en colaboración con:

National Academy of Sciences

a través del U.S. National Research Council

México, 1995

El proyecto, cuyos resultados se presentan en este libro, fue aprobado por las juntas directivas de la Academia de la Investigación Científica, A.C. y de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C., así como por la junta de gobierno del U.S. National Research Council, cuyos miembros provienen de los consejos de la National Academy of Sciences, la National Academy of Engineering y el Institute of Medicine.

Por otra parte, con este estudio y el de "Aspectos Tecnológicos de la Modernización Industrial de México", cuya realización fue simultánea, se inician las actividades del Consejo Nacional de Investigación. Este consejo se establece para proporcionar un mecanismo organizador y coordinador de estudios similares colaborativos entre la Academia de la Investigación Científica, la Academia Nacional de Ingeniería, y la Academia Nacional de Medicina, que permitan aclarar cuestiones de interés público con contenido científico y técnico de alto nivel.

Este proyecto fue financiado por la Fundación Ford (Grant 910-1414 y 910-1414-1), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Contrato MEX/93/001/A/01/99), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología —a través del Programa de Apoyos Especiales—, Secretaría de Salud, Fundación Tinker, U.S. Environmental Protection Agency (Contrato CX-820728-01-0), y Fundación John D. y Catherine T. MacArthur (Grant 87-34007A, 91-12644A, 92-12644A).

ISBN: 968-7428-02-3

Impreso y hecho en México

COMITÉ BINACIONAL
EL AGUA Y LA CIUDAD DE MÉXICO

Ismael Herrera Revilla
Co-Presidente, Academia Nacional de Ingeniería e Instituto de Geofísica, UNAM

Charles T. Dumars
Co-Presidente, Universidad de Nuevo México, Albuquerque

Irina Cech
Universidad de Texas, Houston

Cristina Cortinas de Nava
Instituto Nacional de Ecología de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)

José Ramón Cossío Díaz
Suprema Corte de Justicia de la Nación

Randall Crane
Universidad de California, Irvine

Richard S. Engelbrecht
Universidad de Illinois en Urbana-Champaign

Robert N. Farvolden
Universidad de Waterloo, Canadá

Helen Ingram
Universidad de Arizona, Tucson

Jesús Kumate Rodríguez
Secretaría de Salud

Lucrecia Lozano García
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Juan Manuel Martínez García
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF

Rubén Martínez Guerra
Comisión Nacional del Agua

Carlos Vélez Ocón
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

David Wilk Graber
Consultor en Desarrollo Urbano y Medio Ambiente

PERSONAL DE APOYO PARA EL COMITÉ BINACIONAL

Alejandro Lozano Guzmán
Coordinador, Academia Nacional de Ingeniería, A.C.

Julia Eva Melchor Sánchez
Coordinadora, Fundación Ricardo Monges López, A. C.

Gary D. Krauss
Coordinador, Water Science and Technology Board, National Research Council

Gregory Nyce
Asistente, Water Science and Technology Board, National Research Council

ASOCIADOS AL PROYECTO
EL AGUA Y LA CIUDAD DE MÉXICO

Manuel Aguilar Romo
Dirección de Saneamiento Básico de la Dirección General de Salud Ambiental de la Secretaría de Salud

Sergio Ajuria Garza
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Lázaro Alanís Cabrera
Comisión Estatal de Agua y Saneamiento Estado de México

Rocío Alatorre Edén
Escuela de Salud Pública de México Instituto Nacional de Salud Pública Secretaría de Salud

Daniel Joel Arcos Hernández
Gerencia de Aguas del Valle de México Comisión Nacional del Agua

María Aurora Armienta
Instituto de Geofísica Universidad Nacional Autónoma de México

Pablo Bárcenas Beutelspacher
Gerencia de Aguas del Valle de México Comisión Nacional del Agua

Jorge Eugenio Barrios
Universidad de Illinois en Urbana-Champaign

Alejandro Cano Ruiz
Instituto Nacional de Ecología Secretaría de Desarrollo Social

Cuauhtémoc Carreño Rangel
Comisión Estatal de Agua y Saneamiento Estado de México

Joel Carrillo Rivera
Instituto de Geofísica Universidad Nacional Autónoma de México

Arturo Correa Camacho
Subdirección de Desarrollo Tecnológico del Laboratorio Central de Control de Calidad del Agua de la DGCOH

Miguel Ángel Cortés Pérez
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal

Alejandra Cortés Silva
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Carlos Cruickshank Villanueva
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Gerardo Cruickshank García
Gerente del Proyecto del Lago de Texcoco

José Cuenca Dardón
Dirección de Servicios Urbanos
Departamento del Distrito Federal

Ruben Chávez Guillén
Comisión Nacional del Agua

Jaime Durazo Lozano
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Tomás González Morán
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Fernando González Villarreal
Comisión Nacional del Agua

Xavier Haro Solórzano
Gerencia de Aguas del Valle de México
Comisión Nacional del Agua

Jan Hendrickx
Instituto de Minería y Tecnología
Socorro, Nuevo México

Guillermo Hernández García
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Rosario Iturbe Argüelles
Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y asociados

Felipe López Sánchez
Dirección General de Servicios Urbanos
Departamento del Distrito Federal

Gregorio Martínez Ramírez
Subdirección de Desarrollo Tecnológico del Laboratorio
Central de Control de Calidad del Agua de la DGCOH

Mariza Mazari Hiriart
Centro de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México

Rodrigo Medina Bañuelos
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Estela Patricia Meza
Dirección de Saneamiento Básico de la Dirección
General de Salud Ambiental de la Secretaría de Salud

Claudio Molina Torres
Comisión Nacional del Agua

Federico Mooser Hawtree
Geólogo de la ciudad de México, Dirección General
de Obras del Departamento del Distrito Federal

Adrián Ortega Guerrero
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Gildardo Ortiz Fuentes
Comisión de Aguas
Departamento del Distrito Federal

Manuel Ortiz García
Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica
Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas
Gobierno del Estado de México

Filiberto Pérez Duarte
Dirección de Saneamiento Básico de la Dirección General de Salud Ambiental de la Secretaría de Salud

Enrique Pérez Sangerman
Comisión Estatal de Agua y Saneamiento Estado de México

Nelson Piñón Martínez
Gerencia de la Comisión Nacional del Agua Estado de México

Genaro Ramírez López
Dirección General de Epidemiología Secretaría de Salud

Ramiro Rodríguez Castillo
Instituto de Geofísica Universidad Nacional Autónoma de México

Fermín Rivera Agüero
Dirección de Investigación de la ENEP-Iztacala

Julia Rivera Jaramillo
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal

Leopoldo Rodarte Ramón
Hidroalegro, S.A.

José Antonio Rodríguez Tirado
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal

Elías Sahab Haddad
Gerencia Regional de Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua

Beatriz Santamaría Ramírez
Subdirección de Desarrollo Tecnológico del Laboratorio Central de Control de Calidad del Agua de la DGCOH

Carlos Santos Burgoa
Escuela de Salud Pública de México, del Instituto Nacional de Salud Pública de la Secretaría de Salud

Conrado Sarmiento Bleicher
Dirección General de Servicios Urbanos
Departamento del Distrito Federal

Arturo Sil Plata
Dirección de Información y Emergencias
Epidemiológicas de la Secretaría de Salud

Roberto Tapia Conyer
Dirección General de Epidemiología
Secretaría de Salud

Oscar Velázquez Monroy
Dirección de Información y Emergencias
Epidemiológicas de la Secretaría de Salud

ACADEMIA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, A.C.

CONSEJO DIRECTIVO 1990-1991

Dr. Hugo Aréchiga Urtuzuástegui
Presidente

Dr. Antonio Peña Díaz
Vicepresidente

Dr. Mauricio Fortes Besprosvani
Secretario electo

Dra. Mari Carmen Serra Puche
Secretaria designada

Dra. Rosalinda Contreras Theurel
Tesorera

CONSEJO DIRECTIVO 1992-1993

Dr. Antonio Peña Díaz
Presidente

Dr. Mauricio Fortes Besprosvani
Vicepresidente

Dra. Julia Tagüeña Parga
Secretaria electa

Dra. Lourdes Arizpe Schlosser
Secretaria designada

Dra. Rosalinda Contreras Theurel
Tesorera

CONSEJO DIRECTIVO 1994-1995

Dr. Mauricio Fortes Besprosvani
Presidente

Dr. Juan Ramón de la Fuente Ramírez
Vicepresidente

Dra. Linda Manzanilla Naim
Secretaria electa

Dr. Rubén Barrera Pérez
Secretario designado

Dr. Saúl Villa Treviño
Tesorero

ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA, A.C.

CONSEJO DIRECTIVO 1989-1991

Dr. José Luis Fernández Zayas
Presidente

Dr. Ismael Herrera Revilla
Vicepresidente

Dr. Andrés Buzo de la Peña
Secretario

Dra. Cristina Verde Rodarte
Tesorera

CONSEJO DIRECTIVO 1991-1993

Dr. Ismael Herrera Revilla
Presidente

Dr. Héctor Nava Jaimes
Vicepresidente

Dr. Manuel Martínez Fernández
Secretario

Dra. Cristina Verde Rodarte
Tesorera

CONSEJO DIRECTIVO 1993-1995

Dr. Héctor Nava Jaimes
Presidente

Dr. Luis Esteva Maraboto
Vicepresidente

Dra. Cristina Verde Rodarte
Secretaria

Dr. Octavio Manero Brito
Tesorero

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO 23

RESUMEN EJECUTIVO 31

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 45

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 55

1.1. El Valle de México y su ubicación 55

1.2. El área de estudio 58

1.3. Características físicas 60

1.4. Hidrografía 62

1.5. Clima 63

1.6. Perspectiva histórica acerca del suministro de agua 65

1.7. Evolución poblacional y urbana 67

Referencias 81

CAPÍTULO 2. ABASTECIMIENTO Y DRENAJE 85

2.1. Antecedentes 85

2.1.1. Generalidades 85

2.1.2. Obras hidráulicas 86

2.1.3. El proyecto Texcoco 89

2.1.4. Estudios e investigaciones 91

2.2. Sistemas públicos de suministro de agua y drenaje de la ZMVM 93

2.2.1. Suministro de agua 96

Fuentes de agua cruda 97

Tratamiento del agua 105

Sistema de distribución 107

2.2.2. Recolección y eliminación de aguas de desecho 108
Sistema de drenaje 108
Operación del sistema de drenaje 108
Tratamiento y reúso de aguas de desecho 116
2.3. Descripción del acuífero 120
2.3.1. Marco geológico 120
Arcillas lacustres superficiales 120
Rellenos aluviales 120
Basaltos del Pleistoceno y Reciente 121
Formación Tarango 123
Cuerpos volcánicos basáltico-andesíticos 123
Secuencia estratificada 123
Sierras pliocénicas 123
Depósitos lacustres del Plioceno inferior 123
Vulcanitas del Mioceno 124
Vulcanitas del Oligoceno 124
Basamento sedimentario marino 124
2.3.2. Modelo conceptual 124
Acuitardo superior 125
Acuífero principal 125
Acuicludo inferior 125
Otras unidades independientes 126
2.3.3. Zonas de recarga 126
2.3.4. Sistema de flujo 128
2.3.5. Calidad natural del agua 130
2.4. La explotación del acuífero 131
2.4.1. Evolución de la extracción 131
2.4.2. Consecuencias de la explotación 136
Abatimiento de los niveles del agua 136
Hundimiento del terreno 138
Aumento de la contaminación y la vulnerabilidad 142
2.4.3. Diagnóstico 146
2.5. Reúso y reciclamiento 150
2.5.1. Reúso industrial 151
2.5.2. Aguas de desecho: características y tratamiento 153
2.5.3. Restitución y reúso de aguas municipales residuales 161
Referencias 176

CAPÍTULO 3. CALIDAD Y SALUD PÚBLICA 185
3.1. Introducción 185
3.2. Vulnerabilidad del acuífero 186
3.2.1. El escenario 186
3.2.2. Factores que afectan el acuífero 188
El sistema de flujo regional 188
Alteraciones naturales de la calidad del agua subterránea 188
Fuentes naturales de alteración de la calidad del agua 191
Compuestos de azufre 192
Hierro y manganeso 192
Mineralización (sólidos totales disueltos) 192
3.2.3. Caracterización de la vulnerabilidad 193
Vulnerabilidad de la zona lacustre 193
Vulnerabilidad de la zona montañosa 194
Vulnerabilidad de la zona de transición 195
3.2.4. Fuentes de contaminación 195
Actividades urbanas 195
Actividades industriales 201
3.2.5. Estudios sobre la migración de contaminantes y solutos naturales 204
3.3. Evaluación y control de la calidad del agua 208
3.3.1. Factores que inciden sobre la calidad del agua para consumo humano 208
Tratamiento en plantas potabilizadoras 209
Desinfección en la red de distribución 209
Contaminación por conexiones cruzadas 210
Contaminación en depósitos domiciliarios 211
Potabilización domiciliaria 211
Manejo del agua en los domicilios 211
3.3.2. Estudios sobre la contaminación del agua de consumo humano 212
3.4. Vigilancia y certificación sanitaria de la calidad del agua 214
3.4.1. Regulación sanitaria 214
3.4.2. Monitoreo de la calidad del agua en el Distrito Federal 216
Análisis de la calidad del agua potable 218
Reúso del agua renovada 222
Uso del agua residual no tratada para riego de cultivos 223
3.4.3. Monitoreo de la calidad del agua en los municipios conurbados del Estado de México 223

3.5. Vulnerabilidad de la salud de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México *224*
3.5.1. Contexto demográfico y causas principales de mortalidad *224*
3.5.2. Poblaciones vulnerables *226*
3.5.3. Enfermedades diarreicas en la Zona Metropolitana del Valle de México en 1991 *229*
Morbilidad *233*
Mortalidad *234*
Cólera *234*
Brotes por enfermedades diarreicas *234*
Investigación de padecimientos malignos y congénitos en el Distrito Federal *235*
3.6. Discusión *239*
3.7. Conclusiones *246*
3.8. Recomendaciones *247*
3.8.1. Políticas *247*
3.8.2. Medidas de gestión para la prevención y control de la contaminación *248*
3.8.3. Monitoreo *248*
3.8.4. Evaluación y prevención de riesgos para la salud *249*
3.8.5. Investigación y desarrollo tecnológico *249*
3.8.6. Educación y divulgación de información *250*
Bibliografía *251*

CAPÍTULO 4. ADMINISTRACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZMVM.
Política de conservación, recuperación de costos y equidad *259*
Resumen *259*
4.1. Introducción *264*
4.2. Problemas y prioridades *266*
4.3. Tarifas, consumo y acceso al agua en la ZMVM *269*
4.4. Instrumentos de la administración de la demanda *284*
4.4.1. Instrumentos involuntarios *286*
4.4.2. Instrumentos voluntarios *287*
4.5. Medios de implementación *292*
4.5.1. Usuarios domésticos *293*
4.5.2. Usuarios industriales *295*
4.5.3. Obstáculos institucionales y administrativos *296*
4.5.4. Capacitación *298*
4.5.5. Iniciativa de privatización en el DF *299*

4.6. Observaciones finales *301*
Bibliografía *303*
CAPÍTULO 5. MARCO JURÍDICO E INSTITUCIONAL *307*
5.1. Introducción *307*
5.2. Marco jurídico e institucional del suministro y propiedad del agua *309*
5.2.1. Bases constitucionales *309*
5.2.2. Estructura organizativa *309*
Federación *310*
Distrito Federal *313*
Entidades federativas *318*
Particulares (pozos privados: autoabastecimiento) *320*
5.2.3. Los derechos de propiedad del agua en México *321*
Derechos de propiedad del agua superficial *321*
Derechos de propiedad del agua subterránea *322*
Ley de Privatización del 1º de diciembre de 1992 *322*
Derechos de propiedad del agua residual *324*
5.3. Marco jurídico e institucional que rige la calidad del agua *324*
5.3.1. Bases constitucionales *324*
5.3.2. Leyes y reglamentos de la calidad del agua *324*
Ley Ambiental de 1988 *324*
Reglamentos ambientales *328*
Nueva Ley Nacional del Agua *328*
Ley General de Salud de 1984 *330*
Códigos civiles federales y estatales *331*
Procuraduría Federal de Protección del Ambiente *331*
Normas nacionales relativas a la calidad del agua *332*
5.4. Marco jurídico e institucional del servicio de agua y drenaje *332*
5.4.1. En el Distrito Federal *332*
5.4.2. En los estados de la ZMVM *333*
5.5. Marco jurídico e institucional en materia tributaria *335*
5.5.1. Ley de Impuestos por Consumo y Descarga de Aguas de 1991 *336*
RESUMEN BIOGRÁFICO DE LOS MIEMBROS DEL COMITÉ *339*
LISTA DE FIGURAS *349*
LISTA DE TABLAS *351*

PREFACIO

La urbanización es un hecho ineludible de nuestro mundo cambiante. En países en desarrollo, la falta de oportunidades de trabajo en las zonas rurales, la declinación de las economías de subsistencia, y la esperanza de una vida mejor y más interesante, han motivado el crecimiento exagerado de muchas ciudades. Los ritmos de aumento poblacional en esos centros urbanos, son mucho mayores que los de las oportunidades que pueden ofrecer a sus inmigrantes. No solamente se carece de trabajos y oportunidades para mantener a las crecientes poblaciones, sino que tampoco existen los recursos básicos necesarios para soportarlas. Una pregunta fundamental que se hace en todo el mundo es: "¿cómo se pueden incorporar los principios del desarrollo sustentable en estas condiciones?" El recurso más esencial que, junto con el aire, no tiene sustituto, es el agua. Su suministro, repartición y eliminación después de usarse, dan lugar a muchas cuestiones que es necesario abordar.

Un caso, en cierta medida extremo, es el de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM): ahí habitan más de 15 millones de personas, cuyas necesidades de agua representan un desafío formidable. El acuífero que subyace a la ciudad –que en la actualidad constituye la fuente principal de abastecimiento– almacena un gran volumen, pero su utilización está severamente restringida por el gran hundimiento del suelo que produce su explotación. Otras fuentes –en particular, importación de otras cuencas–, aunque se utilizan, son sumamente costosas tanto por la distancia a que se encuentran como por las diferencias de nivel que hay que vencer.

Los abatimientos producidos en el agua del subsuelo, desde que se inició el bombeo del acuífero a mediados del siglo

pasado, han ocasionado 7.5 metros de subsidencia, en promedio. Este hundimiento ha exacerbado la propensión natural de la ciudad a las inundaciones, y causa daño en la infraestructura, que junto con un control insuficiente de los residuos peligrosos, contribuyen a producir riesgos de la salud pública y una situación en que la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero principal, ha ido en aumento. A lo anterior debe añadirse el hecho de que la República Mexicana es un país sumamente centralizado, con la ciudad de México como su centro cultural, económico e industrial. La inmigración de otras partes del país es intensa y muchos de los inmigrantes se establecen ilegalmente en los suburbios urbanos, en barrios que durante periodos considerables no cuentan con servicios adecuados. Sin duda, el problema del abastecimiento de agua sería mucho menor si estos flujos migratorios disminuyeran y se han tomado medidas de descentralización con ese fin. Sin embargo, la disminución efectiva de la inmigración depende de factores políticos y sociales complejos cuyo control es difícil.

Para abordar estos problemas se han realizado grandes inversiones en obras tales como los Sistemas de Drenaje Profundo y Cutzamala. Sin embargo, en México hasta recientemente, ha prevalecido la creencia generalizada de que el agua, como recurso, es propiedad del estado y constituye un derecho constitucional –aunque, desde luego no señalado en la Carta Magna– libre de costo. Así, los servicios de abastecimiento y drenaje de agua han estado fuertemente subsidiados, lo que ha dado lugar a déficits financieros y a limitar los servicios del área urbana en constante expansión; el rápido crecimiento de la ciudad y el financiamiento insuficiente han restringido la capacidad del gobierno para satisfacer la demanda, extender la red de distribución a áreas insuficientemente atendidas, o tratar el agua residual antes de eliminarla, o para reúso.

Estos problemas crecientes y la urgente necesidad de atenderlos, ha conducido al establecimiento de leyes nuevas y esfuerzos conservacionistas, programas de difusión y educación, y soluciones innovativas tales como la privatización del servicio y tratamiento del agua.

El futuro del suministro de agua a la ciudad de México, como a muchas otra ciudades del mundo, es incierto. Su caso presenta características extremas de problemas que habrán de encararse en muchos otros lugares. Por estas razones –la complejidad del problema y la posibilidad de generar experiencias útiles para muchas otras partes– las academias de investigación científica e ingeniería de México –Academia de la Investigación Científica, A. C., y Academia Nacional de Ingeniería, A. C.–, conjuntamente con el National Research Council de la U.S. National Academy of Sciences, de los Estados Unidos,

seleccionó el estudio de las experiencias y los problemas del suministro de agua a la ZMVM, para abordarlo conjuntamente como parte de una colaboración binacional, no gubernamental, que han establecido. El propósito de esta asociación es enriquecer a la ciencia y la tecnología de ambos países a través de investigaciones y estudios colaborativos, uno de cuyos objetivos sea aclarar cuestiones de administración pública con contenido científico y técnico de alto nivel. Un grupo de planeación –patrocinado por la Fundación Tinker, la Fundación Rockefeller y la Fundación MacArthur– se reunió en Cocoyoc, Morelos, en 1990 y concluyó que un estudio del acuífero de la ciudad de México, como fuente de suministro, sería oportuno y apropiado. Al continuar los preparativos de tal proyecto, se puso de manifiesto que su interés sería mayor si se abordaba la problemática del suministro de agua en su conjunto y no solamente la del acuífero mismo. Se decidió entonces incluir, además de las cuestiones técnicas, aspectos sociales, económicos y de administración pública. Un comité voluntario binacional de expèrtos fue nombrado por las academias, en enero de 1992. El estudio se realizó con apoyo económico de la Fundación Ford, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Secretaría de Salud, Fundación Tinker, U.S. Environmental Protection Agency, y Fundación John D. y Catherine T. MacArthur.

El comité binacional se reunió cuatro veces en el curso de dos años y medio (abril de 1992 a octubre de 1994). En su primera junta, celebrada en Querétaro, se clasificaron las cuestiones que deberían abordarse en cuatro grandes grupos: abastecimiento y drenaje; calidad y salud pública; administración de la demanda; y marco jurídico e institucional.

En esta publicación se presentan los resultados principales obtenidos en el proyecto. Está divida en cinco capítulos y un resumen ejecutivo, que contiene las conclusiones y recomendaciones. Después de un capítulo introductorio, el capítulo 2: "Abastecimiento y Drenaje", se ocupa de la situación actual del suministro, distribución y drenaje, así como de las fuentes de abastecimiento actuales y potenciales –incluyendo reúso y reciclamiento. La discusión de la calidad abarca las diferentes etapas del suministro: las fuentes, las plantas de tratamiento, las entradas del sistema de distribución y las tomas domiciliarias. El capítulo 3: "Calidad y Salud Pública", también aborda la vulnerabilidad de las fuentes de suministro y, cuestiones sanitarias y causas de mortalidad potencialmente relacionadas con la calidad del agua suministrada a la población. Para los administradores del agua, una alternativa a la ampliación de la oferta y el desarrollo de nuevas fuentes, es la reducción de la

demanda. Esta es una opción muy atractiva por su bajo costo relativo; los instrumentos de política que se han aplicado o podrían aplicarse con este fin en la ZMVM, se estudian en el capítulo 4: "Administración de la Demanda". Finalmente, en el capítulo 5 se presenta el "Marco Jurídico e Institucional", incluyendo las nuevas leyes y los cambios institucionales innovativos –como la privatización del servicio y tratamiento de agua–, a que se ha hecho referencia antes.

Además del comité, un gran número de personas –a las que colectivamente se les llama "asociados al proyecto"– contribuyeron en forma sustancial, con su tiempo y sus recursos materiales. Las especialidades de los expertos que participaron cubren gran diversidad de disciplinas: hidrología subterránea, geología, geoquímica, ingeniería ambiental, derecho, economía y, administración y salud públicas, entre otras.

La participación de los diferentes miembros del comité y los asociados al proyecto fue amplia. El procedimiento adoptado para la preparación de la presente publicación intencionalmente la propició, pues así se ha enriquecido el estudio, de manera efectiva, con el conocimiento y experiencia de los participantes. También, se ha ganado considerable consenso en sus resultados. Sin embargo, para garantizar la homogeneidad y calidad del producto, la redacción final estuvo a cargo de varios miembros del comité. Cristina Cortinas de Nava y Carlos Vélez Ocón –con el apoyo de Alejandra Cortés– se encargaron del capítulo "Calidad y Salud Pública", Helen Ingram y Randal Crane –auxiliados por David Wilk– fueron los responsables del capítulo "Administración de la Demanda", Charles DuMars y José Ramón Cossío –con la ayuda de Gildardo Ortiz– prepararon el relativo al "Marco Jurídico e Institucional", e Ismael Herrera Revilla tuvo a su cargo, además del capítulo introductorio, el de "Abastecimiento y Drenaje". En este último contó con la ayuda invaluable de Robert Farvolden. Además, Richard Engrelbrecht hizo un trabajo excelente recopilando y depurando información relevante no sólo para este tema sino también para el de Calidad. La coordinación general del estudio estuvo a cargo de Ismael Herrera Revilla –con la asistencia de Alejandro Lozano Guzmán en la primera parte y de Julia Eva Melchor Sánchez en la parte final– por la parte mexicana. Por la parte americana, fue Charles DuMars quien tuvo a su cargo la coordinación general –con la asistencia de Gary Krauss, quien a su vez fue auxiliado por Greg Nyce. Se contó también con Francisco Valdez Monroy, para la traducción de muchos de los textos elaborados en inglés. La Fundación Ricardo Monges López, A.C., se responsabilizó de la revisión técnica de los documentos y de la integración del documento final.

Las instituciones que proporcionaron apoyo financiero para la elaboración de este libro son: Fundación Ford, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –a través del Programa de Apoyos Especiales–, Secretaría de Salud, Fundación Tinker, Fundación MacArthur y la U. S. Environmental Protection Agency.

La integración de información sobre suministro, distribución y drenaje del agua, calidad y las cuestiones institucionales –así como las demás a que se refiere este estudio–, no es tarea fácil para cualquier gran ciudad. En México, los datos que los organismos federales, estatales y municipales obtienen para operación y planeación, son frecuentemente dispares y rara vez se publican o analizan por la comunidad científica en su conjunto. El comité y los participantes en este estudio consideran que ésta es la primera vez que, para la Zona Metropolitana del Valle de México, información relativa al recurso agua y su calidad, y aspectos sociales e institucionales relacionados, se presentan en un marco integrado. Sin duda, esto fue posible debido a la amplia colaboración proporcionada por los diversos organismos involucrados: Departamento del Distrito Federal –a través de sus Direcciones Generales de Construcción y Operación Hidráulica y de Servicios Urbanos–, Comisión Nacional del Agua –a través de su Gerencia Regional de Aguas del Valle de México–, el Gobierno del Estado de México –a través de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento–, Secretaría de Salud –a través de sus Direcciones Generales de Saneamiento Ambiental y Epidemiología–, Secretaría de Desarrollo Social –a través del Instituto Nacional de Ecología–, la Universidad Nacional Autónoma de México –a través de sus Institutos de Geofísica e Ingeniería, y el Centro de Ecología–, Escuela de Salud Pública de México y, la recientemente creada, Comisión de Aguas del Distrito Federal.

Debe aclararse, sin embargo, que muchos cambios están teniendo lugar, por lo que los datos relativos a volúmenes de suministro y otros, se modifican con rapidez. Se procuró actualizarlos a la fecha en que se concluyó el manuscrito del presente libro –aproximadamente, marzo de 1994.

Aunque un estudio de esta naturaleza no puede hacer recomendaciones detalladas, sin embargo, se establecen lineamientos que de seguirse aumentarían la sustentabilidad del suministro de agua. Se espera que los conceptos discutidos aquí sean útiles no solamente para quienes toman las decisiones, los investigadores y el público interesado en el agua de la ciudad de México, sino también para quienes se involucran en esta clase de problemas en otras regiones del mundo, donde cuestiones similares se presentan. Por ello, pronto aparecerá una publicación bilingüe,

editada conjuntamente por las Academias de México y el National Research Council de los Estados Unidos, que contendrá las conclusiones y recomendaciones del proyecto, para darles mayor difusión internacional. Finalmente, se espera que este estudio ayude a fortalecer la noción de que la opinión independiente de las comunidades académicas de México, puede ser un valioso auxiliar para dar sustento científico más amplio a muchas cuestiones importantes de administración pública.

Ismael Herrera Revilla
Coordinador mexicano del estudio
México, D.F., a 14 de diciembre de 1994

RESUMEN EJECUTIVO

Este resumen contiene la información, conclusiones y recomendaciones más importantes, presentadas en forma breve. Los detalles, referencias y fundamentaciones están contenidos en cada uno de los capítulos correspondientes.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) tiene un gran dinamismo; siendo ya una de las ciudades más grandes del mundo en número de habitantes, su población sigue aumentando con gran rapidez. Tenía 15 millones de habitantes, según el censo de 1990, pero de continuar su crecimiento al ritmo actual, se prevé que para el año 2000, la parte que pertenece al Estado de México, tendrá 10.4 millones y la del DF, 11.9 millones; es decir, que habrán crecido un 75% y 25%, respectivamente, con respecto al censo de 1990. La población total será de 22.3 millones y el aumento con respecto a dicho censo de 47.7%.

Para el suministro y drenaje del agua existen en la ZMVM, dos áreas de servicio: una correspodiente al DF y otra al Estado de México, divididas en 16 delegaciones políticas y 17 municipios, respectivamente. A continuación se examinan, en forma muy breve, algunos aspectos sobresalientes de la situación actual y de los problemas que enfrenta en el presente la ZMVM en relación al suministro de agua y drenaje, y los que debe abordar para asegurar la sustentabilidad del suministro en las décadas por venir.

SUMINISTRO Y DRENAJE DEL AGUA

Accesibilidad del agua por parte de la población. En los últimos 30 años, en la ZMVM ha habido un gran incremento en el número de viviendas que reciben servicio de agua en su interior. El DF ha tenido un aumento continuo en la fracción de su cre-

ciente población a la que se presta dicho servicio, pasando de alrededor de 50%, en 1960, a 74% en 1990. El incremento en el Estado de México ha sido también impresionante, pues en 1960 solamente el 17% de las viviendas tenían servicio, mientras que para 1990, ya eran el 54%. Sin embargo, el Estado de México no logró mantener el paso con el rápido incremento de su población –alrededor de 100,000 habitantes, por mes–, ya que el nivel actual representa una declinación con respecto al 62% alcanzado en 1980.

En la actualidad, en el DF 97% de la población tiene acceso al agua potable a través de un sistema de distribución y al 3% restante se le suministra por medio de carros tanques o la obtienen de distribuidores privados. En el caso del Estado de México, los porcentajes son de 90.5 y 9.5, respectivamente. El promedio general para la ZMVM, implica que los sistemas de distribución no atienden aún al 5.8% de la población, la cual la obtiene por otros medios y, frecuentemente, a altos costos.

Consumo. Los consumos *per capita* actuales, son de 364 y 230 lts/hab./día, respectivamente en el DF y el Estado de México; además, tanto en el uno como en el otro, la disponibilidad *per capita* se ha incrementado con rapidez en los últimos años –de hecho, con una rapidez mayor que la prevista en los planes de desarrollo. Si se toma en cuenta que el consumo promedio de los Estados Unidos es de 660 lts/hab./día, se puede concluir que el de la ZMVM no es bajo; pues el costo del agua es elevado –para las entidades responsables del abastecimiento– y el ingreso *per capita* promedio de la población bajo. Además en 1982, el DDF estableció la cifra de 360 como meta para este renglón. Desde luego, en el Estado de México la situación tampoco es satisfactoria. Por otra parte, existen problemas de equidad que se explican más adelante.

Las fuentes de abastecimiento. La hidrología natural del valle incluye un sistema de acuíferos y manantiales excelentes. Sin embargo, las características físicas extraordinarias de la ZMVM han dado lugar a problemas logísticos poco comunes para el suministro de agua a su gran población. Las fuentes de agua superficial internas casi se han agotado y no existen otras cercanas que puedan sustituirlas. En 1941, se inició la construcción para transferir agua de la cuenca del Lerma, proveniente de pozos, por medio de un acueducto de 15 km sobre la sierra de las Cruces. Posteriormente, en 1982 se estableció el proyecto Cutzamala para utilizar agua superficial del valle del río Cutzamala que fue necesario traer de una distancia de 127 km y elevar 1,200 m sobre su nivel original. Los organismos gubernamentales responsables han identificado otras fuentes potenciales de abastecimiento de las que podrían importarse –a unalto costo– volúmenes adicionales (Fig. 1.3).

Del agua utilizada en la actualidad, en la ZMVM, el 71.3% (43 m^3/s) proviene del acuífero de la ciudad de México, 26.4% (15.9 m^3/s) del Sistema Cutzamala-Lerma –de los cuales 8.8% (5.3 m^3/s) vienen del Lerma– y el resto –2.3% (1.4 m^3/s)– de fuentes superficiales internas al valle de México.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) ha considerado otras fuentes desde las cuales se prevé importar agua en el futuro, como se indica en la figura 1.3: cuencas de Amacuzac, Oriental y Tecolutla, entre otras. Además, la mayor parte de la extracción actual proviene de la porción sur del acuífero de la ciudad de México, por lo que la parte norte constituye una reserva potencial, que por razones diversas –sociales y políticas, entre otras– se ha utilizado poco, aunque en años recientes los volúmenes provenientes de esa área han ido en aumento.

El acuífero de la ciudad de México. El área total de la cuenca de México es de alrededor de 9,000 km^2 y el acuífero de la ciudad de México, localizado en la parte sur de la misma, cubre sólo 3,448 km^2. En su superficie pueden distinguirse: el lecho de un antiguo lago –formado por estratos arcillosos de baja permeabilidad–, el área cubierta por las montañas y una *zona de transición* –o de piamonte–, que se extiende entre el lecho del lago y las montañas. Casi toda la recarga se deriva de las montañas –especialmente de la sierra de Chichinautzin– y de la *zona de transición*, pues la contribución a la recarga del lecho del lago es insignificante. Los estratos arcillosos son altamente compresibles y tienen espesor variable, con promedio de alrededor de 60 m. Por debajo de estas formaciones existen depósitos aluviales interestratificados con otros del Pleistoceno y basaltos recientes, que constituyen conjuntamente la porción superior del acuífero principal actualmente en explotación. Este acuífero tiene espesores que varían entre 100 y 500 metros.

Los niveles piezométricos en el acuífero se están abatiendo con rapidez, el abatimiento promedio anual es de un metro. Las zonas de mayor velocidad de abatimiento están en la región de Cuautitlán, Tláhuac y Chalco. Seguramente existe sobreexplotación del acuífero, pero se estima que la reserva almacenada en el acuífero es entre 240 y 350 veces el déficit anual actual. Esto no significa que el acuífero podrá explotarse el mismo número de años, pues su vida útil está limitada por otros factores; entre ellas, la economía de las condiciones de bombeo y la calidad del agua. Por otra parte, los datos relativos a las propiedades hidráulicas de las partes profundas del acuífero son insuficientes para establecer conclusiones definitivas.

En la ZMVM han habido, y continúan teniendo lugar, asentamientos humanos en las principales áreas de recarga. Con

seguridad ellos están provocando una disminución considerable en la capacidad de recarga del acuífero, aunque la magnitud de la misma no ha sido evaluada. La sierra del Chichinautzin debería recibir atención especial pues es la zona de recarga más importante.

El hundimiento del terreno. Un factor muy limitante para el aprovechamiento del acuífero como fuente de suministro de la ZMVM –pues ha causado grandes daños a las instalaciones y edificios del área urbana–, es el gran hundimiento que se produce con el bombeo de las aguas subterráneas –asociado a la alta compresibilidad de los estratos arcillosos. Sin embargo, en una gran parte –alrededor del 30%– de la superficie de arcilla se ha producido, en época reciente, un fenómeno que tiende a disminuir el hundimiento producido por los incrementos en la extracción: el nivel piezométrico en el acuífero principal está por debajo de la cara inferior de las arcillas en esa área. El acuífero principal se ha independizado de las arcillas y en esa zona la explotación ulterior a que se le someta no afectará las condiciones de los estratos arcillosos. Así, el área en que este fenómeno se presenta está ampliándose debido a la declinación continuada de los niveles en el acuífero principal. Es previsible que la importancia relativa del problema del hundimiento sea menor en el futuro. Por su importancia, este fenómeno requiere de mayor estudio.

Las inundaciones. La ciudad de México ha sido susceptible a inundaciones periódicas debido a la baja permeabilidad de las arcillas que le subyacen y a la ausencia de drenaje natural del valle. En el pasado –primera mitad del presente siglo– este problema se agravó debido al hundimiento del terreno inducido por el bombeo de las aguas subterráneas y porque modificó las pendientes del Gran Canal de Desagüe. Sin embargo, en la actualidad las inundaciones han sido controladas gracias a la construcción del Sistema de Drenaje Profundo –inaugurado en 1975, y que entra en operación todos los años en la estación de lluvias–; los encharcamientos, frecuentes aún, generalmente son muy localizados y su duración es breve.

Sistema de distribución. El agua de las diferentes fuentes se mezcla en el sistema de distribución, el cual está constituido por dos subsistemas interconectados –administrados por el Departamento del Distrito Federal (DDF) y por el Estado de México, respectivamente. Para el DF se construye una línea periférica de transmisión –el Acueducto Periférico–, para transportar al sur y este del área de servicio, el agua del Sistema Cutzamala, que llega por el oeste. El Estado de México tiene a su cargo los 49 km del "Macrocircuito", que también sirve para transportar al lado este del área de servicio, el agua importada de dicho sistema. Estos dos grandes circuitos están parcialmente en operación.

Además, el sistema de distribución incluye, en el Distrito Federal, 555 km de red primaria –con diámetros entre 1.83 y 0.5 m– 12,000 km de red secundaria y 243 tanques de almacenamiento con una capacidad de 1.5 millones de metros cúbicos. En el Estado de México, 348 km de red primaria, la red secundaria es menos amplia que en el DF y existen 32 tanques de almacenamiento, con capacidad de 440,000 metros cúbicos.

Servicio de drenaje. De acuerdo con el censo de 1990, 82% de los 15 millones de residentes de la ZMVM están conectados al sistema de drenaje, 6% usan fosas sépticas y más de 9% no cuentan con ningún servicio de drenaje. En una misma área de servicio existen diferencias notables en diferentes zonas, pues en algunas localidades menos de la mitad de los residentes cuentan con servicio de drenaje.

Cada área de servicio tiene su propia red, pero todo el drenaje eventualmente descarga en los interceptores principales, que son comunes. La red del DF, de la que se pudo obtener información más completa, tiene más de 10,000 km de longitud, 68 estaciones de bombeo, numerosas represas y lagunas para controlar el flujo, 111 km de canales abiertos, 42 km de "ríos entubados" y 118 km de túneles.

Por lo que respecta a la operación, las aguas domésticas e industriales, así como las pluviales, se colectan en la red secundaria, y de ahí pasan a la primaria y finalmente al Sistema General de Drenaje que fluye fuera del valle por las salidas artificiales que existen en la actualidad. En la estación seca el flujo total para la ZMVM, es de alrededor de 44 m^3/s, pero aumenta drásticamente en la estación de lluvias, por lo que el Sistema General de Drenaje fue diseñado para soportar un flujo de 200 m^3/s durante un periodo de 45 horas.

Aunque existen nuevas disposiciones, que prevén el tratamiento de las aguas residuales de origen industrial, esto no es aún una práctica frecuente; el agua, antes de ser eliminada por el sistema de drenaje, no recibe tratamiento alguno. Una parte del agua residual se procesa en plantas de tratamiento, pero esto es con fines de reúso –principalmente de riego.

Reúso. El uso de agua residual tratada *–rehabilitada–* tiene gran potencial como medio para ampliar las fuentes de abastecimiento –como ya se mencionó el drenaje elimina más de 44 m^3/s, en tiempo de secas–, y se le está usando cada vez más para recargar el acuífero, regar jardines y uso agrícola, así como en las industrias.

Existen en la ZMVM 27 plantas de tratamiento de agua residual que producen 4.31 m^3/s, que representan alrededor del 9% del total y se utilizan para riego de jardines e irrigación agrícola, principalmente. El programa de reúso se inició oficialmente en 1984, como parte del Programa Nacional de Uso Eficiente del Agua. Las industrias reúsan 2.4 m^3/s adiciona-

les, principalmente para enfriamiento. Como parte de las actividades del Proyecto Texcoco se está ampliando considerablemente el reúso del agua residual urbana, a la cual se le da tratamiento terciario para inyectarla en el acuífero y de esta manera recargarlo artificialmente. El volumen utilizado está creciendo rápidamente, en 1994 llegó alrededor de 1 m^3/s.

CALIDAD Y SALUD PÚBLICA

Calidad de las Fuentes de Suministro. En general, cuando el agua entra al sistema de distribución, cumple con las normas establecidas por la Secretaría de Salud (SS). Sin embargo, su calidad depende de la fuente de origen. El agua proveniente del Sistema Cutzamala, después de ser tratada en la Planta de los Berros, es de buena calidad, aunque la fuente de agua cruda de que se abastece contiene un número excesivo de *E. coli* –probablemente derivados de desperdicios animales o humanos– por lo que asegurar de manera permanente el buen funcionamiento de la Planta de los Berros, es cuestión crítica.

El agua que sale de una fracción no despreciable de pozos –entre 20% y 30%– no satisface las normas de la SS, al salir del pozo. Sin embargo, toda el agua que se extrae del acuífero de la ciudad de México se desinfecta con cloro, hasta obtener un residual total de 2.0 micro gramos por litro.

La situación del agua proveniente de manantiales es similar a la de los pozos, y la del río Magdalena –tratada en la planta del mismo nombre– es de calidad aceptable, tanto antes como después del tratamiento.

Calidad en el Sistema de Distribución. En muestreos recientes en los puntos de entrada al sistema de distribución en el DF, se encontró que 56% de las muestras cumplían con las normas, por lo que respecta a los parámetros físico-químicos, y 61%, a los bacteriológicos. Sin embargo, en muestreos realizados en las distintas delegaciones, se encontró que entre 85 y 100% cumplían las normas bacteriológicas y entre 83 y 100% las de los parámetros físico-químicos –la mejoría en las características bacteriológicas se atribuye a la clorinación que se efectúa en 326 puntos del sistema de distribución y en la de los parámetros físico-químicos, puede ser efecto de la dilución.

Vulnerabilidad del sistema de distribución. La vulnerabilidad del sistema de distribución y almacenamiento del agua potable, ha sido puesta en evidencia mediante estudios que indican la presencia de organismos patógenos en tomas domiciliarias, tinacos y piscinas.

En la mayor parte de la ZMVM la presión es intermitente en las tuberías, pues el servicio de suministro de agua no funciona las 24 horas del día –lo que en un alto porcentaje de las viviendas se subsana con tinacos colocados en las partes al-

tas de las mismas. Así, las filtraciones de las tuberías, además de originar desperdicio de volúmenes, son fuente potencial de contaminación, ya que cuando la presión es baja existen condiciones favorables para el reingreso de agua contaminada al sistema de distribución.

Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Aunque una gran parte del acuífero de la ZMVM –834 km^2– está cubierta por gruesas capas de arcilla de muy baja permeabilidad que lo protegen de fuentes de contaminación antropogénica, existen áreas, como la zona de transición y las montañas –o con mayor generalidad, las áreas de recarga– que son altamente vulnerables a la contaminación antropogénica. Una amenaza potencial importante es la existencia de asentamientos sin instalaciones sanitarias adecuadas, canales de drenaje sin recubrimiento y tiraderos de basura sin aislamiento, etcétera.

La vulnerabilidad del acuífero se ha incrementado también en la zona protegida por los estratos arcillosos, debido al cambio de sentido en los gradientes hidráulicos –que en condiciones naturales provocaban flujo ascendente y ahora lo inducen hacia abajo. A esto se añade la existencia de fracturas en las arcillas, que aumentan la transportación de los contaminantes desde la superficie hacia el acuífero –aunque la existencia de estos efectos es indudable faltan más estudios para precisar su magnitud e importancia.

Además, los sitios de descarga de aguas residuales industriales, rellenos sanitarios, fugas de hidrocarburos y los pesticidas utilizados en las áreas agrícolas del valle, constituyen otras fuentes potenciales de contaminación.

Por otra parte, contaminantes inorgánicos provenientes de fuentes naturales, con alto contenido de hierro, manganeso y azufre, y con mayor generalidad la mineralización del agua del acuífero como resultado, es entre otras, una de las causas del cambio de patrones de extracción, al crearse zonas críticas en las que la calidad del agua es inferior a la prescrita por la norma sanitaria.

Agua residual sin tratamiento. El agua residual no tratada, doméstica e industrial, que se transporta por canales sin recubrimiento, es una de las mayores amenazas de contaminación para el acuífero, los pozos y el sistema de distribución. Por otra parte, esa agua residual no tratada se utiliza, desde hace más de cuarenta años, para irrigación agrícola en el valle del Mezquital –en el estado de Hidalgo, al norte del DF–, donde para proteger la salud pública, se restringen los cultivos pero no se le aplica tratamiento.

Salud Pública. Las enfermedades diarreicas siguen siendo un problema de salud pública –cuya distribución no es uniforme en las distintas delegaciones del DF y en los municipios conurbados de la ZMVM–, que requiere atención prioritaria,

pues ocupan el tercer lugar en la mortalidad infantil del Estado de México, y el cuarto en el DF. El empleo de los sobres de rehidratación oral, sin duda ha contribuido a reducir la mortalidad causada por estos padecimientos; sin embargo, de no eliminarse los factores causales, la repetición de episodios diarreicos propician que la salud y el estado nutricional de los niños afectados sean precarios.

Otros riesgos por organismos patógenos incluyen enfermedades paralíticas, meningitis, encefalitis, miocardiopatías, infecciones sistémicas severas en los recién nacidos, síndromes respiratorios, orquitis, hepatitis, cólera y otros. Los niños son más susceptibles a diversos enteroviruses, por su carencia de inmunidad.

Por otra parte, ha habido aumento en los últimos diez años de padecimientos malignos o congénitos en algunas áreas de la ZMVM; este hecho llama la atención, pues es posible que problemas de contaminación química, tanto del agua como del aire, los originen, por lo que es necesario enfatizar los programas de saneamiento y control de la contaminación.

ADMINISTRACIÓN DE LA DEMANDA

Finanzas deficitarias de los organismos responsables. Prácticamente todas las actividades relativas al suministro de agua y drenaje del agua, son deficitarias con respecto a la recaudación –solamente en el DF, el *déficit* anual correspondiente es de 1,000 millones de dólares americanos. La pobreza en las finanzas del sistema ha limitado su capacidad para expander la red de distribución a las áreas con servicios deficientes, tratar el agua residual y reparar las fugas.

En la ZMVM, los asentamientos irregulares son frecuentes. Desde el punto de vista de la prestación de los servicios de agua potable y drenaje, son un factor que complica y encarece su administración, ya que por su naturaleza se realizan sin control. En muchos casos tienen lugar en condiciones sumamente adversas para la prestación de esos servicios, y son dañinos para el sistema de suministro de agua potable y drenaje.

Un efecto –o causa– de las finanzas deficitarias, es el subsidio excesivo del sector de abastecimiento y drenaje, por parte de los gobiernos federal y locales. De las 64 ciudades mexicanas con una población superior a 100,000 habitantes, el DF ocupa el vigésimo quinto lugar en lo que se refiere a dinero recuperado por toma. En el DF solamente se recuperan $0.10 cts. de dólar por metro cúbico, a pesar de que el costo estimado en esta área de servicio es de $1.00 dólar por metro cúbico –uno de los más altos en el país.

Demanda por encima de una provisión sustentable. Esto promueve a su vez el consumo excesivo de algunos sectores de la población; como ya se mencionó,

aunque el consumo *per capita* es inferior al promedio de los Estados Unidos, el promedio en la ZMVM no es poco, si se toma en cuenta el ingreso medio de la población de México y el alto costo del abastecimiento de la ZMVM.

Las fuentes internas de abastecimiento del Valle de México, son insuficientes para poder mantener la creciente demanda, originada por una población que aumenta rápidamente y una industria en expansión, por lo que ha sido necesario recurrir a la importación de agua de otras cuencas, las que en la actualidad contribuyen con el 26.4% del gasto abastecido. Debido a la lejanía y a las diferencias de niveles –1,200 m– que es necesario vencer, su costo económico es muy elevado –al mismo hay que sumar los costos sociales y políticos, que también son altos, pues las regiones de las que se trae el líquido vital tienen un desarrollo limitado.

Ha sido el elevado subsidio gubernamental el que ha permitido absorber los grandes costos de las obras de importación del agua de otras cuencas, y los costos derivados de las cada vez más estrictas normas de calidad ambiental e hídrica –sin que quienes originan el crecimiento de la demanda enfrenten las consecuencias.

No existe plena conciencia por parte de algunos sectores de la población respecto a la necesidad de usar eficientemente el agua, pues la mayor parte del consumo se ha medido de manera poco confiable o no se ha medido; así, muchas viviendas han pagado cuota fija por el servicio de agua. Además, frecuentemente el cobro de los recibos no se ha hecho efectivo. Es claro que esto ha favorecido que la demanda haya crecido independientemente de la provisión sustentable.

Problemas de equidad. Aunque el consumo *per capita* pueda considerarse alto, existen problemas de equidad. El acceso de gente de bajos ingresos al suministro confiable de agua en volumen y calidad adecuados, es limitado. Esto muestra que los subsidios del agua no siempre benefician a las comunidades más pobres, pues el financiamiento insuficiente restringe la capacidad del sistema para expander la red a áreas subabastecidas, en las cuales generalmente el ingreso *per capita* promedio es bajo. En otras ciudades se ha visto que los residentes pobres, cuando no cuentan con el servicio público de agua, tienen que pagar hasta el 10 o 20% de su ingreso por ella.

En algunas de las áreas más pobres de la ZMVM el uso *per capita* puede ser tan bajo como 20 l/día mientras que otros consumidores usan 650 l/día. La Organización Mundial de la Salud recomienda 150 l/persona/día en países en desarrollo, y 50 l/persona/día se considera como la cantidad mínima para evitar problemas de salud.

Estrategias de suministro. Muchos de los factores que determinan el nivel de

consumo del agua, están bajo el control directo o indirecto de las autoridades responsables y pueden utilizarse como instrumentos de políticas; su uso sistemático constituye lo que se conoce como *administración de la demanda*. En contraste a las estrategias orientadas a ampliar el suministro –que enfatizan el desarrollo de nuevas o mejores fuentes–, la administración de la demanda se orienta a modificar el comportamiento de los consumidores.

Los instrumentos de la administración de la demanda pueden ser compulsivos, tales como medición domiciliaria, racionamiento del agua, adaptación de equipos sanitarios, nuevos códigos de construcción y reglamentación del uso del agua. Políticas indirectas o voluntarias incluyen estrategias económicas basadas en incentivos y desincentivos monetarios, así como educación pública.

Aunque en el pasado las estrategias de suministro en la ZMVM enfatizaron la ampliación de la oferta a través de la construcción de grandes obras, en años recientes se inició la aplicación de políticas orientadas a administrar la demanda. La medición se instituyó en el DF y para 1992, 53% de los usuarios tenían medidores, aunque a los mismos no se les ha dado servicio ni inspeccionado con regularidad. También, ha habido progresos sustanciales en la readaptación de instalaciones sanitarias para disminuir los volúmenes que consumen. Las pérdidas en el sistema se están corrigiendo a través de una campaña agresiva para repararlas en los sistemas de distribución y en las unidades habitacionales multifamiliares. Como ya se mencionó, el reúso del agua es otra cuestión que está recibiendo gran impulso, y diversos programas de recarga del acuífero están en marcha.

Por otra parte, se están introduciendo tarifas más apropiadas para reducir el desperdicio del recurso y aumentar la recuperación de costos y, de esa manera, financiar sistemas más amplios y mejores. Así, se aumentaron las tarifas industriales y domésticas del agua, en 80 y 120% en 1987, y han aumentado el 20% anual desde entonces. Sin embargo, limitaciones administrativas y de fondos han incapacitado a los gobiernos locales para obtener los beneficios correspondientes.

Cada vez hay un mayor reconocimiento del agua como un bien económico, tanto en la ZMVM como fuera de ella. Nuevas leyes federales se han introducido desde 1993 que incluyen desde un nuevo sistema de cargos a efluentes para financiar el tratamiento de aguas residuales, hasta el desarrollo de la noción de los derechos del agua, que permiten dentro de ciertos límites, su comercialización. El DDF está en el proceso de privatizar la administración de los servicios municipales manteniendo la propiedad pública, y esto seguramente incrementará la competencia en el sector del agua.

Marco jurídico e institucional

En la actualidad está teniendo lugar un profundo cambio tanto en las instituciones responsables de la administración de los servicios del agua, como en las leyes y reglamentos de los mismos. Tradicionalmente la administración del agua en México ha reflejado el principio de que los recursos hidráulicos son propiedad del Estado y que el derecho al agua –sin costo– está garantizado constitucionalmente para cada ciudadano. El cambio que está ocurriendo en el marco jurídico e institucional del agua, refleja una nueva percepción según la cual el agua ya no es un bien al que se tiene derecho sin costo, sino que, por el contrario, la misma es un bien sujeto a las leyes de la oferta y la demanda. Las nuevas leyes son un primer paso para su privatización, el establecimiento de tarifas basadas en el costo marginal y su planeación regional, todo esto para lograr el uso eficiente del agua como recurso.

Un grupo de reformas instituye impuestos y permisos para la extracción del agua subterránea, éste se usará conjuntamente con métodos que calculan a largo plazo la disponibilidad de volúmenes provenientes de los acuíferos. De esta manera se determinará también si dicha disponibilidad ha sido agotada por los permisos existentes. Se intenta así crear un mercado de derechos del agua y promover el uso eficiente de la misma. Además, los usuarios deberán pagar el costo marginal a cambio de mejores servicios.

En el Valle de México, la CNA continuará teniendo una responsabilidad clave en la adjudicación de permisos para la perforación de pozos, en la medición de su gasto y en su localización. Sin embargo, una relación de trabajo cooperativa entre las instituciones nacionales y locales con los usuarios, es vital para el uso eficiente del recurso.

Entre los cambios más significativos introducidos por la nueva legislación federal, están los *consejos regionales de cuenca*, los cuales, junto con la CNA y las comisiones estatales, deberán establecer las prioridades de uso del agua, promover su conservación y representar a los diversos grupos de usuarios de cada región; el Valle de México constituye por sí misma una región que eventualmente participará en este proceso. A través de la educación y difusión, el DDF y el Estado de México tendrán que convencer al público de las bondades de las nuevas políticas. El público, a su vez, exigirá equidad en la distribución y en los precios. Una ventaja importante de los consejos de cuenca será su posición estratégica para resolver cuestiones contenciosas sobre precios, derechos, medidas de conservación y desarrollo de infraestructura.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) ha sido señalada por la legislación como una institución nacional responsa-

ble de proteger el ambiente. Los cambios recientes de la ley también dan autoridad, para la aplicación de las normas que protegen la calidad del agua, a la CNA y a la SS —en comparación con las instituciones señaladas hasta aquí, la responsabilidad de los organismos locales o estatales en la ZMVM, es insignificante. Sin embargo, debe señalarse que la coordinación entre estas instituciones para evitar traslapes de jurisdicción o reglamentaciones inconsistentes, son tareas muy difíciles. Esta situación institucional tan compleja ha creado dificultades para establecer los reglamentos relativos al agua, derivados de la ley ambiental de 1988. A pesar de que esta ley anunció un plan muy amplio para proteger el ambiente, su aplicación por medio de las reglamentaciones correspondientes se ha realizado solamente en áreas reducidas donde los problemas críticos han hecho indispensable la acción; tal es el caso de la contaminación del agua por agentes patógenos y fuentes puntuales.

La nueva Ley Federal sobre Metrología y Normalización del 1o. de julio de 1992, estableció la Procuraduría Federal del Ambiente, institución que tiene amplios poderes para proteger el ambiente y capacidad para enjuiciar a aquellas industrias, compañías paraestatales y otros, que violen las normas jurídicas. Esta institución está fuera de la burocracia normal y podría servir para atraer la atención nacional hacia problemas importantes de degradación ambiental, incluyendo la calidad del agua dentro del valle. La atención nacional lograda, puede ser fundamental para establecer reglamentaciones más amplias, que no solamente resuelvan esos problemas, sino que eviten otros en el futuro.

La misma ley de julio de 1992, demanda el uso de análisis de costo y beneficio para el establecimiento de nuevas reglamentaciones y la determinación de si una solución no regulatoria, basada en las fuerzas del mercado, es preferible. Esta ley es significativa también, porque reúne a quienes realizan análisis de riesgo y estudios epidemiológicos con las instituciones que promueven el desarrollo económico. En el caso de la ZMVM, los análisis de costo y beneficio deberán incluir consideraciones técnicas acerca de la vida útil del acuífero. En este campo, la investigación, sin duda, tiene un papel importante que cumplir.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los subsidios al servicio de agua, aunque han fomentado el desarrollo económico, han limitado la capacidad del gobierno para ampliar las redes de servicio, purificar el agua, tratar el agua residual –ya sea antes de eliminarla o para reúso–, y financiar el mantenimiento. En época reciente las autoridades mexicanas han venido aplicando políticas tendientes a administrar con mayor eficiencia los recursos para el suministro de agua al área metropolitana. Sin embargo, revertir las tendencias del pasado y ejecutar las nuevas estrategias de conservación, no será fácil. Para administrar óptimamente el suministro y drenaje del agua en la ZMVM, será necesario combinar en proporciones adecuadas, la necesidad de obtener nuevas fuentes de abastecimiento con una administración más cuidadosa de las ya existentes.

Como se mencionó, un estudio como el presente no puede presentar diseños específicos, por lo que las recomendaciones que se dan a continuación solamente establecen lineamientos de políticas generales. Por otra parte, no se ha establecido un orden de prioridades, como no sea el de que dichas conclusiones sean seguidas con vigor y, de preferencia, se consideren sus efectos antes de continuar con el desarrollo de nuevas fuentes. También, dar alta prioridad a la administración de la demanda, utilizando como instrumentos las tarifas y el cobro efectivo, la educación y la difusión, y los programas de conservación y reúso. La sustentabilidad para muchas décadas y la economía en el suministro de agua a la ZMVM mejorarán al ponerse en práctica estas recomendaciones.

FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Asunto: *desarrollo de nuevas fuentes.* La posibilidad de ampliar las fuentes internas

es limitada, pues el acuífero de la ciudad de México está sobreexplotado y las fuentes superficiales son poco significativas. Sin embargo, los acuíferos de la cuenca de México que se extienden al norte de la sierra de Guadalupe, constituyen una reserva potencial insuficientemente conocida y que ha sido hasta ahora poco utilizada por diversas razones –aparentemente, algunas de ellas políticas y sociales.

Por otra parte, el desarrollo de nuevas fuentes externas tiene altos costos económicos –a los que hay que añadir los políticos y sociales, que también son muy significativos. Otra opción es aumentar el reúso del agua residual tratada, lo cual tiene un alto potencial debido a que los volúmenes de agua residual que salen del valle sin tratamiento son muy grandes. Finalmente, la aplicación de políticas destinadas a administrar la demanda y los programas de uso eficiente del agua, representan formas alternas de satisfacer las necesidades de suministro, equivalentes a nuevas fuentes de suministro de considerable importancia.

Recomendación: ***jerarquizar las opciones de suministro existentes.*** En la toma de decisiones relativa al desarrollo de nuevas fuentes, deben tomarse en cuenta las modificaciones que los programas de administración de la demanda y uso eficiente del agua introducirán en los patrones de consumo, pues ésta es una vía poco costosa para satisfacer las necesidades de suministro. Por otra parte, el reúso y la recarga artificial, utilizando agua residual tratada, son opciones de bajo costo que amplían la oferta. Además, existe la posibilidad de aprovechar más ampliamente la parte norte de los acuíferos de la cuenca de México. Finalmente, será necesario establecer el gasto óptimo del acuífero de la ciudad de México.

Asunto: ***aprovechamiento de los acuíferos del Valle de México.*** Aunque el acuífero de la ciudad de México está sobreexplotado, el volumen almacenado en el mismo es equivalente a muchas veces el déficit anual; sin embargo, existe incertidumbre respecto a su vida útil. Para determinar ésta y definir estrategias a largo plazo para su aprovechamiento óptimo, es necesario ampliar el conocimiento de sus propiedades geohidrológicas y químicas a gran profundidad.

Por otra parte, de los acuíferos de la cuenca de México, se ha explotado principalmente el de la ciudad de México –es decir, la parte al sur de la sierra de Guadalupe–, por razones políticas y sociales, a pesar de la gran extensión y potencialidad de los localizados en la parte norte. Consecuentemente, estos últimos constituyen una fuente potencial de abastecimiento para la ZMVM.

Recomendación: ***establecer un programa de investigación a largo plazo para los acuíferos de la cuenca de México.*** El objetivo de este programa sería dar

las bases científicas para la administración de los acuíferos de la cuenca de México –incluyendo los que se localizan al norte de la Sierra de Guadalupe. Deberá establecerse un consejo que lo dirija, que por una parte asegure su continuidad y por otra incluya a representantes técnicos de todas las partes involucradas que tienen jurisdicción en el área.

Recomendación: ***deberá determinarse el gasto óptimo del acuífero de la ciudad de México.*** Una vez que se conozcan las características del acuífero a profundidad, con suficiente confianza, un comité interdisciplinario y con representación de los diversos organismos involucrados –el consejo sugerido en la recomendación anterior podría utilizarse en esta tarea– debería integrarse para determinar los niveles óptimos de explotación del acuífero. Los siguientes factores deben incluirse en tal determinación:

- La dependencia económica de la región en el recurso subterráneo.
- El deterioro de la calidad del agua con la profundidad.
- La disponibilidad y costo marginal para obtener otras fuentes de agua nuevas.
- Un análisis del uso del agua.
- La influencia que tendrán los programas de reestructuración de tarifas, medición y cobro efectivo, así como de recarga.
- Impacto ambiental.
- Predicciones confiables –utilizando modelos matemáticos– de la vida útil del acuífero en las diferentes condiciones de bombeo.

Asunto: ***reúso del agua.*** La Zona Metropolitana del Valle de México descarga 44.4 m^3/s de agua residual en época de secas y una cantidad superior en la estación lluviosa. La mayor parte de esta agua sale del valle y no contribuye a la recarga del acuífero. Además, los programas actuales de reúso representan sólo una pequeña fracción de este gasto. Existe, por lo mismo, un amplio potencial para desarrollar más los programas de reúso del agua; ésta se podría utilizar en los usos que no requieren agua de mayor calidad, reservándola para aquellos en que sí sea indispensable.

Recomendación: ***ampliar el tratamiento del agua residual.*** Para aprovechar el amplio potencial de agua rehabilitada a que se hace referencia, es necesario ejecutar programas más amplios de pretratamiento –antes de su eliminación en el drenaje– de las aguas residuales de las industrias. Aunque en el Distrito Federal, el pretratamiento de aguas residuales industriales es obligatorio, según una ley de 1990, sin embargo, no se ha aplicado hasta ahora de manera general.

Calidad y salud pública

Asunto: *vulnerabilidad del acuífero a la contaminación*. El acuífero de la ciudad de México es vulnerable a la contaminación, especialmente en la zona de transición y las montañas por lo que existen gran número de fuentes de contaminación en su superficie. Es necesario proteger la calidad del agua del acuífero para asegurar el suministro de la ZMVM.

Recomendación: ***establecer un programa de vigilancia y protección de la calidad del agua subterránea***. La experiencia ha demostrado en repetidas ocasiones que las inversiones en la protección de los recursos de agua subterránea es más efectiva y eficiente que su restauración. De hecho, una vez que se ha contaminado una fuente, limpiarla para llevarla al nivel de agua potable puede no ser factible.

El programa de vigilancia debe incluir la identificación y el mapeo de las áreas vulnerables de la ZMVM, los asentamientos humanos, los pozos activos, los pozos abandonados, los servicios de drenaje suministrados, las industrias, la medida en que se aplique tratamiento a las aguas residuales industriales y domésticas, y las actividades que puedan contribuir a la contaminación del agua subterránea. La evaluación de los impactos de estas actividades en el acuífero y particularmente en los pozos de producción, tendría prioridad máxima.

El programa de protección puede incluir medidas tales como aumentar las restricciones a las descargas industriales, controlar los residuos peligrosos, establecer instalaciones sanitarias donde falten, y ejecutar programas de protección a las bocas de pozo, y la clausura y reubicación de pozos en producción.

Asunto: *efectos de los agentes patógenos en la salud*. Algunos estudios han indicado la presencia de organismos patógenos en las tomas domiciliarias, cisternas y otras partes del sistema de suministro, y los patrones de las enfermedades endémicas manifiestan que éstos tienen efectos dañinos en la salud de la población. Entre las posibles causas que originan este problema están: filtraciones en los sistemas de distribución del agua potable y de drenaje, canales abiertos que conducen agua residual sin tratar y ubicación de pozos de agua potable en las vecindades de esos cauces.

Recomendación: ***tratamiento del agua residual antes de su eliminación y mayor vigilancia de la salud pública***. Se reitera aquí la importancia de ampliar y mejorar la capacidad para tratar el agua residual, tanto para eliminarla en condiciones más seguras como para reusarla.

El esfuerzo sanitario debería prestar especial atención a las áreas donde las enfermedades intestinales infecciosas son más evidentes. Es importante desarrollar programas de monitoreo para obtener los

datos necesarios y realizar estudios epidemiológicos apropiados para rastrear el origen de los problemas, ya sea el sistema de distribución, las viviendas, o algunas otras fuentes en las comunidades. La posibilidad de contaminación cruzada entre los sistemas de drenaje y de distribución del agua potable debería evaluarse a mayor profundidad. En la educación médica deberían enfatizarse las enfermedades ambientales y el efecto de las sustancias tóxicas portadas por el agua.

Asunto: ***reglamentación y supervisión de la calidad del agua.*** La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la Secretaría de Salud (SS) y la Comisión Nacional del Agua (CNA), comparten estas responsabilidades en la actualidad. Sin embargo, existen dificultades de coordinación que se han manifestado en problemas específicos como la falta de definición en las normas de calidad que prevé la Ley de Normas y Supervisión de 1992. Otras manifestaciones de los problemas de coordinación han sido las dificultades para establecer prioridades para los diferentes contaminantes y para la ejecución de programas para que reduzcan la contaminación en el suministro de agua.

Recomendación: ***integración de estas responsabilidades en un solo organismo.*** En beneficio de la eficiencia y reducción de costos, en materia de protección de la calidad, las responsabilidades deberían integrarse en un solo organismo.

ADMINISTRACIÓN DE LA DEMANDA

Asunto: ***control del consumo y del costo del agua.*** Las estrategias tradicionales, en las que la atención se centra en ampliar el suministro –la oferta– han conducido a un ascenso dramático del costo del agua en la ZMVM. Además, el consumo es artificialmente alto y la recuperación de costos es inconvenientemente baja. De esta manera se ha visto limitada la capacidad para expandir el sistema a áreas con servicios insuficientes, tratar el agua residual, reparar fugas o realizar algunas otras funciones.

Recomendación: ***administrar la demanda, además de atender el suministro.*** La demanda y la oferta de agua se pueden equilibrar introduciendo una noción más amplia de administración, en la cual tanto el suministro como la demanda son considerados en el proceso de planeación. Entre los instrumentos de política para la administración de la demanda, están: programas públicos educacionales, readecuación de las instalaciones sanitarias, leyes de conservación, programas de instalación y mantenimiento de medidores y planeación del uso del suelo urbano, así como sistemas tarifarios y de cobro efectivo, que igualen la recuperación de recursos con los costos del suministro.

Los programas ya en marcha y en esta dirección, deben fortalecerse y llevarse a sus últimas consecuencias. En particular,

el nuevo programa de readaptación con instalaciones sanitarias de flujo reducido es digno de elogio, pues es uno de los más ambiciosos en el mundo.

Recomendación: ***se deben instalar para todos los usuarios, medidores que funcionen.*** Para este fin, varios millones adicionales de medidores tendrán que instalarse, a un costo aproximado de $100 dólares por unidad. Esto representa un gasto considerable, pero es esencial para la reestructuración tarifaria, para capacitar a las autoridades municipales y del DF y para recuperar costos en forma más amplia y justa.

Recomendación: ***extender y renovar el servicio de agua.*** La medición domiciliaria debe complementarse con: 1) extensión de los servicios a áreas no conectadas actualmente, 2) renovación de las instalaciones envejecidas o deterioradas, y 3) reparación oportuna de las fugas, las cuales por sí mismas pueden equivaler al volumen de una fuente nueva.

Asunto: ***equidad.*** Además de la importancia de este aspecto, existe la circunstancia de que los organismos encargados del agua necesitarán un amplio apoyo público para reestructurar tarifas y realizar otras reformas; tal apoyo se obtendrá con mayor facilidad si se advierte que el servicio se proporciona con equidad.

Entre la población existe desigualdad en la calidad y disponibilidad de los servicios de agua en la ZMVM. De acuerdo con estudios realizados, los estratos sociales de menores ingresos no tan sólo están pagando una proporción mayor de sus ingresos por el agua, sino que además reciben peor servicio. El énfasis en la conservación y en la administración de la demanda, no debe menoscabar la necesidad de mejorar el servicio a los residentes más pobres. Los efectos que las expansiones del sistema de distribución y las políticas tarifarias tienen en la salud y las finanzas de la población de menores ingresos, deberían investigarse con mayor amplitud.

Recomendación: ***la expansión de servicios confiables de agua a las comunidades de menores ingresos debe continuarse.*** El agua es una necesidad básica esencial para la salud y el bienestar, y todas las personas –las de bajos y las de mayores ingresos– deben tener acceso a ella.

Recomendación: ***promover la participación del público en la toma de decisiones relativas a la privatización y la administración de la demanda.*** A medida que el agua se transforme, de un bien que no tiene costo, en otro que sí lo tiene, quienes pagan finalmente exigirán –y tienen derecho– a que se les oiga. Por lo mismo, el público debe disponer de caminos institucionales para expresar su opinión y participar en las decisiones. Además, esta es una vía para convencer al público de que el precio de dicho bien es razonable, de que la cantidad y calidad se distribu-

yen con equidad, y que los programas de conservación, así como los subsidios, son justos.

Marco jurídico e institucional

Asunto: *cambios organizacionales.* Los ajustes en los enfoques y procedimientos deben tener repercusiones en la estructura de las organizaciones y en su personal. La ambiciosa iniciativa de privatización en que se ha embarcado el DF, implica cambios radicales, tanto para el gobierno como para el público. Será necesario promover políticas de precios sanas, la investigación y el desarrollo, la educación al público y políticas reglamentarias, que incluyan un examen de los beneficios potenciales de la privatización. La educación al público tiene un papel estratégico, pues es un buen camino para cambiar la creencia, generalizada en México, de que las autoridades tienen la obligación de suministrar agua libre de costo, por ser esencial para la vida; también, es la forma de instruir a la comunidad para que cambie sus hábitos y lograr una reducción sustancial de la demanda de agua.

Recomendación: ***continuar y ampliar las campañas educativas del público.*** Es importante fomentar la conservación entre el público en general. Deben explorarse las oportunidades de involucrar al sector privado en la educación del público.

Recomendación: ***aumentar el número de profesionales de las ciencias sociales en los cuadros administrativos del agua.*** La decisión de los cuerpos responsables, de incidir en la demanda además del suministro, debe reflejarse en la inclusión en esos cuerpos de quienes tienen conocimientos y experiencia para ejecutar programas con dichas características. Será necesario realizar un esfuerzo concertado para aumentar la capacidad de dichos organismos en esta materia, particularmente reclutando y promoviendo a los profesionales con conocimientos en disciplinas sociales tales como sicología, comunicación social, administración pública y economía. Además, las oficinas encargadas de la conservación del agua y de la administración de la demanda deben situarse jerárquicamente, de manera tal que tengan autoridad real en la toma de decisiones.

Investigación

Asunto: *investigaciones futuras.* El financiamiento y la selección de tópicos de investigación continuarán siendo preocupaciones clave.

Recomendación: ***realizar investigaciones para aclarar puntos dudosos que son significativos para la administración del agua en la ZMVM.*** Entre otros temas, deberían recibir atención: la sierra de Chichinautzin –desde el punto de

vista de la recarga y de la vulnerabilidad a la contaminación–, la importancia relativa que tendrá en el futuro el hundimiento del terreno asociado a la extracción del agua subterránea, el efecto de las fracturas de las arcillas en la vulnerabilidad del acuífero, diversos asuntos relacionados con la recarga artificial y el reúso, etc.

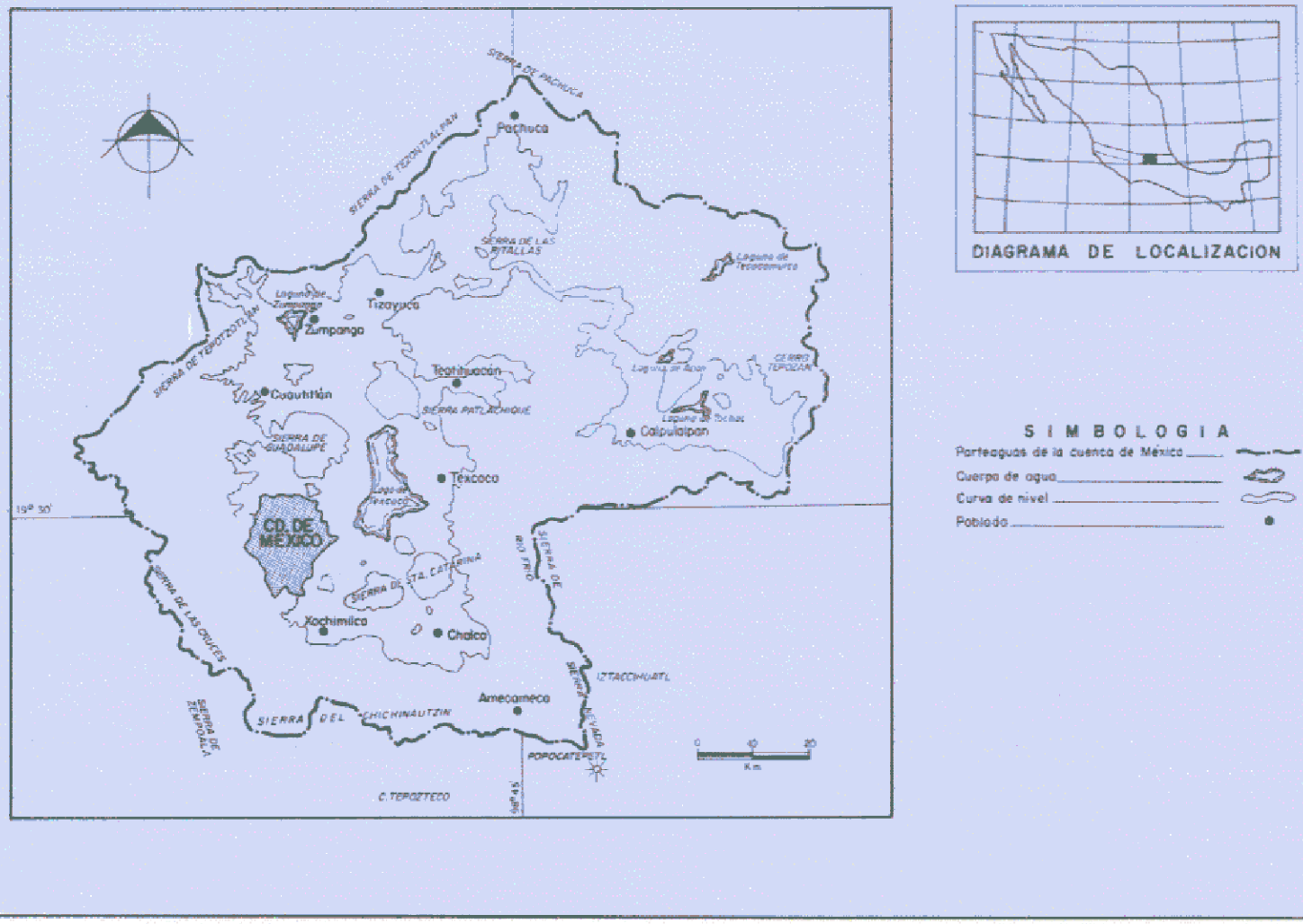
Capítulo 1
Introducción

1. El Valle de México y su ubicación

La República Mexicana está dividida por una cadena de montañas volcánicas –denominada Eje Neovolcánico Transmexicano–, que cruza el país de este a oeste. En la parte central de esta cadena montañosa está la cuenca de México que, por no tener salidas naturales para los escurrimientos que se generan dentro de la misma, constituye una cuenca endorreica. Está situada en el borde meridional de la Mesa Central y circundada por montañas; en su planicie, las altitudes de la cuenca oscilan entre 2,240 y 2,390 msnm. Esta gran altura es un factor que dificulta el suministro de agua para la enorme población que es necesario abastecer. La cuenca de México tiene una forma semejante a una elipse con ejes, mayor y menor, de 110 y 80 km, respectivamente; el mayor de estos ejes está orientado de suroeste a noreste y el área de la elipse es de alrededor de 9,600 km^2 (Fig. 1.1).

La parte inferior de la cuenca de México es una llanura lacustre plana, otrora cubierta por lagos someros y pantanos (Fig. 1.2), a la que frecuentemente se le denomina: Valle de México. Contiene varios lagos someros, de los cuales el de Texcoco es el mayor. Le sigue en extensión la laguna de Zumpango, al noroeste, mientras que el lago de Chalco, tercero en importancia, se extinguió por completo a principios del presente siglo. Los dos primeros lagos y los canales de Xochimilco, son los últimos vestigios de otros mucho mayores y más numerosos que formaban probablemente un solo cuerpo de agua, poco profundo, al final de la última época glacial. Hacia el noreste de la cuenca se ubica un área con numerosas elevaciones volcánicas y depresiones que ocupan varias lagunas some-

FIGURA 1.1
LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO Y SU LOCALIZACIÓN



ras, como las de Apan, Tochac y Tecocomulco, las cuales desaparecen durante el estiaje.

Este sistema de lagos cubría las porciones bajas del valle hasta la mitad del siglo XIX y sus depósitos subyacen a la llanura lacustre. El lago de Texcoco era la parte más baja del valle, y recibía excedentes de los lagos de México, Xochimilco y Chalco, al sur, así como de los lagos Xaltocan y Zumpango, al norte. Debido a la alta evaporación, el lago de Texcoco es salado, con un contenido de sólidos superior al del agua de mar. Por otra parte, los lagos de Chalco y Xochimilco recibían una considerable afluencia de agua dulce proveniente de manantiales y, en cierta medida, de la precipitación pluvial en sus áreas además de los escurrimientos; por ello su agua era dulce. Sin embargo, la de los lagos de México y Zumpango no era potable, pues estaba demasiado enriquecida con sales, debido a la evaporación. Los lagos a que se hace referencia, han sido drenados artificialmente a través de las montañas, hacia las aguas nacientes del río Tula, al norte de la cuenca.

De esta región de tierras altas descienden ríos importantes. El valle de Toluca —más alto que el de México—, al poniente, drena hacia el oeste, al océano Pacífico, a través del lago de Chapala. Los sistemas del Tula y del Pánuco, al norte de la cuenca, así como los ríos Tecolutla y los de la cuenca de Puebla, al este y al sureste, vierten hacia el Golfo de México. La cuenca del río Amacuzac limita con las de México y de Toluca, y drena al sur, hacia el océano Pacífico. Todos estos ríos son fuentes potenciales de abastecimiento para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); algunas de ellas están actualmente en uso (Fig. 1.3).

FIGURA 1.2
LOS LAGOS PRECORTESIANOS

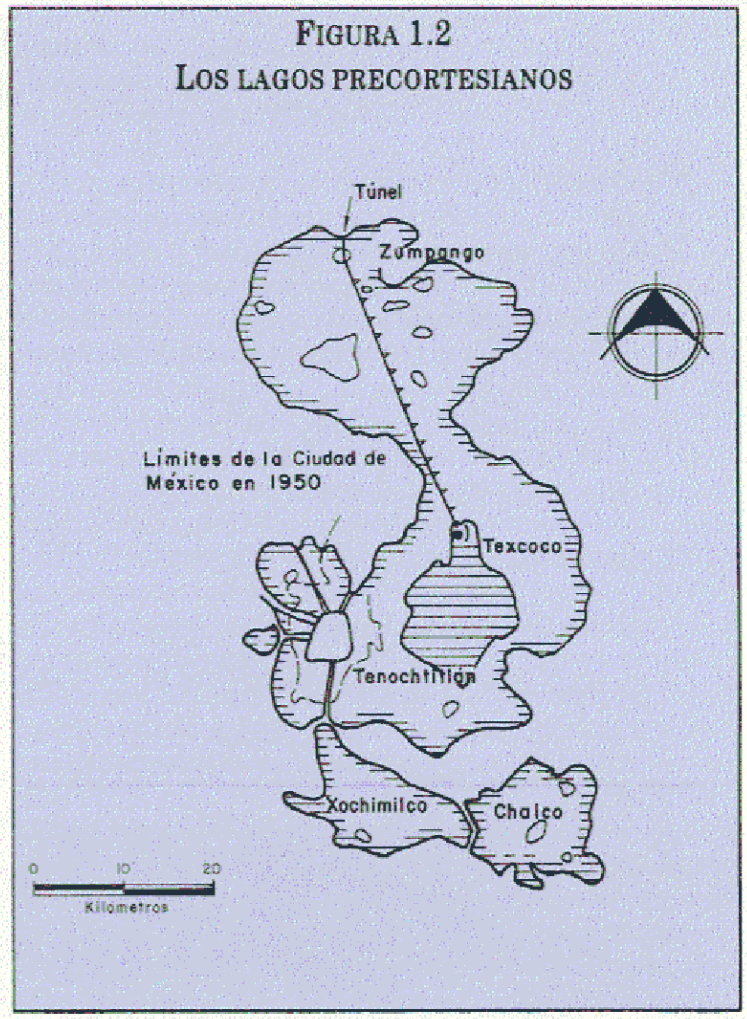


FIGURA 1.3
CUENCAS QUE SON FUENTES POTENCIALES DE ABASTECIMIENTO PARA LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

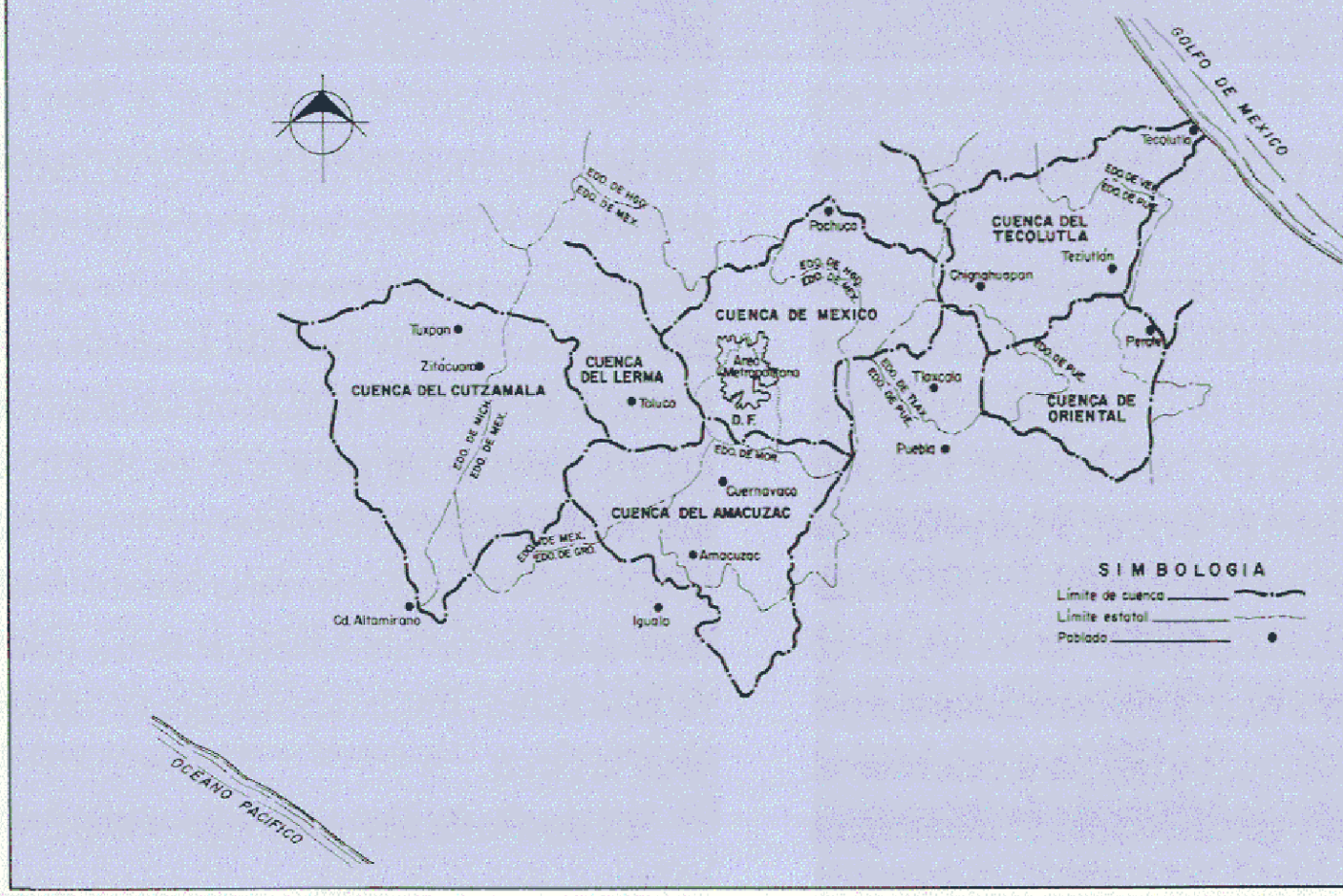


TABLA 1.1

DIVISIÓN POLÍTICA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

Delegaciones Políticas (DF)	*Municipios conurbados (E. de M.)*
1. Atzapotzalco	1. Huixquilucan
2. Gustavo A. Madero	2. Naucalpan
3. Miguel Hidalgo	3. Tlalnepantla
4. Cuauhtémoc	4. Atizapan de Zaragoza
5. Venustiano Carranza	5. Villa Nicolás Romero
6. Benito Juárez	6. Cuautitlán Izcalli
7. Iztacalco	7. Tultitlán
8. Álvaro Obregón	8. Cuautitlán
9. Iztapalapa	9. Ecatepec
10. Magdalena Contreras	10. Coacalco
11. Cuajimalpa	11. Tecamac
12. Coyoacán	12. Nezahualcóyotl
13. Tlalpan	13. Chimalhuacán
14. Tláhuac	14. Chicoloapan
15. Xochimilco	15. La Paz
16. Milpa Alta	16. Ixtapaluca
	17. Chalco

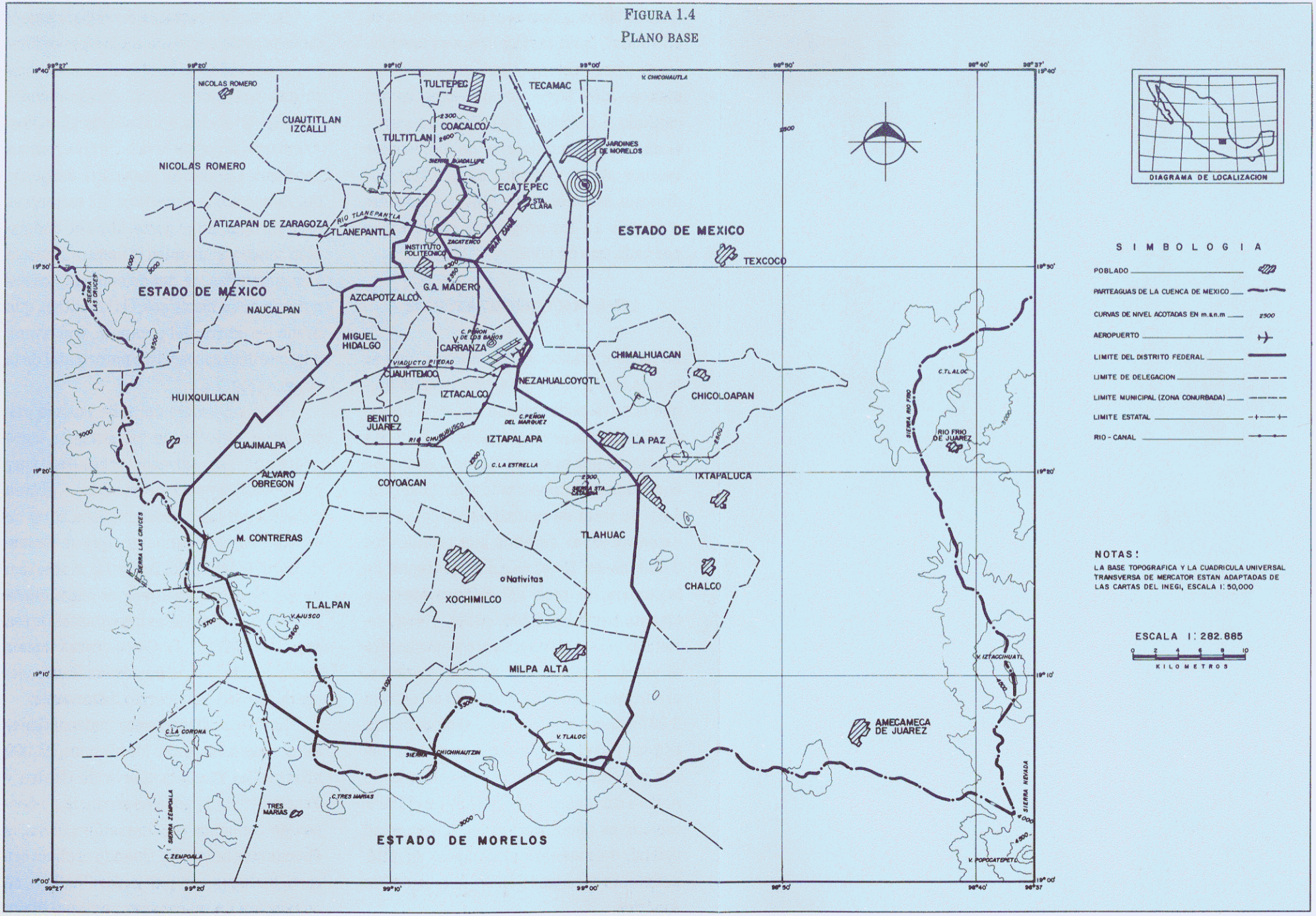
1.2. EL ÁREA DE ESTUDIO

En la parte sur de la cuenca que se ha descrito, se asienta la ciudad de México. Aunque en realidad, la ciudad de México no sólo incluye al DF, sino también una porción del Estado de México, en el pasado los términos DF y ciudad de México se utilizaron como sinónimos. En este estudio se usará la expresión: Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para referirse al área urbana constituida por 17 municipios del Estado de México (Tabla 1.1 y Fig. 1.4), con una superficie de 2,269 km^2, y el Distrito Federal –dividido en 16 delegaciones políticas–, con una extensión total de aproximadamente 1,504 km^2. De acuerdo con el censo de 1990, la población de la ZMVM era entonces de un poco más de 15 millones de habitantes –alrededor del 17% de la población total del país. Este estudio está dedicado a la problemática, actual y futura, asociada al suministro de agua y drenaje de la ZMVM.

Es oportuno hacer las siguientes precisiones. Por una parte, aunque el área

FIGURA 1.4

PLANO BASE



total de las jurisdicciones de la ZMVM es de 3,773 km^2, la de servicio para el suministro de agua y drenaje tiene una superficie menor —1,287 km^2—, como se explica en el capítulo 2 (sección 2.2). Por otra parte, el número de municipios de los estados vecinos al DF, incluidos en la ZMVM por diversos estudios, varía tanto en los autores como en los propósitos perseguidos por cada uno de ellos.

1.3. Características físicas

La parte meridional de la cuenca, que es la más importante para este estudio porque la ZMVM está ubicada ahí, está limitada al poniente por la sierra de las Cruces y al oriente por la sierra Nevada, cada una con muchas eminencias topográficas (Fig. 1.5). Se trata de montañas abruptas con extensas áreas de altos que rebasan los 3,000 msnm. En el ángulo suroriental de la cuenca, el pico del Popocatépetl se levanta hasta los 5,465 msnm, y está coronado por un glaciar. Cerca se encuentra el volcán Iztaccíhuatl, a 5,230 msnm, y, al suroeste, se ubica el Ajusco se eleva a 3,937 msnm. Las rocas volcánicas que constituyen todas estas montañas se extruyeron a partir de fallas, con trayectoria de norte a sur, desarrolladas durante el Pleistoceno; es decir, durante la última edad glacial, de manera aproximada, simultáneamente a la aparición del hombre sobre América.

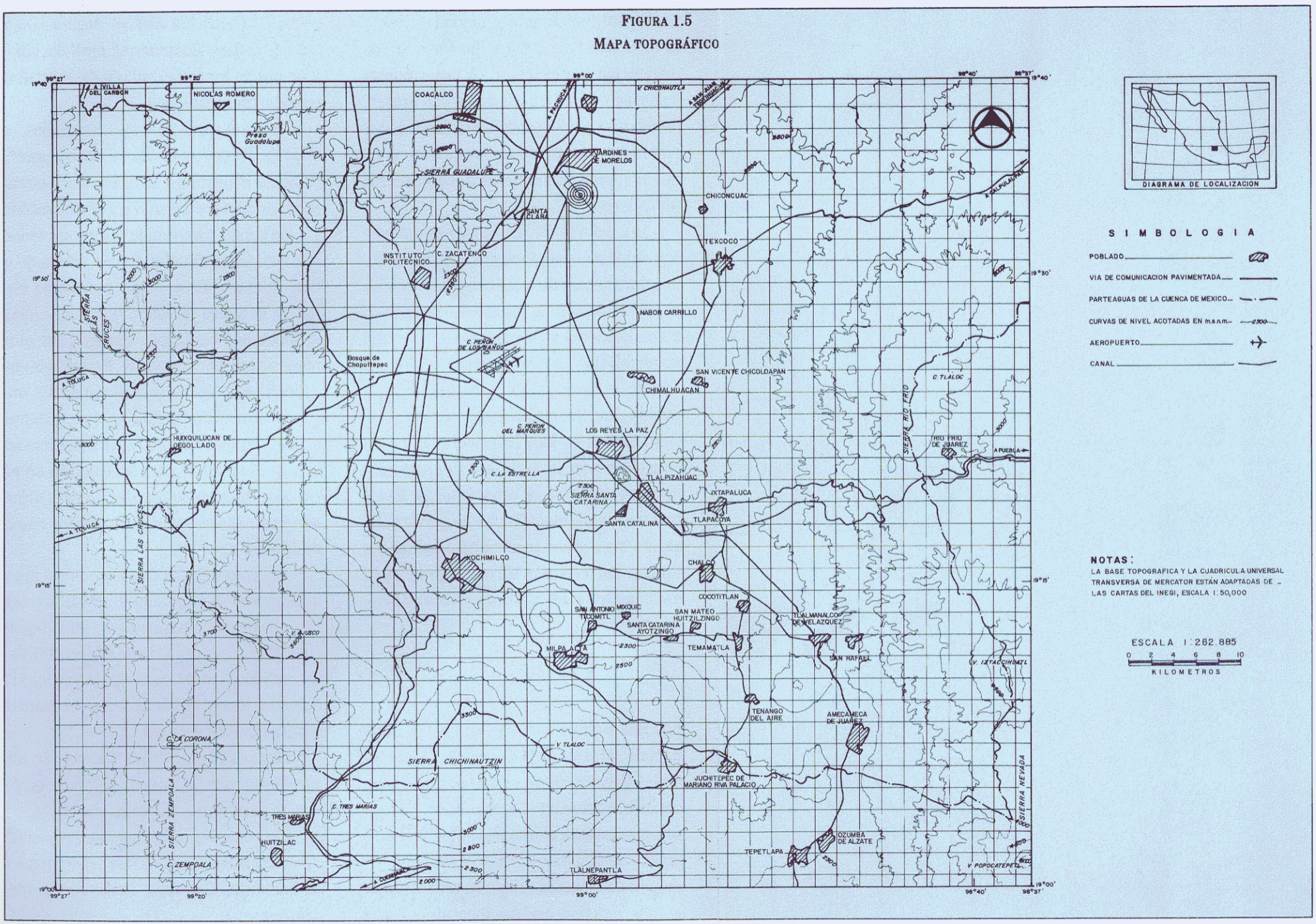
En muchos sectores, las regiones montañosas están separadas del valle por flancos moderados y uniformes, a los que subyacen aluvión y clásticos volcánicos, a menudo en forma de abanicos aluviales. Asimismo, flujos de lava basáltica forman pendientes suaves en gran parte del borde del valle, pero la superficie del terreno es muy abrupta. En el norte, altos de ondulación suave yacen entre la llanura lacustre y las montañas, de donde emanan dos importantes ríos históricos: el Cuautitlán, que drena los cerros del poniente, y el Avenidas, que desagua la parte nororiental de la cuenca (Fig. 1.5).

En la superficie del valle pueden distinguirse: el lecho de los antiguos lagos —formado por estratos arcillosos muy compresibles y poco permeables—, el área cubierta por las montañas y una *zona de transición* o de piamonte, que se extiende entre el lecho del lago y las montañas. La sierra de Guadalupe y el cerro Santa Catarina son elementos importantes de esa superficie (Fig. 1.4). Otros cerros menos prominentes son: Peñón de los Baños, cerro de la Estrella, y cerro Chiconautla.

Las reconstrucciones paleoambientales realizadas para los últimos 25,000 años en las zonas lacustres de Chalco y Texcoco[1–3], indican la alternancia de épocas de reducida precipitación pluvial, y épocas más húmedas. Cuando el clima era seco, los lagos —en particular Chalco—, se convertían en un extenso pantano, mien-

FIGURA 1.5

MAPA TOPOGRÁFICO



SIMBOLOGIA

- POBLADO
- VIA DE COMUNICACION PAVIMENTADA
- PARTEAGUAS DE LA CUENCA DE MEXICO
- CURVAS DE NIVEL ACOTADAS EN m.s.n.m. — 2300
- AEROPUERTO
- CANAL

NOTAS:

LA BASE TOPOGRAFICA Y LA CUADRICULA UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR ESTÁN ADAPTADAS DE LAS CARTAS DEL INEGI, ESCALA 1:50,000

ESCALA 1:282,885

0 2 4 6 8 10

KILOMETROS

tras que al aumentar la humedad el tirante de agua se incrementaba. Sin embargo, las evidencias indican que los lagos fueron someros –de 0.5 a 2 o 3 metros de profundidad– en los últimos miles de años. Estos ambientes lacustres proporcionaron grandes recursos alimenticios a los primeros pobladores.

Las laderas de las montañas estuvieron cubiertas por pinos y existen aún algunos remanentes de estos bosques. Durante el periodo colonial, los árboles se usaban intensivamente en la construcción y como combustible. La desforestación ha sido amplia e inconveniente, especialmente debido a las lluvias torrenciales y a la erosión; ambas se han incrementado como consecuencia de la tala y el desarrollo humano, incluida la urbanización. Estos factores han modificado considerablemente las condiciones climatológicas naturales del Valle de México y provocado en la actualidad contaminación atmosférica severa.

1.4. Hidrografía

Los ríos Remedios y Churubusco drenan hacia el interior de la ZMVM desde la sierra de las Cruces; ahora están confinados en canales artificiales –viaductos y avenidas principales han sido aprovechados en su lugar para facilitar el tránsito vehicular. La mayoría de los ríos eran efímeros al llegar al valle, o su flujo casi desaparecía durante el estío. Todos los ríos se desbordaban cuando el flujo alcanzaba el nivel del lago, y en vastas áreas del valle y de la ciudad ocurrían inundaciones.

Desde el punto de vista hidrográfico, el Valle de México se divide en once zonas[4,5], como se muestra en la figura 1.6 y cuyas características se describen a continuación.

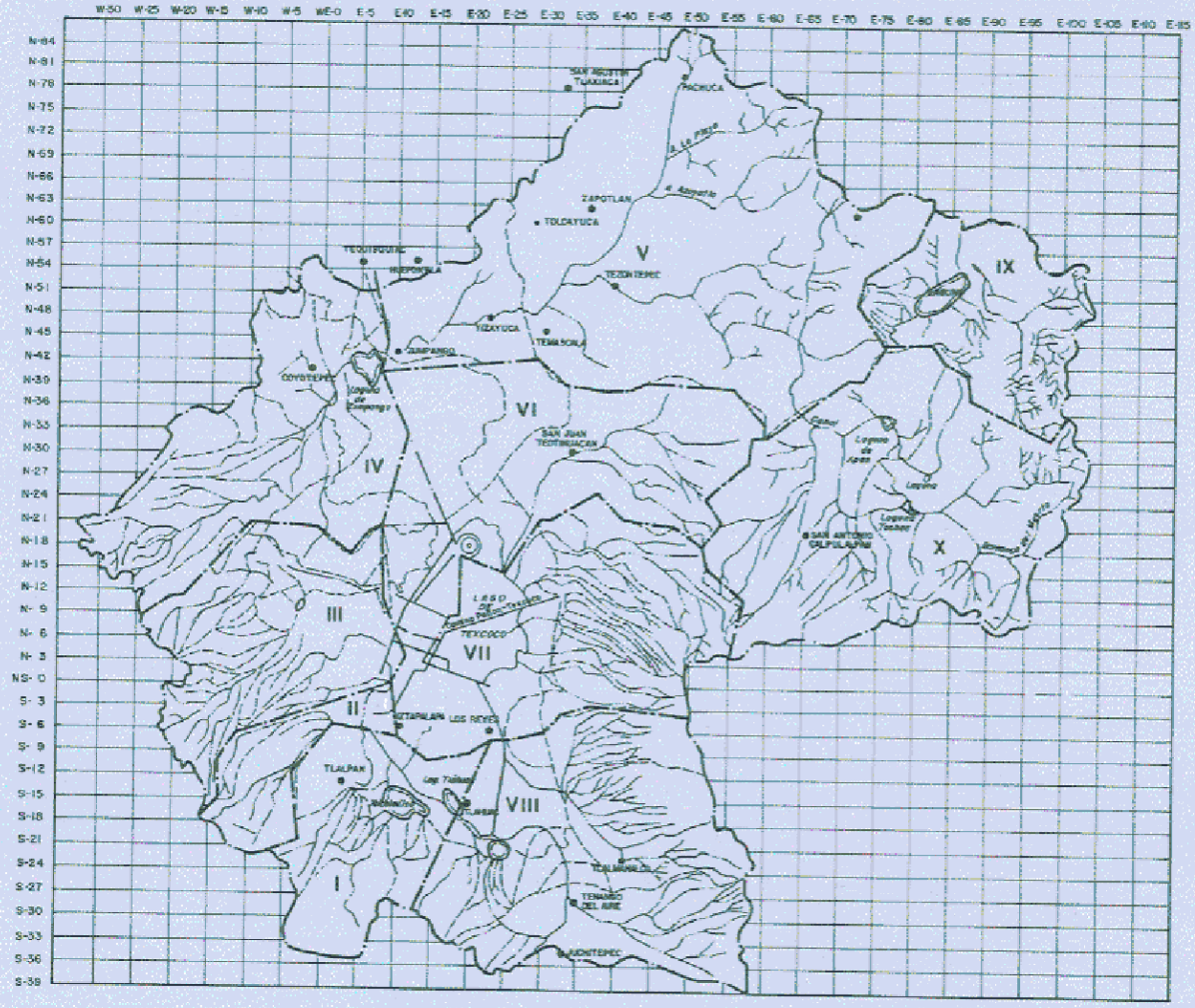
La zona I comprende la cuenca de los ríos San Gregorio, San Lucas, Santiago y San Buenaventura; estas corrientes bajan de la sierra de Chichinautzin, cuyas formaciones basálticas tienen gran permeabilidad, por lo que el escurrimiento superficial anual es solamente de 1.2 millones de m^3 (36l/s). Sin embargo, durante las tormentas excepcionales se presentan grandes avenidas, particularmente en el río San Buenaventura, donde se estima que han llegado a generarse gastos hasta de 100 m^3/s.

Las zonas II y III comprenden el área urbanizada de la ciudad de México y los ríos que desde el poniente del valle bajan hacia ella; éstos son también intermitentes, salvo los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, Hondo y Tlalnepantla que tienen escurrimientos perennes.

La zona IV abarca las cuencas de los ríos Tepozotlán y Cuautitlán, que se originan en el noroeste del valle.

Las zonas V y VI corresponden básicamente a la cuenca de los ríos provenientes de Pachuca y San Juan Teotihuacán, respectivamente.

FIGURA 1.6
MAPA HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DE MÉXICO



La zona VII incluye los ríos que descargan en el lago de Texcoco por el oriente.

La zona VIII está limitada por los ríos San Francisco y Milpa Alta, al oriente del Valle de México. En esta zona el gasto medio es de 0.6 m^3/s.

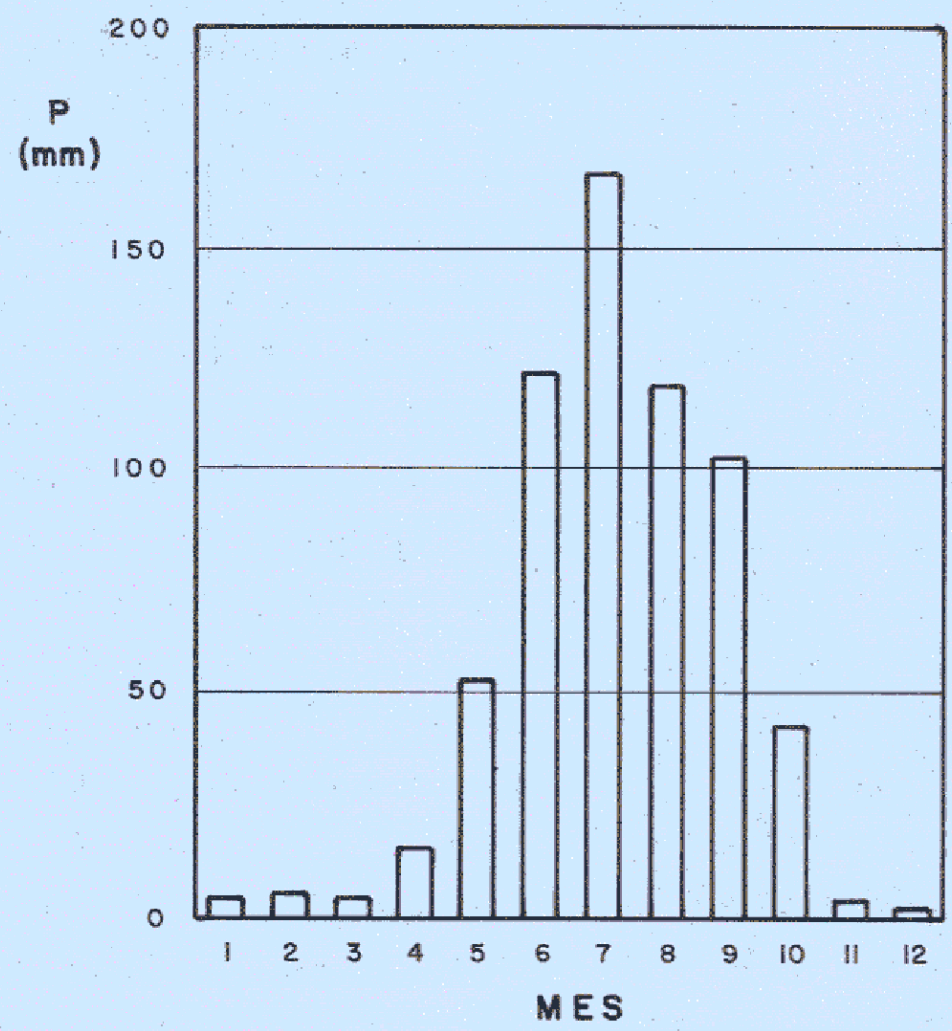
Las zonas IX, X y XI, que originalmente no formaban parte de la cuenca del Valle de México, han sido incorporadas a ella artificialmente. Comprenden desde la cuenca del río Tizar hasta las corrientes alimentadoras de la laguna de Tecocomulco, y producen un gasto de 1.6 m^3/s.

En el Valle de México existieron gran cantidad de lagos, ríos y manantiales. Sin embargo, debido al drenaje del valle, a la urbanización y a la explotación del acuífero,la disponibilidad de agua superficial ha disminuido de manera drástica. En conjunto, los cursos de agua del Valle de México producen un gasto medio de 19 m^3/s, que equivale a 9% de la precipitación pluvial media anual. De ellos se aprovechan solamente 1.4 m^3/s.

1.5. CLIMA

El clima de la ciudad de México se puede clasificar como subtropical de altura, templado, semiseco, con un invierno no bien

FIGURA 1.7
DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA LLUVIA



definido. La temperatura media es de 20°C; el periodo de lluvias comprende de mayo a octubre, en tanto que el resto del año éstas prácticamente no existen (Fig. 1.7). La precipitación anual es de 700 mm, distribuida irregularmente en el valle. La magnitud de su volumen total ronda los 6,600 x 10^6 m^3/año o 210 m^3/s. Dicha precipitación anual tiene gran influencia topográfica y aumenta con la elevación –incrementándose del noreste al suroeste; en particular, en algunos puntos de las montañas meridionales y occidentales alcanza valores de 1,200 a 1,500 mm. Debido a esto, las laderas más bajas son más secas que las cumbres de las montañas, y esto se manifiesta en la vegetación nativa. Es frecuente que los flancos menos altos estén cubiertos por arbustos y pastizales, como se observa en las sierras menores y en las colinas de la parte septentrional de la cuenca.

Por otra parte, la distribución pluvial estacional y la frecuente ocurrencia de tormentas de gran intensidad, dificulta el control de los escurrimientos y su aprovechamiento en la recarga del agua subterránea. Finalmente, el potencial anual de evapotranspiración es de aproximadamente 1,400 mm.

1.6. Perspectiva histórica acerca del suministro de agua

En la cuenca de México, los manantiales fueron abundantes y el agua dulce que producían fue una fuente importante de agua para las sociedades que la habitaron.[6] Los poblados precortesianos se asentaban junto a ellos, ampliamente distribuidos en las áreas montañosas y en el valle, cerca de las estribaciones de aquéllas. Los centros de población más importantes provinieron de los asentamientos ubicados en el valle, probablemente porque el suelo en las montañas no era tan fértil como en el valle y, en general, el ambiente ahí era menos atractivo. El uso de los manantiales continuó tanto en la época colonial como después de la Independencia, y no fue sino hasta el presente siglo que su importancia como fuente de suministro decayó, hasta volverse casi insignificante, debido al uso intensivo del agua subterránea.

Aproximadamente en el siglo VIII, en la parte nororiental de la cuenca, la cultura teotihuacana llegó a tener preponderancia; la irrigación entonces se basaba en el uso de agua de manantiales. Cuando tras dilatado peregrinaje de varias generaciones los aztecas llegaron a la cuenca, ya hacía siglos que la localidad de Teotihuacán se había abandonado, y otras tribus fuertes y organizadas controlaban el Valle de México. Los tecpanecas permitieron a los aztecas establecerse cerca de Chapultepec, famoso por sus manantiales. En 1325 se desplazaron hacia dos pequeños y pantanosos islotes en el interior del lago, cerca de Chapultepec, donde fundaron la ciudad de México–Tenochtitlán.[6] La fuente de abastecimiento para esta nueva comunidad debe haber provenido de manantiales pequeños, pues se sabe que el agua del lago y la subterránea somera no era potable. Díaz del Castillo[7] narra un episodio en el que, durante una expedición militar a lo largo de la orilla del lago, un indio y un soldado español murieron de sed. León–Portilla[8] cita un poema indio que se refiere al agua no potable del lago. Otra evidencia de los manantiales como fuentes de agua dulce en estas islas, es un dibujo del siglo XVI en el que se representa a un indio en Tenochtitlán junto a un manantial, en lo que ahora es la glorieta Cuitláhuac.[9] El *Códice Florentino*, del siglo XVI, también se refiere a estos manantiales.

Comparado con el de otras sociedades coetáneas, probablemente el consumo de agua en la vida diaria de los aztecas era elevado. Por ejemplo, en contraste con los europeos, los aztecas se bañaban diariamente y la falta de cumplimiento de esta norma era causal de divorcio.[6] Ropa, pisos y aun calles se lavaban regularmente.

En México-Tenochtitlán no había espacio para la agricultura comercial, pero los aztecas eran aficionados a las flores y plantas ornamentales, de modo que parte

del agua dulce se usaba para regar jardines públicos y privados.[6] Mediante balsas de madera, vegetación y lodo extraído del fondo del lago, crearon chinampas para jardinería comercial y, durante siglos, la agricultura en chinampas proveyó una buena parte de los alimentos de la población del valle.

Los manantiales de aguas termales mineralizadas del Peñón de los Baños (Fig. 1.5) estaban sobre una línea de fuentes termales a lo largo de lo que se sospecha es una fractura de las rocas subyacentes al relleno aluvial, bajo la arcilla. Se usaban, y continúan usándose, como aguas curativas (*spa: salute per aqua*), pero el nivel del agua se ha abatido y estos manantiales ya no fluyen hasta la superficie.

En esta localidad protegida e ideal, y bajo el fuerte y estricto régimen de los aztecas, México-Tenochtitlán prosperó y creció, lo cual ejerció una presión adicional en el escaso suministro de agua local. Pronto se necesitaron nuevas fuentes para satisfacer la creciente demanda. En 1424, 99 años después de la fundación de la ciudad, se inició la primera guerra azteca de conquista contra las tribus que les habían ofrecido posesión en el valle.[10] Chapultepec, con sus manantiales, quedó bajo el control de los aztecas. Luego Coyoacán y Xochimilco, cuyos manantiales se agregaron también al nuevo imperio.

Para llevar agua a la ciudad, se construyeron acueductos, primero desde Chapultepec, posteriormente desde Coyoacán, a lo largo de calzadas, que todavía son vías públicas en la ciudad de México. Al respecto, hay referencias en la literatura[11] sobre una desastrosa inundación, probablemente resultante de un accidente, durante la inauguración oficial del Sistema de Coyoacán. No existe una explicación de este evento; empero, aparentemente se le consideró de mal agüero, pues el emperador ordenó destruirlo.

Adicionalmente a la protección que ofrecía a la ciudad, el lago constituyó un factor importante en muchos aspectos de la vida azteca, especialmente en comunicación y transporte, pues –al menos como máquina mecánica– aún no se conocía la rueda; el agua y otros satisfactores se distribuían en canoas a través de una red de canales, a todas las partes de la ciudad.[12] Peces y aves acuáticas eran abundantes y por tanto, fuentes importantes de alimentos, al menos para las clases altas.

Las aguas salobres de la parte más baja del sistema lacustre como el lago de Texcoco, se evaporaban para producir sal, un satisfactor importante para el comercio.[13] Históricamente la sal ha tenido un papel importante en la sociedad y el comercio, pero en Mesoamérica lo era especialmente, porque uno de los alimentos básicos era una variedad de frijol que se digería más fácilmente mediante su cocción en agua salada.[14] En la actualidad, las salmueras concentradas de las arcillas la-

custres, son materia prima de una importante planta química industrial. Tal abundancia de sales no es desconocida en cuencas endorreicas; sin embargo, en el caso del Valle de México, el agua superficial que desde las montañas llega hasta los lagos contiene pocas sales disueltas, y los contrastes en la calidad del agua en distancias cortas son otro rasgo distintivo de esta cuenca.

A través de su historia, el valle y sus ciudades han sido susceptibles de inundaciones severas.[10] Con el fin de reducir daños los aztecas construyeron calzadas, diques y otras obras hidráulicas –una relación amplia de ellas se presenta en la sección 2.1, del capítulo 2–, con las que dividieron el agua en sectores y controlaron el flujo entre éstos. Durante la Colonia y después de la Independencia las inundaciones continuaron; sólo en época reciente, gracias a las obras del Drenaje Profundo, se les ha controlado en forma definitiva.

Como un detalle interesante, hasta los primeros años del siglo XX, botes de vapor de carga y pasajeros surcaban los canales que conectaban Chalco y Xochimilco con la parte central de la ciudad de México. Para 1930, la situación había cambiado considerablemente: los niveles del agua descendieron a causa de los canales que drenaban el Valle y, a medida que la ZMVM optó por el abastecimiento mediante pozos para satisfacer la creciente demanda, la mayoría de los manantiales cesó de fluir. La extracción de agua subterránea también produjo grandes hundimientos de terreno, sumamente dañinos para las obras civiles, por lo que cuando las autoridades responsables identificaron –en el decenio de los cincuentas– el bombeo como la causa del hundimiento se clausuraron los pozos del centro de la ciudad y se perforaron nuevos en el área de Xochimilco y eventualmente en la subcuenca de Chalco. Por otra parte, en 1953 se inició la *importación* de agua desde la cuenca vecina del Lerma. En el capítulo 2, se hace una descripción más detallada de la evolución del abastecimiento y los problemas asociados.

1.7. Evolución poblacional y urbana

Se ha encontrado evidencia de la presencia del hombre en la cuenca de México desde 25,000 años a.C., y de asentamientos humanos desde 5,000 a.C.[15] El clima y la abundancia de agua dulce de manantiales, de caza, pesca y aves acuáticas, deben haber hecho del valle un lugar atractivo para el hombre primitivo. Al final de la época del Pleistoceno, por la extinción de muchos animales de caza, la cultura tuvo que cambiar; ya en el tercer milenio a.C., se cultivaban elotes y maíz, y se usaban productos de cerámica.[15] Justo antes de Cristo, la población de la cuenca se concentró en Teotihuacán (Fig.1.2); esta ciudad empezó a crecer rápidamente, y even-

tualmente llegó a tener una población estimada de 60,000 habitantes.[16] Siglos antes de la llegada de los aztecas a la cuenca, Teotihuacán había sido abandonada, pero la población total del valle continuó creciendo consistentemente. Después de la caída de Tula –localizada en el valle de Tula–, al fin del siglo XII, muchos centros de la cuenca comenzaron a crecer, y en la mitad meridional del valle cinco o seis de ellos tenían más de 5,000 habitantes.

En el tiempo de la Conquista española, la población de la cuenca había crecido hasta aproximadamente un millón;de éstos, unos 200,000 a 300,000 vivían en la ciudad capital México-Tenochtitlán, cifra superior a cualquier ciudad española de esa época (Fig. 1.8). La caída de México-Tenochtitlán, en 1521, y la ocupación de los españoles, tuvieron un efecto desastroso en la población nativa en el valle y en todo el país, que declinó precipitadamente; las causas principales fueron: a) enfermedades; b) trabajos forzados en minas, construcción y haciendas; y, c) las batallas de la conquista. Pasarían unos 400 años para que la población alcanzara nuevamente el nivel precortesiano.

Así, hasta principios del siglo XX la ciudad de México creció modestamente (Fig. 1.8). Según las coyunturas políticas, el crecimiento disminuyó o se estancó, o bien se expandió, pero siempre de una manera moderada. Es a partir de 1920 –y especialmente a partir de la consolidación de los gobiernos emergentes de la Revolución Mexicana–, que el crecimiento de la ciudad se dinamiza. Este crecimiento –notable– de la ciudad de México, se produce en paralelo con un, hasta hoy, ininterrumpido periodo de paz, que ha generado progreso en todo el país, aunque en ella el crecimiento ha sido más acentuado. Al cabo de siete décadas, el conglomerado urbano alcanza una expansión territorial y demográfica sin precedentes: de contar con 400 mil habitantes en 1910, para 1990 el espacio metropolitano sumaba alrededor de 15 millones de personas, en una superficie de 3,773 km^2; se ha pasado de una densidad demográfica de 782 habitantes por km^2, en 1950, a otra de 3,976 habitantes por km^2 en 1990 (Tabla 1.2).

Hasta 1940 el crecimiento urbano de la ciudad de México, se irradió sobre el

TABLA 1.2
POBLACIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO
(1742-1990)

Año	*Número de habitantes*
1742	101,000
1803	138,000
1900	345,000
1910	400,000
1930	1'000,000
1950	2'952,199
1960	5'125,437
1970	8'882,882
1980	13'873,912
1990	14'987,000

FIGURA 1.8

CRECIMIENTO DE LA ZMVM, 1940-1990



1521

POBLACION APROXIMADA = 30 000 Hab.



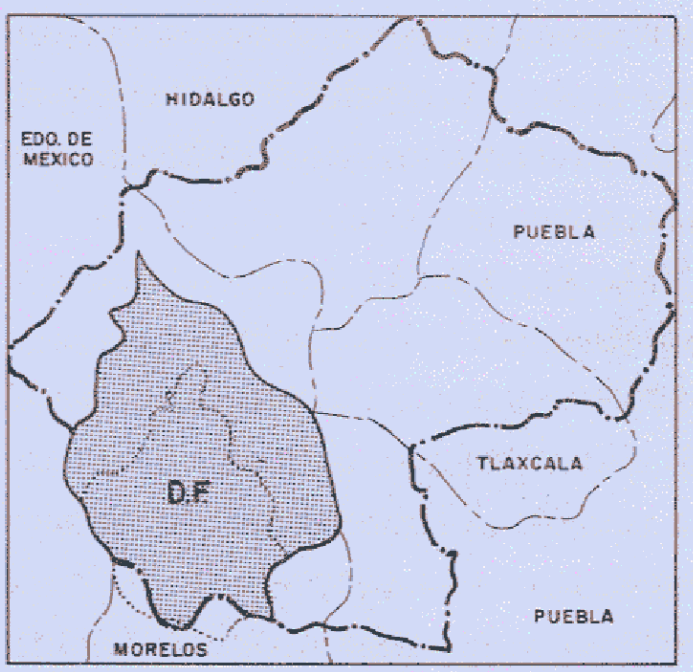
1800

POBLACION APROXIMADA = 137 000 Hab.



1940

POBLACION APROXIMADA = 1 760 000 Hab.



1990

POBLACION APROXIMADA = 15 000 000 Hab.

SIMBOLOGIA

Parteaguas de la Cuenca del Valle de México

Límite estatal

área oeste y noroeste, y hacia el sur, sobre los ejes del Paseo de la Reforma con dirección de Tacuba o Tacubaya, y sobre la avenida de los Insurgentes, respectivamente. La ciudad "tenía aún ciertas características compactas, con un centro comercial único".[17] El crecimiento poblacional y urbano que desató la acelerada industrialización que tuvo lugar en ella determinaron, sin embargo, que la expansión de la mancha urbana se proyectara fuera del núcleo compacto inicial (Fig. 1.8). El crecimiento físico se orientó fundamentalmente hacia el norte, en donde se asentó la zona industrial.

El crecimiento más moderado que se registró en esa época hacia el sur y el sureste atendió, sobre todo, la construcción de viviendas. Este proceso de crecimiento favorecería el surgimiento de subcentros urbanos en detrimento del antiguo centro de la ciudad de México.

La emergencia de estos subcentros —por ejemplo, Ciudad Satélite— aceleraría el proceso de ensanchamiento urbano al actuar como polos de extensión de la mancha urbana; el fenómeno de progresiva pérdida de relevancia económica del viejo centro de la ciudad dio cuenta del agotamiento del crecimiento de este núcleo tradicional debido a su alta densidad poblacional y a sus servicios deficitarios. Aunque el antiguo centro se conservó como base de las actividades políticas y administrativas, un importante sector del centro histórico: el de sus barrios más modestos, se degradó progresivamente hasta transformarse en zona de tugurios.

Desde finales de los años cincuenta la expansión demográfica urbana trascendió los límites políticos del DF, intensificándose en sus ritmos de crecimiento y proyectándose hacia los municipios conurbados del Estado de México.

La expansión urbana va dando origen, al término de los años cincuenta, a una subregionalización especializada, tanto demográfica como económicamente: fraccionamientos y zonas industriales emergen en el norte (Vallejo y Naucalpan); barrios residenciales al sur (Pedregal de San Ángel); colonias populares al norte y noreste; conjuntos habitacionales de sectores medios en el noroeste (Ciudad Satélite); "ciudades perdidas" en una dispar distribución espacial pero con predominio en el noreste, sureste y centro-este; áreas de comercios, negocios y oficinas sobre el eje de la avenida Insurgentes (desde Nonoalco hasta San Ángel) y en años más recientes en zonas localizadas como Chapultepec-Polanco y Santa Fe.

Entre 1940 y 1960, la ciudad ovoidal cobró amplitud, alcanzando, en semicírculo, hacia el norte la Villa de Guadalupe, Azcapotzalco y Tacuba; penetrando por el sur —a lo largo de los ejes de Insurgentes Sur y la calzada de Tlalpan—, hacia Ixtacalco e Iztapalapa al este, Tacubaya y San Ángel al suroeste, y Coyoacán al sur.[15]

Algunos autores (por ejemplo, Delgadillo),[18] incluyen en la ZMVM, además de las 16 delegaciones del Distrito Federal, a 27 municipios conurbados del Estado de México, con un área de 3,149 km^2 y un municipio del estado de Hidalgo con 92.5 km^2. Cuando se adopta este punto de vista, la extensión político-administrativa de la ZMVM resulta ser de 4,720.5 km^2 —aproximadamente la mitad de la cuenca del Valle de México— aunque "en un sentido estricto, la mancha humana continua abarca sólo 1,350 km^2, que representan el 16.7% del total de dicha región".[18] Gustavo Garza y Adolfo Sánchez Almanza,[19,20] utilizando el punto de vista anterior, dividen en 4 etapas al crecimiento poblacional de la ciudad de México:

Primera etapa (1890-1930). Crecimiento del núcleo central. En esta etapa el núcleo central coincidente con el espacio denominado ciudad de México que comprende las actuales delegaciones de Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza observó un crecimiento demográfico rápido que permitió su consolidación. El 98% de la población residente en el área urbana en 1930 se encontraba dentro de los límites de la ciudad de México y sólo un 2% estaba ubicado en las delegaciones de Coyoacán y Azcapotzalco.

Segunda etapa (1930-1950). Expansión periférica. En esta etapa el crecimiento de la población se combinó con el inicio de la expansión urbana hacia la periferia por la descentralización del comercio, los servicios y la población estimulada por el impulso de la industrialización.

El dinámico proceso industrial tuvo como correlato una acelerada urbanización que, a su vez, estimuló el crecimiento demográfico. La mancha urbana se expandió hacia la periferia de la ciudad central, la cual, a diferencia del periodo anterior, redujo su población, del 98% respecto del total urbano en 1930, al 78.3% en 1950.[20]

Tercera etapa (1950-1980). Metropolización. Etapa en la que el explosivo crecimiento de la población se articula al proceso de metropolización, dando cuenta de la expansión territorial de la ciudad de México hacia los municipios suburbanos del Estado de México (Tablas 1.3 y 1.4). En 1950, Tlalnepantla se incorpora a la ZMVM; en 1960, lo hacen los municipios de Ecatepec, Naucalpan y Chimalhuacán; entre 1960 y 1970, se agregan otros siete municipios y, en 1980, ocho municipios más: Chalco, Chiautla, Chicolapan, Chiconcuac, Ixtapaluca, Nicolás Romero, Tecámac y Texcoco.

La integración de dichos municipios a la dinámica de la metropolización se dio sobre la base de una división funcional del espacio: Naucalpan, Ecatepec y Tlalnepantla, al norte del Distrito Federal, se orientaron a la actividad industrial, mientras que, en términos generales, Cuautitlán, Nezahualcóyotl, Tultitlán, Coacalco,

TABLA 1.3

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO:

POBLACIÓN RELATIVA Y TASA DE CRECIMIENTO MEDIO ANUAL, 1950, 1970 Y 1990

Estado y municipio		*Población relativa (%)*			*Tasa media de crecimiento anual*[1]	
Clave o delegación		*1950*	*1970*	*1990*	*1950-1970*	*1970-1990*
	ZMVM	100.0	100.0	100.0	5.06	2.60
09000	Distrito Federal	90.7	76.1	54.6	4.15	0.91
09001	Álvaro Obregón	2.8	5.1	4.3	8.27	1.72
09002	Azcapotzalco	5.6	5.9	3.1	5.37	-0.59
09003	Benito Juárez	10.6	6.7	2.7	2.68	-1.96
09004	Coyoacán	2.1	3.8	4.2	8.21	3.22
09005	Cuajimalpa	0.3	0.4	0.8	6.82	6.16
09006	Cuauhtémoc	31.3	10.3	3.9	-0.64	-2.19
09007	Gustavo A. Madero	6.1	13.1	8.4	9.18	0.33
09008	Iztacalco	1.0	5.3	3.0	14.13	-0.31
09009	Iztapalapa	2.3	5.8	9.9	10.07	5.39
09010	Magdalena Contreras	0.7	0.8	1.3	6.37	4.86
09011	Miguel Hidalgo	13.5	7.2	2.7	1.79	-2.30
09012	Milpa Alta	0.5	0.4	0.4	3.12	3.23
09013	Tláhuac	0.6	0.7	1.4	5.99	6.17
09014	Tlalpan	1.0	1.4	3.2	7.16	6.77
09015	Venustiano Carranza	11.0	8.0	3.4	3.41	-1.63
09016	Xochimilco	1.4	1.3	1.8	4.63	4.31
15000	Estado de México (30 municipios)	9.3	23.9	45.4	10.14	5.94
15002	Acolman	0.3	0.2	0.3	4.08	3.69
15011	Atenco*	0.2	0.1	0.1	3.41	3.52
15013	Atizapán de Zaragoza	0.1	0.5	2.1	11.72	10.31
15020	Coacalco	0.1	0.1	1.0	9.09	13.00
15024	Cuautitlán	0.4	0.5	0.3	5.68	0.86
15025	Chalco	0.7	0.5	1.9	3.20	10.08
15028	Chiautla	0.1	0.1	0.1	3.20	3.61

TABLA 1.3 (CONT.)

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO:

POBLACIÓN RELATIVA Y TASA DE CRECIMIENTO MEDIO ANUAL, 1950, 1970 Y 1990

Estado y municipio		*Población relativa (%)*			*Tasa media de crecimiento anual*[1]	
Clave o delegación		*1950*	*1970*	*1990*	*1950-1970*	*1970-1990*
15029	Chicoloapan	0.1	0.1	0.4	5.11	9.85
15030	Chiconcuac	0.1	0.1	0.1	3.15	2.65
15031	Chimalhuacán	0.4	0.2	1.6	2.16	13.30
15033	Ecatepec	0.5	2.4	8.1	14.19	9.02
15037	Huixquilucan	0.4	0.4	0.9	4.66	7.09
15039	Ixtapaluca	0.3	0.4	0.9	6.32	6.82
15044	Jaltenco*	0.1	0.1	0.2	2.73	8.17
15053	Melchor Ocampo*	0.1	0.1	0.2	4.02	4.51
15057	Naucalpan	0.9	4.2	5.2	13.59	3.67
15058	Nezahualcóyotl	0.0	6.4	8.3	--	3.94
15059	Nextlalpan*	0.1	0.0	0.1	2.60	4.66
15060	Nicolás Romero	0.7	0.5	1.2	3.62	7.01
15070	Paz, La	0.1	0.4	0.9	10.74	7.41
15081	Tecamac	0.3	0.2	0.8	4.24	9.28
15091	Teoloyucan*	0.2	0.2	0.3	3.73	5.11
15095	Tepotzotlán	0.3	0.2	0.3	3.65	3.01
15099	Texcoco	1.0	0.7	0.9	3.61	3.87
15100	Tezoyuca	0.1	0.1	0.1	3.22	4.90
15104	Tlalnepantla	0.9	4.1	4.7	13.53	3.30
15108	Tultepec*	0.2	0.1	0.3	3.73	7.34
15109	Tultitlán	0.3	0.6	1.6	9.06	8.06
15120	Zumpango*	0.5	0.4	0.5	3.69	3.47
15121	Cuautitlán Izcalli	--	--	2.2	--	--

[1] Calculada con periodos de 20 años exactos.

* Municipio próximo a la mancha urbana en transición a su integración física.

TABLA 1.4

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO: POBLACIÓN, SUPERFICIE Y DENSIDAD, 1950, 1970 Y 1990

		Población censal			*Superficie*[1]		*Densidad (hab./km²)*		
Clave	*Estado y municipio o delegación*	*1950*	*1970*	*1990*	*km²*	*%*	*1950*	*1970*	*1990*
	República Mexicana	25'778,160	48'225,238	81'140,923	1'967,183.0	--	13	25	41
	ZMVM	3'363,261	9'034,698	15'089,044	4,605.4	100.0	730	1,962	3,276
09000	*Distrito Federal*	3'050,442	6'874,165	8'235,744	1,499.1	32.6	2,035	4,586	5,494
09001	Álvaro Obregón	93,176	456,709	642,753	93.7	2.0	994	4,874	6,860
09002	Azcapotzalco	187,864	534,554	474,688	34.5	0.7	5,445	15,494	13,759
09003	Benito Juárez	356,923	605,962	407,811	28.0	0.6	12,747	21,642	14,565
09004	Coyoacán	70,005	339,446	640,066	59.2	1.3	1,183	5,734	10,812
09005	Cuajimalpa	9,676	36,200	119,669	72.9	1.6	133	497	1,642
09006	Cuauhtémoc	1'053,722	927,242	595,960	32.0	0.7	32,929	28,976	18,624
09007	Gustavo A. Madero	204,833	1'186,107	1'268,068	91.5	2.0	2,239	12,963	13,859
09008	Iztacalco	33,945	477,331	448,322	21.8	0.5	1,557	21,896	20,565
09009	Iztapalapa	76,621	522,095	1'490,499	124.5	2.7	615	4,194	11,972
09010	Magdalena Contreras	21,955	75,429	195,041	62.2	1.4	353	1,213	3,136
09011	Miguel Hidalgo	454,868	648,236	406,868	46.8	1.0	9,719	13,851	8,694
09012	Milpa Alta	18,212	33,694	63,654	268.6	5.8	68	125	237
09013	Tláhuac	19,511	62,419	206,700	88.4	1.9	221	706	2,338
09014	Tlalpan	32,767	130,719	484,866	309.7	6.7	106	422	1,566
09015	Venustiano Carranza	369,282	721,529	519,628	30.7	0.7	12,029	23,503	16,926
09016	Xochimilco	47,082	116,493	271,151	134.6	2.9	350	865	2,014
15000	*Estado de México* (30 municipios)	312,819	2'160,533	6'853,300	3,106.3	67.4	101	696	2,206
15002	Acolman	9,422	20,964	43,276	52.5	1.1	179	399	824
15011	Atenco*	5,424	10,616	21,219	139.7	3.0	39	76	152
15013	Atizapán de Zaragoza	4,827	44,322	315,192	75.0	1.6	64	591	4,203
15020	Coacalco	2,315	13,197	152,082	45.0	1.0	51	293	3,380

15024	Cuautitlán	13,622	41,156	48,858	75.0	1.6	182	549	651
15025	Chalco	22,056	41,450	282,940	273.6	5.9	81	151	1,034
15028	Chiautla	3,867	7,266	14,764	25.0	0.5	155	291	591
15029	Chicoloapan	3,229	8,750	57,306	63.7	1.4	51	137	900
15030	Chiconcuac	4,520	8,399	14,179	17.5	0.4	258	480	810
15031	Chimalhuacán	13,004	19,946	242,317	33.7	0.7	386	592	7,190
15033	Ecatepec	15,226	216,408	1'218,135	126.2	2.7	121	1,715	9,652
15037	Huhixquilucan	13,491	33,527	131,926	109.9	2.4	123	305	1,200
15039	Ixtapaluca	10,787	36,722	137,357	206.1	4.5	52	178	666
15044	Jaltenco*	2,767	4,738	22,803	38.7	0.8	71	122	589
15053	Melchor Ocampo*	4,928	10,834	26,154	32.5	0.7	152	333	805
15057	Naucalpan	29,876	382,184	786,551	154.9	3.4	193	2,467	5,078
15058	Nezahualcóyotl	--	580,436	1'256,115	(62.0)	--	--	9,362	20,260
15059	Nextlalpan*	2,611	4,360	10,840	50.0	1.1	52	87	217
15060	Nicolás Romero	23,346	47,504	184,134	206.1	4.5	113	230	893
15070	Paz, La	4,194	32,258	134,782	36.9	0.8	114	874	3,653
15081	Tecamac	9,104	20,882	123,218	137.4	3.0	66	152	897
15091	Teoloyucan*	7,446	15,477	41,964	35.0	0.8	213	442	1,199
15095	Tepotzotlán	10,703	21,902	39,647	241.1	5.2	44	91	164
15099	Texcoco	32,265	65,628	140,368	503.5	10.9	64	130	279
15100	Tezoyuca	2,532	4,770	12,416	17.5	0.4	145	273	709
15104	Tlalnepantla	29,005	366,935	702,807	82.5	1.8	352	4,448	8,519
15108	Tultepec*	5,517	11,480	47,323	22.5	0.5	245	510	2,103
15109	Tultitlán	9,237	52,317	246,464	96.2	2.1	96	544	2,562
15120	Zumpango*	17,498	36,105	71,413	208.6	4.5	84	173	342
15121	Cuautitlán Izcalli	--	--	326,750	(111.6)	--	--	--	2,928

[1] Secretaría de Industria y Comercio (SIC), Dirección General de Estadística (DGE), *IX Censo General de Población*, 1970, México 1972.

* Municipio próximo a la mancha urbana en transición a su integración física.

Chimalhuacán, Huixquilucan y La Paz, al noreste, atendieron sobre todo las necesidades habitacionales de la población en crecimiento.

Es interesante que el crecimiento urbano metropolitano sobre los municipios conurbados del Estado de México, se haya alimentado tanto de los flujos migratorios provenientes de otros estados, alejados de la cuenca de México, como del movimiento de desconcentración de la población expulsada del núcleo central, que buscó salir del congestionado Distrito Federal por razones diversas: el cambio del uso del suelo –de habitacional a comercial y de servicios– la insuficiente oferta de casas habitación, el deterioro de la calidad de vida, etcétera. Así, por ejemplo, el crecimiento demográfico de la metrópoli entre 1950 y 1960, tuvo una tasa promedio de un 10.3% anual, mientras que el del Distrito Federal observó un ritmo menor de sólo 2.4%. La importancia relativa de la población del DF en la ZMVM ha observado una disminución continua: fue de 90.7%,76.1% y 54.6%, en 1950, 1970 y 1990 respectivamente. En forma correlativa, la participación de los municipios conurbados ha crecido, habiendo sido respectivamente de 9.3%, 23.9% y 45.4%.

Cuarta etapa (1980–1990). Megalopolización. La tendencia de esta etapa es la disminución del ritmo de crecimiento demográfico en el DF, combinada con las altas tasas de crecimiento observadas en los municipios conurbados del área metropolitana que apuntan a una definida tendencia hacia la megalopolización –proceso de unión territorial de zonas metropolitanas en expansión física y demográfica–, al consolidarse las articulaciones regionales de la ZMVM, con Toluca y Cuernavaca.[19]

En el caso de las zonas metropolitanas de la ciudad de México y Toluca, se pueden integrar funcionalmente, por ejemplo, y de manera indistinta, al municipio de Huixquilucan: "En otras palabras, ambas zonas metropolitanas están unidas o se traslapan, y constituyen un conglomerado megalopolitano que surge a partir de 1980 y que, por ser la capital la urbe principal, se puede denominar "Megalópolis de la ciudad de México"[19] (Tabla 1.3).

La ocupación reciente del espacio. Para 1980, el crecimiento físico de la ciudad de México se había dado de una forma desordenada sobre un 50% de suelos de propiedad ejidal o comunal. La expansión de las últimas décadas atendió, fundamentalmente, más a una actitud especulativa sobre la tierra que a una política de planificación del uso del suelo.

En 1980, se calculaba la existencia de unas 500 "ciudades perdidas", las cuales contaban "con alrededor de 700 mil predios y un número calculado de 430 mil personas. El 60% de dichos predios se localizan en tierras de régimen comunal, el 30% ejidal y únicamente el 10%, en propiedad particular".[19]

En ese año las colonias populares cubrían casi el 4% del área urbana con una población cercana a los cuatro millones de personas. Los habitantes de estos núcleos urbanos y los de las "ciudades perdidas" integran el sector de los marginales urbanos: familias que no perciben salario mínimo[19] y en los que se ubica el problema del desempleo o subempleo, y la expansión de la denominada economía informal.

Son diversas las formas de oferta y/o de acceso al suelo. Éstas comprenden desde el fraccionamiento y venta legal de superficies, hasta modalidades irregulares o ilegales. Dentro de las primeras predomina el fraccionamiento de propiedades privadas, sin embargo, esto no excluye otro tipo de tenencia de la tierra, como las comunales y ejidales. "Algunas de ellas –señala la especialista Martha Schteingart– han surgido a partir de las permutas, otras a través de expropiaciones y un tercer grupo por medio de procedimientos que no están regidos por la ley".[21]

De otro lado se encuentran los mecanismos ilegales de acceso al espacio, que pueden clasificarse, en términos generales, en dos grandes grupos: "las 'invasiones' u ocupación directa del suelo –que configuran lo que se ha denominado 'colonias de paracaidistas'– y la ocupación a través de un propietario reconocido –que origina los fraccionamientos clandestinos o irregulares".[21] En este último caso, la persona o compañía que fracciona y vende lotes, actúa en calidad de propietario, aunque carezca de propiedad jurídica sobre el área en venta, lo que da origen a la situación irregular o ilegal del fraccionamiento, el cual puede estar ubicado en terrenos ejidales o comunitarios.

Con relación a la población, es preciso señalar que los flujos migratorios –población que nació en una entidad distinta de la que reside– han tenido un peso significativo en la ZMVM. En 1986, la población migrante representaba el 24.6% del total de la población residente en la ZMVM, lo que equivale a uno de cada cuatro habitantes. Aunque la ZMVM acoge a población migrante de diferentes entidades de la república, el mayor volumen de inmigrantes proviene de estados próximos o cercanos a ella. Entre éstos destacan el Estado de México, que aportó el 13.4% del total de la población migrante; Puebla y Michoacán, con un 9.8%; Guanajuato, con 9.5%; Oaxaca, con 9.2%; Hidalgo, con 9.1%; Veracruz, 7.8% y Guerrero, 4.6%. En su conjunto, éstas ocho entidades aportaron el 73.2% del total de la inmigración a la ZMVM, en el decenio de los ochenta.[20]

El mayor volumen de inmigrantes es de origen rural, del total de este sector, un 78.6% provino de localidades con menos de 15,000 habitantes y, el 21.4% de ciudades medias y otros centros urbanos.

Tendencias más significativas de la ocupación del espacio y la demografía. 1) La tendencia manifiesta en los años

recientes respecto al crecimiento poblacional del DF es de decrecimiento. La explicación de este fenómeno es principalmente el descenso de la inmigración neta y, en cierta medida, la disminución de la fecundidad.

Mientras que la tendencia a la baja que observan las tasas de fecundidad promedio, a nivel nacional es un proceso claramente demarcado desde los años setenta, el comportamiento de los movimientos migratorios responde a situaciones más complejas "que reflejan causas estructurales de atracción o rechazo, que motivan a un alto número de inmigrantes a escoger como destino preferente los municipios suburbanos de otras regiones y ciudades medias".[17]

En términos generales pueden señalarse como factores de atracción de flujo migratorio a la ZMVM en su conjunto y en los últimos años, elementos tradicionales como el acceso al suelo y a la vivienda, la oportunidad de empleo e ingresos más altos, oferta de servicios más económicos, etcétera.

Como factores de rechazo están la saturación del espacio físico, el cambio de uso del suelo de urbano habitacional a comercial y de servicios, la oferta insuficiente de servicios públicos –transporte, agua potable, etcétera– la reducción significativa del empleo formal, notoria en los últimos años, o el deterioro de la calidad de la vida y del ambiente.

De esta manera se observa el fenómeno de expulsión-rechazo de población en las delegaciones centrales del DF en favor de un acelerado crecimiento demográfico en municipios suburbanos como Chalco, Coacalco, Atizapán de Zaragoza y Chimalhuacán, todos ellos con tasas de incremento poblacional superiores al 10% anual. En contraste, delegaciones del DF como Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Iztacalco y Azcapotzalco, manifiestan un decrecimiento relativo en el periodo 1970-1990 (Tabla 1.3). La delegación Miguel Hidalgo disminuyó, por ejemplo, su tasa media de crecimiento anual de 1.7%, en el periodo 1950-1970, a menos de 2.3% en 1970-1990 y la Venustiano Carranza bajó, en ese mismo lapso, su tasa de 3.41% a menos de 1.63%.

La población del Distrito Federal se redujo en los años ochenta, en términos absolutos y relativos, a causa del proceso de desconcentración demográfica hacia los municipios conurbados del Estado de México y ciudades medias del interior de la república. De concentrar el 90.7% de la población total de la ZMVM en 1950, el DF redujo su participación al 54.6% en 1990. A consecuencia de este proceso, la tasa promedio de crecimiento poblacional anual disminuyó de 4.15% en el periodo 1950-1970, a 0.91% en 1970-1980, observando en 1980-1990 un crecimiento negativo del 0.68%.

Así, la nueva modalidad del crecimiento de la periferia conurbada tiene lugar de manera simultánea a la desaceleración del crecimiento de la ciudad central, en lo que se ha denominado "proceso de periferización de la ciudad de México".

2) Otra tendencia interesante se distingue en el área correspondiente a las delegaciones del suroeste del DF: Tláhuac, Magdalena Contreras y Tlalpan. Éstas mantuvieron una baja densidad demográfica hasta 1960, a partir de ese decenio experimentaron una afluencia poblacional significativa. Mientras que la densidad demográfica de la delegación de Tlalpan era de 106 habitantes por km^2 en 1950, se elevó a 1,566 en 1990. Contreras observó una elevación de 353 a 3,136 habitantes por km^2, en ese mismo periodo, y Tláhuac de 221 a 2,338 personas por km^2 (Tabla 1.3).

3) En un nivel por ahora hipotético, algunos especialistas apuntan la tendencia a la refuncionalización de la ciudad de México que se explica por las características de la economía nacional en los últimos años. En la ZMVM se ha registrado una pérdida –absoluta y relativa– de empleos en los sectores manufactureros tradicionales; las razones son diversas: la recesión, el ajuste económico y el proceso de reestructuración productiva en curso, entre otras. En contraste, las actividades de servicios –turismo, informática, comercio, etcétera– y el llamado sector informal de la economía, han crecido en importancia como fuente de trabajo.

Desde esta perspectiva, los estudiosos afirman que el crecimiento demográfico urbano periférico "es cada vez menos el resultado de la presión demográfica por migraciones y más el fruto de una reestructuración interna, tanto desde una perspectiva de renta del suelo y de redistribución de usos urbanos, como por presiones demográficas ejercidas por el excedente interno de población urbana, o sea, la presión de las nuevas generaciones para la ocupación del suelo".[22]

4) El proceso de poblamiento periférico se ha desarrollado de una manera diferencial en el uso del suelo; mientras que una parte de la urbanización y el poblamiento ha tenido lugar de una manera relativamente planificada –dando origen a colonias y barrios residenciales y de clase media– de otra parte la expansión demográfica reciente de municipios como Chalco, Ixtapaluca o Santa María Chimalhuacán, en el centro-este y sureste de la ZMVM, respondió a un patrón desordenado impulsado por fraccionadores clandestinos –particulares o ejidatarios– que ha dado lugar a los "modelos urbanísticos de la pobreza"[22] y que presentan en algunos casos, agudas carencias sociourbanas –en servicios, centros para el ocio y la recreación colectivos, centros de actividad comercial, etcétera.

La respuesta de las autoridades a este fenómeno de urbanización, generalmente ilegal, tiende "a respetar los modelos de

regularización-apropiación del suelo vigentes en los años sesenta y setenta";[22] esto es, la intervención del Estado, primero para regularizar la ocupación del suelo, que surge de una actividad irregular e ilegal, y después para dotarlo de servicios. De hecho, la intervención del Estado tiene dos características principales –afirma Hiernaux: permitir la desincorporación de tierras ejidales, por los usufructuarios de las mismas o por fraccionadores, como forma de transformar tierra rural en suelo urbano y, "regularizar" y dotar de servicios– lo que de paso avala o legaliza el proceso previo de ocupación del espacio".[22]

De esta manera, la institucionalización de los procedimientos para regularizar la propiedad, a través de Corett (Comisión para la Regularización de la Tenencia de la Tierra, organismo dependiente del secretario de la Reforma Agraria), mediante la expropiación de tierras agrarias, opera como un estímulo para su fraccionamiento ilegal.[23] Tan sólo en el periodo 1983-1988, Corett realizó 29 expropiaciones para regularización, que abarcaron una superficie total de 3,323.9 ha, en tres delegaciones del DF –Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Coyoacán– y doce municipios del Estado de México.

5) La fuente principal de oferta de suelo barato para sectores populares en la ZMVM, está representada hoy en día por las tierras ejidales y de propiedad comunal. La urbanización popular se desplazó en el último decenio de la zona oriente –correspondiente al ex lago de Texcoco– a la región del sureste del DF, sobre todo en la delegación de Iztapalapa y en los municipios de Chalco –Ixtapaluca y Chicoloapan.

Referencias

1. Lozano-García, M.S. y Ortega-Guerrero, B., "Palynological and Paleomagnetic susceptibility records of Lake Chalco, Central México, en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: pp. 177-191, 1994.
2. Lozano-García, M.S., "Palinología y paleoambientes pleistocénicos de la cuenca de México", en *Geofísica Internacional*, Ismael Herrera (ed.), 28(2), pp. 335-362, 1989.
3. Lozano-García, M.S., Ortega-Guerrero, B., Caballero-Miranda, M. y Urrutia-Fucugauchi, J., "Late Pleistocene and Holocene palaeoenvironments of Chalco lake, Central Mexico", en *Quaternary Research*, núm. 40, pp. 332-342, 1993.
4. DDF-DGCOH, *Manual de Hidráulica Urbana*, 3 t., México, septiembre, 1982.
5. DDF, Secretaría General de Obras y Servicios, DGCOH, *El Sistema Hidráulico del Distrito Federal. Un servicio público en transición*, Guerrero Villalobos, G., Moreno Fernández, A., Garduño Velasco, H., (eds.), México, 1982.
6. Durazo, J. y Farvolden, R. N.,"The Groundwater regime of the Valley of Mexico from Historic Evidence and Field Observations", *Journal of Hydrology*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, núm. 112, pp. 171-190, 1989.
7. Díaz del Castillo, B., *Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España*, Porrúa, México, 1632, 317 pp.
8. León-Portilla, M., *La visión de los vencidos*, Biblioteca del Estudiante Universitario, UNAM, 1987, México, 220 pp.
9. Toussaint, M., Gómez de Orozco F. y Fernández, J., *Planos de la ciudad de México. Siglos XVI y XVII*, UNAM, Instituto de Investigaciones Estéticas, México, 1936, 200 pp.

10. León-Portilla, M., *La filosofía náhuatl,* UNAM, Instituto de Investigaciones Históricas, 1983, 411 pp.
11. Bribiesca-Castrejón, J. L.,"Hidrología histórica del Valle de México", en *Ingeniería Hidraúlica en México,* 16 (3), pp. 43-61, México, 1960.
12. Palerm, A., *Obras hidraúlicas prehispánicas en el sistema lacustre del Valle de México,* SEP-INAH, México, 1973, 224 pp.
13. León-Portilla, M. y Aguilera C., *Mapa de México-Tenochtitlán y sus contornos hacia 1559,* Celanese Mexicana, México, 1986, 109 pp.
14. López-Austin, A., UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas, comunicación personal.
15. Serra-Puche, M. C., "El pasado una forma de acercanos al futuro, 25 000 años de asentamientos en la cuenca de México", en *Los problemas de la cuenca de México*, Kumate J. y Mazari, M. (eds.), El Colegio Nacional, México, 1990, pp. 3-29.
16. Millon, R., Drewitt B. y Cowgill G., "Urbanization at Teotihuacan, México, the Teotihuacan Map. Part one", University of Texas Press, Austin, 1973, en *Los problemas de la cuenca de México*, Kumate J. y Mazari, M. (eds.), El Colegio Nacional, México, 1990.
17. Peña, Eulalia, "El crecimiento desordenado de la ciudad de México", en *Zona metropolitana de la ciudad de México. Complejo geográfico, socioeconómico y político*, Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM-Departamento del Distrito Federal, México, 1993, pp. 88-102.
18. Delgadillo Macías, Javier, "Economía política del agua", en *Zona Metropolitana de la ciudad de México. Complejo geográfico, socioeconómico y político,* Ángel Bassols Batalla y Gloria Salazar (coords.), Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM-DDF, México, 1993, pp. 68-87.
19. Garza, Gustavo, "La problemática de la ciudad de México", en *Lecturas del Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo, (CEESTEM), El desarrollo urbano*, 1(3) 1981.
20. Sánchez Almanza, Adolfo, "Crecimiento y distribución territorial de la población de la zona metropolitana de la ciudad de México", en *Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Complejo geográfico, socioeconómica y político*, Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM-DDF, México, 1993, pp. 103-127.
21. Scheteingart, Martha, *Los productores del espacio habitable. Estado, empresa y sociedad en la ciudad de México*, El Colegio de México, México, 1989.
22. Nicolás, Daniel Hiernaux, "Ocupación del suelo y producción del espacio construido en el valle de Chalco", en

Espacio y vivienda en la ciudad de México, El Colegio de México, Centro de Estudios Geográficos y de Desarrollo Urbano, México 1978-1991, pp. 179-202.

23. Duhau, Emilio, "Urbanización popular y políticas de suelo en la ciudad de México", en Martha Schteingart (coords.), *Espacio y vivienda en la ciudad de México,* El Colegio de México, Centro de Estudios Geográficos y de Desarrollo Urbano, México, 1991, pp. 139-160.

CAPÍTULO 2
ABASTECIMIENTO Y DRENAJE

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. GENERALIDADES

La cuenca de México es un graben, que en condiciones naturales estaba cerrado hidrológicamente y cubierto por un sistema de lagos. La recarga del agua subterránea tiene lugar en las rocas volcánicas de las montañas que la rodean. Donde las rocas son visiblemente permeables, la superficie freática es profunda generalmente y el escurrimiento es pequeño. Gruesas capas de arcillas lacustres de baja permeabilidad cubren gran parte (alrededor del 25%) del suelo, y ahí las condiciones artesianas fueron prevalentes alguna vez. Los manantiales de agua potable abundaron en las márgenes del valle y en los lugares donde los acuíferos afloran. También existen manantiales termales alineados a lo largo de lo que se supone son fracturas de las rocas que subyacen a los rellenos aluviales. Todo el suelo y las pendientes más bajas de las montañas fueron zonas de descarga del agua subterránea. Siendo el valle una cuenca cerrada su única salida de agua era por evaporación y transpiración, por lo que las sales se acumularon en las arcillas y en los lagos, particularmente en el de Texcoco. Los lagos principales no han sido potables y tanto los aztecas como posteriormente los españoles, tomaban su agua de los manantiales.

La fuerte explotación de agua subterránea y el drenado artificial del valle debido a las obras realizadas desde la época colonial, han provocado una fuerte declinación del nivel piezométrico en el acuífero por lo que casi todos los manantiales se han secado. La mayor parte de las corrientes que bajan de las montañas son cortas e intermitentes; pocas de ellas se utilizan para el suministro de agua. Los caudales de las que corren hacia fuera, a las cuencas vecinas, cobran importancia solamente a gran distancia de la ciudad y a altitudes mucho menores. Por estas

razones el agua superficial es una fuente excesivamente costosa, y el agua subterránea de los acuíferos del propio valle es una alternativa atractiva y ampliamente utilizada. El 71.3% del gasto suministrado en la actualidad proviene de esta fuente; en cambio, la contribución del agua superficial que se origina en el propio valle es insignificante, de solamente 2.3%.

El agua subterránea almacenada en el subsuelo es abundante y bastaría para mantener el suministro al ritmo actual durante muchos años, pero existen factores que limitan severamente las posibilidades de su utilización. El más restrictivo es el hundimiento del terreno, inducido por la explotación del acuífero, pues ha producido muchos problemas en las cimentaciones de edificios grandes y de muchas otras obras civiles costosas. La causa del hundimiento es la alta compresibilidad de las arcillas lacustres que recubren el valle y cuyo volumen se reduce a medida que se explota el acuífero.

Debido a estas limitaciones, las fuentes internas al valle, tanto superficiales como subterráneas, son insuficientes para satifacer la creciente demanda asociada al rápido aumento de la población, por lo que ha sido necesario recurrir a otras opciones, a pesar de su alto costo, particularmente a la importación de agua de otras cuencas; de éstas proviene en la actualidad un poco más del 26.4% del volumen suministrado. Sin embargo, debido a las grandes distancias y a la diferencia de alturas de las fuentes potenciales, ampliar el suministro al ritmo del crecimiento de la población implica grandes problemas. Por una parte los costos económicos son demasiado elevados, por otra también los sociales y políticos, pues la importación de volúmenes de otras cuencas va en detrimento de las poblaciones que habitan en ellas.

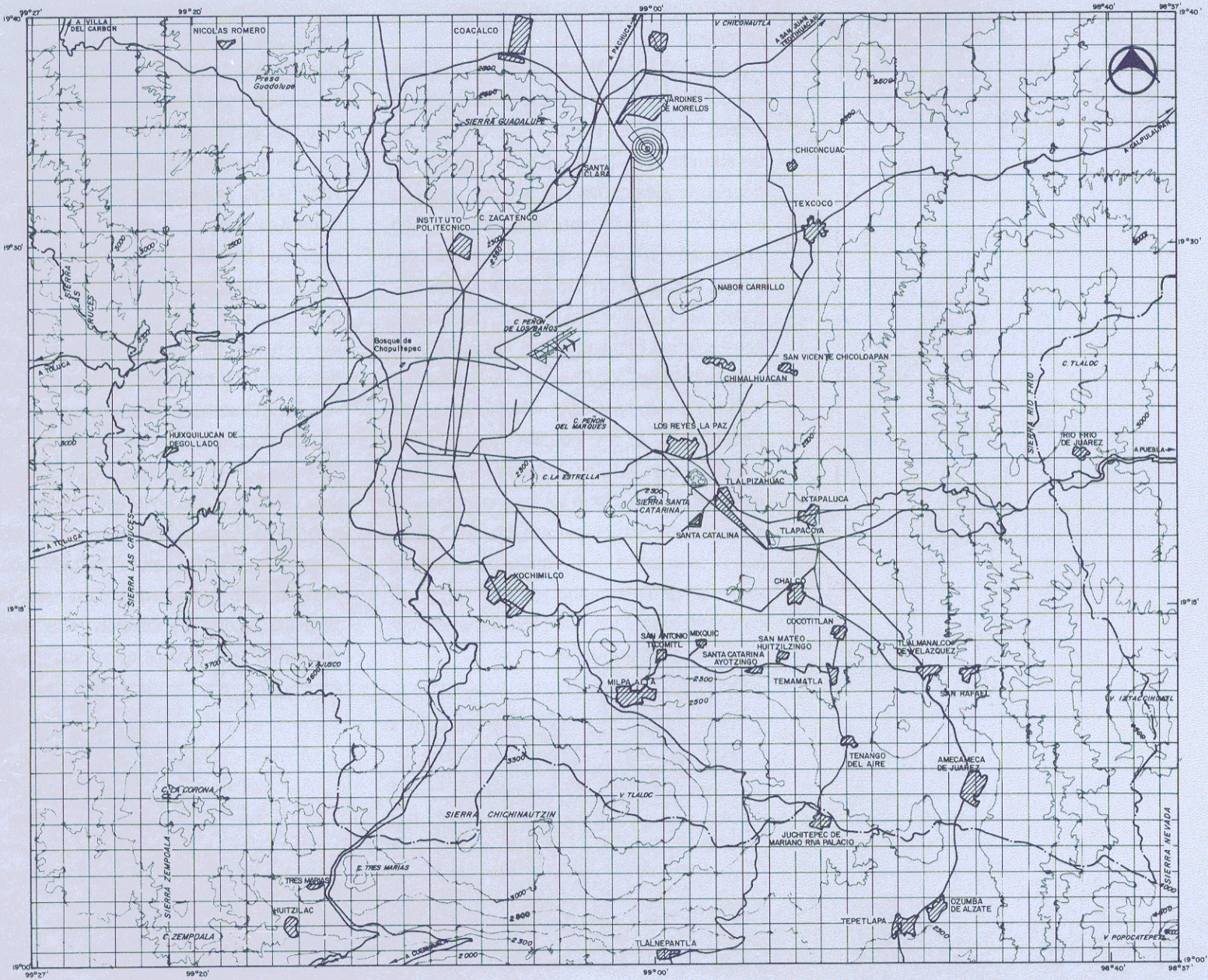
2.1.2. Obras hidráulicas

Cuando llegaron los españoles, en el Valle de México existía un gran lago, y la capital del imperio azteca, Tenochtitlán, estaba asentada en una isla, por lo que Hernán Cortés utilizó una flotilla de pequeños barcos para su conquista, culminada en 1521. El gran lago que existía cuando llegaron los españoles estaba formado por un sistema de lagos más pequeños (Fig. 2.1.1), que evacuaban sus aguas en la dirección del lago de Texcoco, que era salado. La extensión de esta zona lacustre era de aproximadamente 1,200 km^2. Los lagos eran relativamente independientes entre sí, excepto en periodos de precipitaciones muy intensas, cuando los más elevados se conectaban con el lago de Texcoco. La tabla 2.1.1 resume las características principales de estos lagos.

En la actualidad, de dicho gran lago no subsisten más que restos pequeños, como el lago de Texcoco y los diminutos lagos de Míxquic y Xochimilco. En realidad, lo que fue el lago de Texcoco ha sido sustituido por un grupo de pequeños lagos artificiales que funcionan como vaso regulador, por lo que a su volumen le afecta una fuerte variación esta-

FIGURA 2.1.1

MAPA TOPOGRÁFICO





SIMBOLOGIA

- POBLADO
- VIA DE COMUNICACION PAVIMENTADA
- PARTEAGUAS DE LA CUENCA DE MEXICO
- CURVAS DE NIVEL ACOTADAS EN m.s.n.m. — 2300
- AEROPUERTO
- CANAL

NOTAS:

LA BASE TOPOGRAFICA Y LA CUADRICULA UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR ESTÁN ADAPTADAS DE LAS CARTAS DEL INEGI, ESCALA 1:50,000

ESCALA 1:282,885

0 2 4 6 8 10

KILOMETROS

cional: durante la época de lluvias (mayo a octubre) aumenta considerablemente, y en la temporada de estiaje (noviembre a abril) se reduce.

En el Valle de México florecieron diversas civilizaciones, como la teotihuacana y la azteca, las cuales contaban con manantiales abundantes. Hasta antes de la Independencia de México las poblaciones del valle se surtieron exclusivamente de las aguas provenientes de ellos, a las cuales en ocasiones conducían desde puntos lejanos por medio de acueductos. Los de Texcoco se abastecían del manantial de Atexcoac y de algunos otros, localizados en los cerros Tláloc,mediante obras construidas por Nezahualcóyotl: rey, poeta e ingeniero. Coyoacán se surtía de los manantiales de Acuecuéxcatl; Tenochtitlán tomaba las aguas de algunos manantiales que surgían en la propia isla y en tiempos de Chimalpopoca, con la anuencia de Tezozómoc, rey de Azcapotzalco, construyeron un acueducto desde los manantiales de Chapultepec.

En la época de la Conquista española y durante la Colonia, los problemas principales relacionados con el agua eran la protección de las islas contra las inundaciones, el aprovisionamiento de agua potable y la separación de las aguas salobres de las aguas dulces. El objetivo de algunas de las obras más destacadas fue asegurar el aprovisionamiento del vital líquido. Tales son los casos del Acueducto de Epazoyuca, construido por los frailes agustinos en 1568, con una longitud de 15 km, y del Santuario de Guadalupe, que conducía las aguas desde el río Tlalnepantla. Sin embargo, los acueductos más notables fueron el de Otumba y el de Arcos de El Sitio.

El de Otumba se construyó para dotar de agua a esta población desde unos manantiales ubicados en la falda del cerro Tecajete, cerca de Zempoala. Su longitud es de 45 km, y atraviesa cerros, barrancas y valles. La obra empezó en 1554 y terminó en 1571. Los padres jesuitas construyeron un acueducto para abastecer a la población y a la "casa de probación" (seminario), que tenían en Tepo-

TABLA 2.1.1

LAGOS PRECORTESIANOS Y SUS PROFUNDIDADES

Lago	*Superficie* (km^2)	*Profundidad media* (m)	*Altura sobre Texcoco*
Chalco	114	2.0	3.0
Xochimilco	63	2.1	3.1
Texcoco	238	1.8	0.0
México	90	2.0	1.0
Xaltocan	121	0.4	3.5
Zumpango	26	0.6	6.1

zotlán. Este acueducto conducía las aguas de los manantiales de Magú y atravesaba la hacienda de El Sitio, de donde tomó su nombre.

Para luchar contra las inundaciones, que se producían durante la estación de lluvias, los aztecas construyeron diques, entre éstos se distingue el dique de Nezahualcóyotl, que se extendía en dirección de norte a sur. Cuando después de la Conquista los españoles se percataron de que la ciudad de México, capital de la Nueva España, sufría de graves y frecuentes inundaciones, intentaron dos maneras de solucionar este problema. Por una parte, reforzaron los antiguos diques de los aztecas y, por la otra, emprendieron acciones para reducir los lagos. Por varias razones, principalmente políticas, se dio preferencia a estas últimas, y paulatinamente fueron secando los lagos.

Entre las obras realizadas antes de la Independencia de México, destacan un dique o muro de 16 km al oeste de Tenochtitlán, construido en 1450 por los aztecas. Posteriormente los españoles, en 1607, construyeron el Tajo de Nochistongo, que cruza la sierra en el noroeste, pero que no funcionó bien, por lo que se continuó trabajando en esta obra y fue hasta 1767 cuando se logró evacuar las aguas del río Cuautitlán, por medio de dicho Tajo de Nochistongo. Ésta fue la primera salida artificial para las aguas del valle.

Después de la Independencia de México continuaron los mismos problemas; hay informes de que en 1856 las inundaciones en la ciudad de México eran cada vez más alarmantes. En 1900 se inauguraron el Gran Canal del Drenaje y el túnel de Tequixquiac, cuyas salidas están en el noroeste. En 1940 se construyó el segundo túnel de Tequixquiac.

La consolidación de las arcillas que recubren el valle y que induce grandes hundimientos del suelo, se produce tanto por la explotación de los acuíferos como por la desecación del valle. La explotación de los acuíferos se inició a mediados del siglo pasado, mientras que la desecación del valle ha sido continua desde principios del periodo colonial. El hundimiento se agudizó durante el presente siglo, debido principalmente al gran aumento habido en el bombeo de las aguas del subsuelo y a obras como el segundo túnel de Tequixquiac, que han acelerado la desecación del valle. El Gran Canal del Desagüe resultó afectado y tuvo problemas en su funcionamiento. Esto se debió a la reducción de su pendiente, la cual fue sucesivamente de 19 cm/km, 12 cm/km, 10 cm/km y 0 cm/km, en 1910, 1950, 1970 y 1980, respectivamente. Este problema y la necesidad de evitar las inundaciones motivaron la construcción del "Sistema de Drenaje Profundo", que se inauguró en 1975. Este sistema se localiza a profundidades que varían entre 22 y 217 m, y ha resuelto de manera hasta ahora definitiva, el problema de las inundaciones periódicas de la ZMVM.

2.1.3. El proyecto Texcoco

El lago de Texcoco es un vaso regulador, que en la estación de lluvias reúne los escurri-

mientos del oriente y del poniente del valle, y oportunamente los descarga en el Gran Canal. Antes del desarrollo del Plan Texcoco, cada año, entre febrero y abril, se producían grandes tormentas de polvo y detritos, conocidas como "tolvaneras", que azotaban la ZMVM. En 1971 se estimó que un 40% de ellas se originaba en la superficie salitrosa y denudada del exlago. Esto se debía a que cada año, durante la época de estiaje, gran parte de su superficie quedaba descubierta y, el material granular que la recubre, con humedad muy reducida.

Uno de los objetivos del Plan Texcoco, fue corregir esta situación, construyendo lagos de mayor profundidad que, ocupando una área mucho menos extensa, mantuvieran la capacidad de almacenamiento del antiguo lago de Texcoco. De esta manera, el área de la superficie húmeda sería menor y tendría permanencia, por lo que la que quedara libre de las aguas podría destinarse a otros usos: entre ellos, agrícola, ganadero y recreativo.

El Plan Texcoco se estableció por acuerdo presidencial el 23 de junio de 1971; en la actualidad tiene carácter permanente. Además del ya mencionado, entre sus objetivos incluye: i) complementar las obras del Sistema de Drenaje Profundo, para la protección de la ZMVM contra las inundaciones, ii) almacenar aguas pluviales para destinarlas a irrigación, en sustitución de otras tomadas del subsuelo en la periferia del valle, y recarga del acuífero, iii) contribuir al suministro de agua de la ZMVM, mediante diversas actividades como reúso, y iv) habilitar una zona para posible expansión urbana.

Uno de los problemas más graves que ha planteado el hundimiento del suelo es la modificación de las cotas topográficas de la ZMVM, con respecto al lago de Texcoco. En 1900 el lago tenía su fondo 3 m abajo del nivel medio de La Traza (zona antigua de la ciudad); en cambio, en 1974 lo tenía 2 m arriba.[1] Esto constituía una amenaza de inundaciones para la ciudad de México, que con la profundización de los lagos y las obras del Sistema de Drenaje Profundo se ha evitado.

Un detalle técnico interesante es que tales lagos artificiales se construyeron aprovechando las enseñanzas del hundimiento: por bombeo se indujo consolidación *in situ* de las arcillas, que generó hundimiento.[2,5] A la fecha se han construido cinco lagos artificiales; el más grande de ellos es el Nabor Carrillo, con superficie de 1,000 ha. Para la construcción de este lago se utilizaron 180 pozos de bombeo, de 60 m de profundidad, lo que originó que el hundimiento máximo en el lago Nabor Carrillo fuera de 4 m, y de 12 millones de metros cúbicos el volumen de la depresión topográfica. Se obtuvo una superficie de embalse de 917 ha, y un contenido de aproximadamente 36^6x10 m^3. Está previsto continuar la construcción de los lagos artificiales hasta alcanzar una capacidad de almacenamiento de $120x10^6$ m^3, lo que permitirá controlar y regular las aguas servidas y pluviales de la ZMVM.

Con respecto al abastecimiento de agua en la zona metropolitana, se incluyó el tratamiento y reúso de las aguas residuales. Para ese fin se han desarrollado dos plantas de tratamiento: una para usos industriales y otra para usos agrícolas. Además, hay otras en construcción, para usos industriales. Asimismo, está en operación un módulo de potabilización que genera 50 litros de agua potable por segundo, que se introducen en el acuífero. Esta acción es a nivel piloto, para adquirir experiencia, como un paso preliminar a la construcción de plantas más grandes de tratamiento con fines de recarga artificial.

En la actualidad, en la zona federal las obras están casi concluidas, con lo cual se ha dado cumplimiento a los objetivos principales del plan original. Además, se tienen avances del 50% en las obras realizadas a lo largo y a lo ancho de los 2,000 km^2 que abarca el Proyecto Texcoco, que tienen el propósito principal de controlar, conservar y aprovechar el agua de los ríos del sur y del oriente del Valle de México, que convergen en el lago. Se trabaja en la formación de praderas y cortinas arbóreas rompevientos, para el desarrollo pecuario y para erradicar tolvaneras. De las 8,200 ha que comprende el área federal, 6,000 se encuentran pastizadas. A la orilla de los canales se han plantado dos millones de árboles de especies diversas, pues en el resto de la superficie no ha sido posible por el alto grado de salinidad que ahí existe. Para resolver este problema halino se realizan acciones de lavado de las tierras mediante riego, subdrenaje y drenaje superficial.

2.1.4. Estudios e investigaciones

En 1925, el destacado ingeniero Roberto Gayol, informó a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México que la ciudad se estaba hundiendo, y que la causa probable de este fénomeno era el drenaje de las aguas del subsuelo producido por las obras que, a principios de siglo, él mismo había proyectado y construido. Basó su afirmación en nivelaciones desde la Catedral de la ciudad de México hasta el lago de Texcoco. José A. Cuevas, pre-cursor de los estudios de Mecánica de Suelos en México, aceptó la conclusión de Gayol, y propuso a Nabor Carrillo que estudiara la influencia del bombeo sobre el hundimiento. En 1946, Carrillo [5-8] utilizando datos de observaciones experimentales que se habían realizado y la teoría de la consolidación, de Terzaghi, presentó la explicación del fenómeno de manera cuantitativa.

Se adquirió conciencia entonces de que para la predicción confiable del fenómeno eran necesarios el estudio y la investigación de las propiedades del subsuelo, y se iniciaron éstos de modo sistemático. Simultáneamente se emprendieron los de las aguas subterráneas de la cuenca de México. La correlación de bancos y las primeras mediciones piezométricas realizadas en 1952 por Marsal, Hiriart y Sandoval,[9] permitieron corroborar los hallazgos de Nabor Carrillo, y las investigaciones de Zeevart[10]

ampliaron esta información. Para asegurar la continuidad de los estudios y de las observaciones de campo, de importancia especial ha sido la labor institucional realizada por la Comisión Hidrológica del Valle de México y sus sucesoras: la Comisión de Aguas del Valle de México, a partir de 1974, y la Gerencia de Aguas del Valle de México, desde 1989. Por iniciativa suya se han realizado nivelaciones periódicas, las cuales han complementado la información proveniente de gran cantidad de bancos de nivel que desde 1953 construyó y operó, conjuntamente con más de 100 estaciones piezométricas. La información así obtenida se complementa con otras mediciones y observaciones que dichas dependencias gubernamentales han estado realizando y cuyos resultados están contenidos en sus publicaciones.[11, 12]

Hiriart y Marsal[13] elaboraron una revisión bastante completa del problema del hundimiento y de los estudios realizados hasta 1969. Con base en más de 300 sondeos y en ensayes de unos 10,000 especímenes, Marsal y Mazari[14, 15] determinaron la estratigrafía de las arcillas lacustres superficiales de la ZMVM y las propiedades medias de sus materiales. Más adelante, Juárez Badillo[16,17] estudia con profundidad las ecuaciones constitutivas de las arcillas, y Herrera *et al.*[18-20] modifican el modelo Cam-Clay de Roscoe y Burland,[21] eliminando una hipótesis contradictoria que le impedía predecir las deformaciones distorsionales elásticas observadas en el laboratorio.

Los trabajos ya mencionados de Nabor Carrillo constituyen el primer antecedente de la aplicación de modelos matemáticos a la predicción del comportamiento del sistema hidráulico subterráneo de la ZMVM y del hundimiento del terreno. Sin embargo, el modelo empleado por Carrillo no fue distribuido. El tratamiento numérico de sistemas de acuíferos semiconfinados múltiples, como es el caso de los acuíferos de la ZMVM, en el pasado presentó dificultades especiales, aunque en la actualidad este tipo de modelos está bien desarrollado y están disponibles comercialmente. Motivados por los problemas de la ZMVM, en 1969 Herrera y Figueroa[22, 23] introdujeron en la literatura internacional la teoría integro-diferencial de este tipo de sistemas, que posteriormente utilizaron Pinder *et al.*[24] en estudios relacionados. Algún tiempo después esta teoría fue desarrollada en extenso[25-27] y presentada por invitación en 1976 ante la American Water Resources Association,[28] Con base en ella Herrera *et al.*[29,31] construyeron un modelo distribuido del Valle de México. Un modelo más reciente y completo se obtuvo en 1989,[32, 33] el cual fue per feccionado recientemente,[34] para actualizar la información geológica, que cambia de manera importante la conceptualización del sistema acuífero de la ZMVM.

Otros estudios e investigaciones que por su trascendencia deben ser mencionados, son los realizados para el diseño de los lagos

artificiales del Plan Texcoco.[5,6] Además, la labor desarrollada por Cruickshank,[35-36] y el modelo casi tridimensional desarrollado por Rivera-Bustos.[37]

Para la evaluación de los fenómenos provocados por la explotación del acuífero, en la actualidad el Departamento del Distrito Federal cuenta con una red compuesta por 320 pozos piloto en los que anualmente se realizan mediciones del nivel estático para determinar los sentidos de flujo del agua y los cambios en el almacenamiento en el acuífero. Adicionalmente, cada dos años se realiza la medición de poco más de 1,400 bancos de nivel que integran la red para determinar la evolución del hundimiento del subsuelo de la ciudad.

La mayor parte de los estudios del subsuelo que se llevaron a cabo hasta el decenio de los cincuentas estuvieron motivados por problemas de mecánica de suelos y se ocuparon de profundidades someras, menores a 60 m aproximadamente. Sin embargo, el desarrollo de la ingeniería sísmica[38] creó la necesidad de conocer el subsuelo a mayor profundidad. Algunas de las primeras predicciones de los espectros de temblores en la ZMVM[39, 40] requirieron de esta información y en 1967, se llevó a cabo un amplio estudio de propección geofísica y geológica[41] que incluyó algunas líneas sísmicas en el centro de la ciudad y la perforación del pozo Texcoco 1, que alcanzó una profundidad de 2,100 m aproximadamente sin tocar el basamento y que fue el pozo más profundo que existió en la ZMVM hasta 1985. Los trabajos para la construcción del Sistema de Drenaje Profundo[42] aportaron información geológica de gran importancia.

El 19 de septiembre de 1985, la ciudad de México fue sacudida por un macrosismo con epifoco en las costas de Michoacán y de magnitud 8.3 en la escala de Richter. A consecuencia de él, se perdieron numerosas vidas humanas y los daños materiales fueron cuantiosos. Para prevenir que una tragedia de tal magnitud se repitiera en el futuro, se tomó la decisión de realizar una revisión profunda del reglamento de construcciones y los criterios de diseño sísmico. Un aspecto de esta revisión consistió en un estudio muy amplio del subsuelo de la ciudad de México, que incluyó la perforación de cuatro pozos profundos por parte de Pemex y trabajos de exploración sísmica de reflexión, que permitió hacer una revisión amplia de la geología del subsuelo de la ZMVM.[43-45] Los resultados de estos estudios, constituyen la base de la descripción geológica que se presenta en la sección 2.3.

2.2. Sistemas públicos de suministro de agua y drenaje de la ZMVM

Aunque en realidad la ciudad de México incluye al DF y una porción del Estado de México, en el pasado el DF y la ciudad de México han sido considerados como sinónimos. Más apropiadamente, en este libro, a toda el área urbanizada que constituye esta población (el

TABLA 2.2.1
CARACTERÍSTICAS DE LAS ÁREAS DE SERVICIO Y DE CONSUMO DE AGUAS SUMINISTRADA POR EL DISTRITO FEDERAL Y EL ESTADO DE MÉXICO

	Distrito Federal	*Estado de México*
Área (km^2)	667	620
Población ($x\ 10^6$)[47]	8.3	6.8
Consumo de agua *per capita* (l/cap. día)	364[46]	230[48]
Consumo de agua (%)		
Doméstico	67[46]	80[49]
Industrial	17	17
Comercial y servicios urbanos	16	3

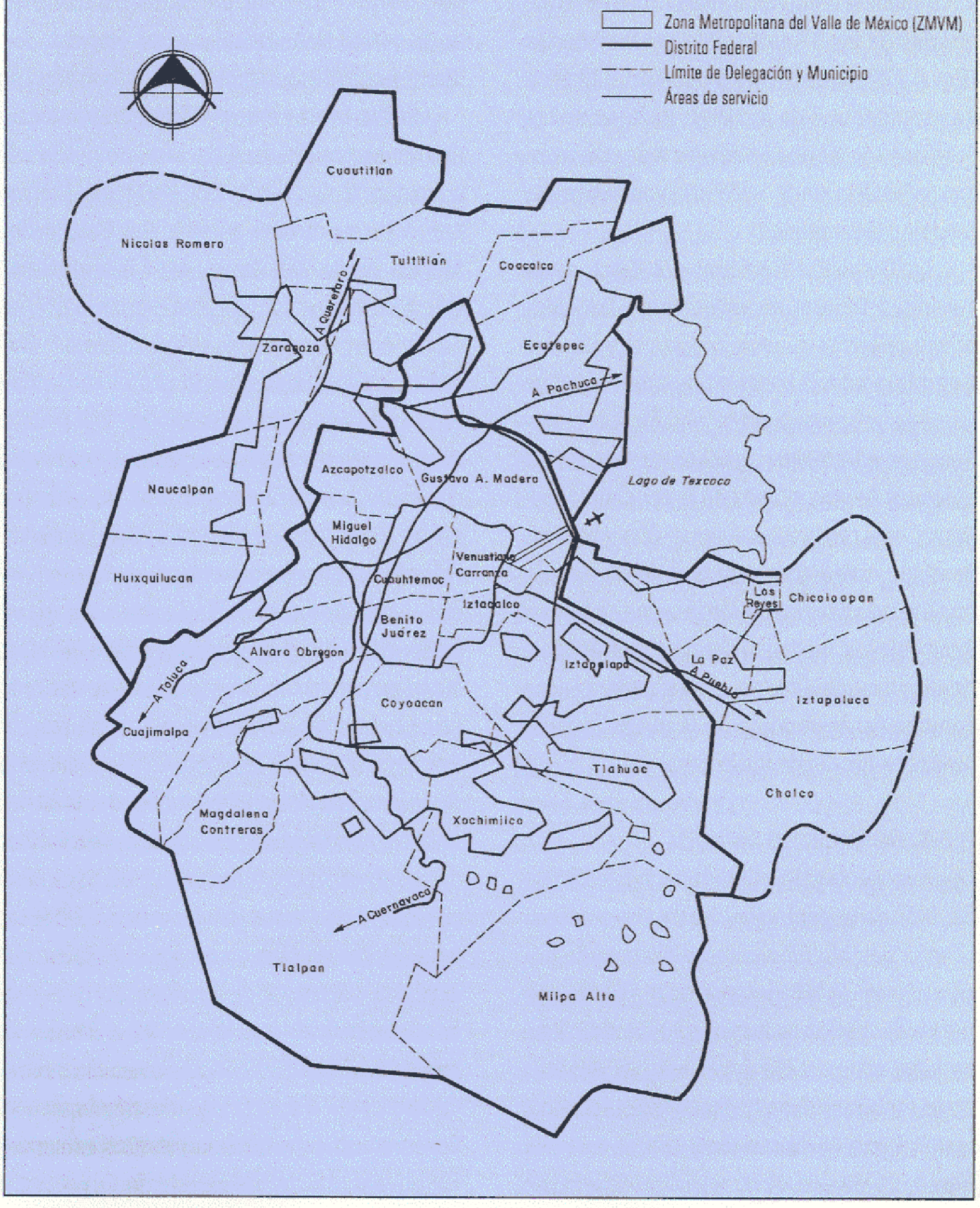
DF más una porción del Estado de México), se la refiere como la "Zona Metropolitana del Valle de México" (ZMVM).

En la administración del agua dentro de la ZMVM comparten la responsabilidad el Distrito Federal (DF), el Estado de México y la Comisión Nacional del Agua (CNA). El DF, cuya extensión total es de aproximadamente 1,504 km^2, es responsable de la provisión de agua potable y de la colección y la disposición final de las aguas de desecho en todo su territorio (Fig. 2.2.1). Sin embargo, su porción meridional está escasamente poblada y hay poca actividad humana. Si bien unos pocos pueblos pequeños tienen pozos y sistema de distribución propios, se carece de un sistema distributivo común o de gran escala para el suministro de agua potable en la parte austral del DF, y tampoco existe sistema alguno de colección y tratamiento de aguas de desecho. A muchos de los habitantes de esta porción se les debe surtir agua mediante camiones cisterna, y ellos mismos han de eliminar sus propias aguas residuales. Las autoridades han estado intentando restringir su urbanización porque representa una zona importante de recarga natural de agua subterránea. Aquella parte de la ZMVM en la que el Distrito Federal es responsable de proveer de agua potable a los habitantes, y de la colección y disposición final de las aguas de desecho, y en la que se tiene acceso a sistemas de distribución de suministro de agua y de colección de aguas de desecho, aquí designada área de servicio, es de 667 km^2 (Fig. 2.2.1 y Tabla 2.2.1).[46]

Hacia el este, el norte y el oeste del Distrito Federal y de su área de servicio existen 17 municipios del Estado de México, con superficie total de 2,269 km^2.[47] El gobierno de ese estado es responsable de la provisión

FIGURA 2.2.1

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO (ZMVM) Y LAS ÁREAS DE SERVICIO DEL DISTRITO FEDERAL Y EL ESTADO DE MÉXICO, PARA EL SUMINISTRO Y DRENAJE DE AGUA



de agua potable y de la colección y disposición final de aguas de desecho en su jurisdicción. El área de servicio de la ZMVM de su incumbencia incluye sólo las porciones urbanizadas de los 17 municipios mencionados (Fig. 2.2.1), equivalente a 620 km^2.[47] El área de servicio total de la ZMVM, incluyendo las porciones de las dos entidades federativas en que se localiza, es de 1,287 km^2 y su población total de 15.1 millones.

La Comisión Nacional del Agua, es la autoridad federal responsable de las cuestiones relativas al agua en todo el país. Por ejemplo, controla todos los recursos hídricos que son propiedad de la nación. Le pertenecen y administra muchos de los pozos ubicados dentro y fuera de la zona metropolitana, con profundidad entre 200 y 400 m. También opera gran cantidad de plantas de tratamiento para provisión de agua en la totalidad del país, inclusive dos muy grandes destinadas a suministro de agua potable al área combinada de servicio de la ZMVM: la de la presa Madín y la de los Berros.

2.2.1. Suministro de agua

Con base en la disponibilidad total de vivienda, 97% de la población del DF tiene acceso al agua potable mediante un sistema de distribución.[48] Al 3% restante se le provee por medio de camiones cisterna o debe autoabastecerse; en esta cifra se incluyen quienes viven en la porción meridional del DF más los que habitan en la periferia. En el caso del Estado de México, dentro del área de servicio se atiende a 90.5% de la población mediante un sistema distributivo, en tanto que 9.5% debe atenerse a camiones cisterna o a algún otro medio.[48] En total, 94.2% de la población de la ZMVM tiene acceso a un sistema de distribución de agua potable.

Según la información disponible, actualmente dentro del área de servicio del DF el consumo de agua es de 364 l/cap. día (litros *per capita* por día), y en la del Estado de México es de 230 l/cap. día (Tabla 2.2.1). Como comparación, en EUA varía de 250 a 1,120, con promedio de 660 l/cap.día.[50] En 1982 un estudio efectuado por el DDF estableció una meta de consumo de 360 l/cap. día,[51] en él se determinó que el consumo dependía primordialmente del ingreso familiar y del tipo de vivienda. Por ejemplo, en una familia que percibe más de tres veces el salario mínimo el consumo de agua sería de 150 l/cap. día, en tanto que el de otra cuyo ingreso sea de 11 veces el estipendio mínimo habría de ser más de 500 l/cap. día[51]. Por consiguiente, la cantidad de agua potable provista al área de servicio del Distrito Federal se distrbuye y/o consume en forma desigual; es decir, la cantidad de agua disponible, y por tanto consumida, en diferentes sectores de ella, es variable. A causa de la rápida afluencia de gente al DF y como consecuencia de su expansión, el Departamento del Distrito Federal ha usado la cifra de 150 l/cap. día en su intento de abastecer de agua a estos nuevos habitantes urbanos. En el caso del Estado de México, la autori-

dad del agua se ha fijado como meta 290 l/cap. día para el año 2000.[52]

La diferencia actual en el consumo *per capita* entre las áreas de servicio en ambas entidades federativas, 364 *vs.* 230 l/cap. día (Tabla 2.2.1), puede deberse a que el DF está más desarrollado e incluye más actividad comercial e industrial que el Estado de México. Asimismo, debe notarse que el dato correspondiente a este último, no incluye el agua extraída de pozos particulares para uso industrial. Al respecto, se ha estimado que éstos contribuyen con 2.26 m^3/s, aproximadamente 10% del consumo,[49] mientras que en el DF sólo 0.9 m^3/s se abastecen de esta manera.[46] Sin embargo, en ambos casos este total puede ser algo mayor, pues se cree que hay cierta cantidad de pozos que suministran agua para uso industrial y comercial que no están registrados.

El agua potable provista a una comunidad se puede clasificar según su uso; por ejemplo, doméstico, comercial, industrial y de servicios públicos, más fugas y otras pérdidas no contabilizadas en el sistema. En la tabla 2.2.1 se proporcionan los datos de consumo en las dos áreas con respecto al porcentaje de uso doméstico, industrial, comercial y de servicios urbanos. La fracción destinada al consumo doméstico, en ambas áreas, es aproximadamente el doble del promedio reportado en las comunidades de Estados Unidos: 37%.[50] Por otra parte, la destinada al consumo industrial, comercial y de servicios públicos en las dos áreas es 40 a 70% menor que la que típicamente se usa para estos propósitos en EUA. En parte, esto puede explicar el menor consumo *per capita* en comparación con los Estados Unidos.[50] La diferencia en los porcentajes usados en las dos áreas de servicio, para establecimientos comerciales y para servicios urbanos, puede también contribuir al mayor consumo *per capita* en el DF. En la tabla 2.2.1, en lo referente a consumo de agua no se incluye la que se pierde debido a fugas dentro del sistema de distribución y la que no se contabiliza por otras causas; es decir, la diferencia entre la cantidad total de agua suministrada a una comunidad y la enviada y medida en los varios puntos de consumo efectivo. En EUA, las pérdidas de este tipo pueden ser del orden de 15%,[50] cifra también recomendada por la CNA para planeación. En el Distrito Federal, dichas pérdidas se ubican entre 10 y 20%,[53] el dato correspondiente al Estado de México no pudo obtenerse.

Fuentes de Agua Cruda

Tanto el DF como el Estado de México utilizan agua subterránea y superficial para provisión de agua potable a sus respectivas áreas de servicio. La tabla 2.2.2 enlista las diversas fuentes y la cantidad que aporta cada una de ellas, en m^3/s.[54-56] Excepto los casos del río Magdalena y de la presa Madín, ambas áreas de servicio usan las mismas fuentes de agua.

Una fuente importante utilizada tanto por el Distrito Federal como por el Estado de México es el Sistema Cutzamala (cuenca Cutzamala-Lerma-Santiago), con dos sitios

TABLA 2.2.2
FUENTE Y CANTIDAD DE AGUA CRUDA ABASTECIDA AL DISTRITO FEDERAL Y A LAS ÁREAS DEL ESTADO DE MÉXICO (ZMVM)

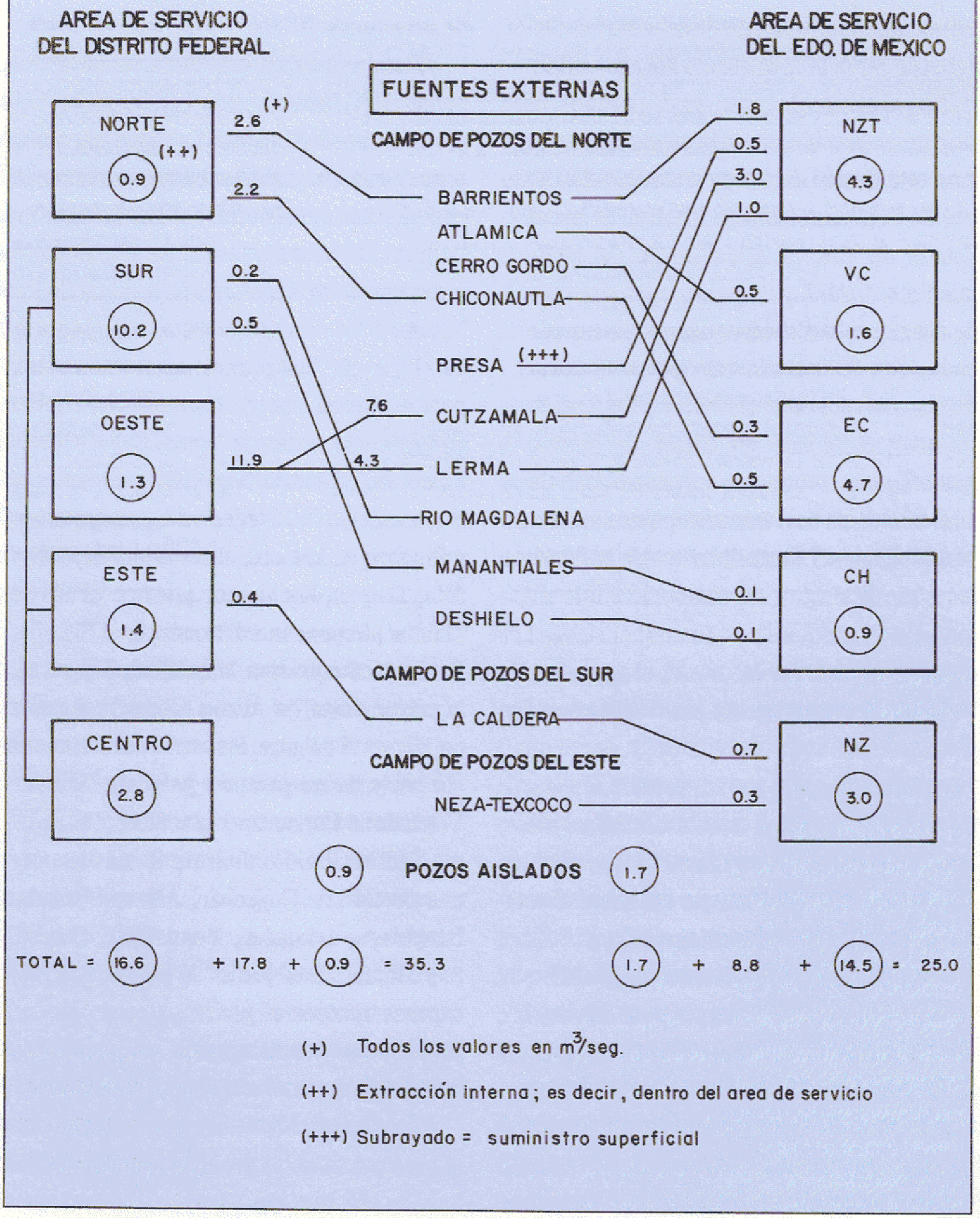
Fuente de agua cruda	*Distrito Federal* m^3/sec	*Estado de México* m^3/sec	*Total* m^3/sec	*%*
Agua subterránea	27.0	21.3	48.3	80.1
Valle de México	22.7	20.3	43.0	71.3
Lerma	4.3	1.0	5.3	8.8
Agua superficial	8.3	3.7	12.0	19.9
Sistema Cutzamala	7.6	3.0	10.6	17.6
Río Magdalena	0.2		0.2	0.3
Presa Madín		0.5	0.5	0.8
Manantiales y deshielos	0.5	0.2	0.7	1.2
Abastecimiento total de agua	35.3	25.0	60.3	100

principales para obtención del agua, localizados aproximadamente 100 km al oeste del Valle de México: las presas Valle de Bravo y Villa Victoria.[54-56] Luego de recibir tratamiento cerca de los lugares de extracción, el agua se transporta por acueductos hasta las dos áreas de servicio. Sin embargo, antes de que el líquido llegue a éstas, se incorporan 4.3 m^3/s de agua subterránea provenientes del Lerma, después de ser desinfectados con cloro, y se obtiene una tasa volumétrica de flujo de 14.9 m^3/s (Tabla 2.2.2). Luego este caudal se divide entre el DF y el Estado de México 11.9 y 3.0 m^3/s, respectivamente (Tabla 2.2.2). Además, un acueducto separado aporta al área de servicio del Estado de México 1.0 m^3/s adicional procedente del Lerma. Otra fuente superficial (0.2 m^3/s) para el DF es el río Magdalena.[46, 54] La presa Madín, sobre el río Tlalnepantla, provee a esta parte del Estado de México con 0.5 m^3/s.[52, 55] Finalmente, ambas entidades aprovechan manantiales naturales y/o agua de deshielo ubicados dentro de sus respectivas áreas de servicio. En el caso del DF, 47 manantiales proveen directamente 0.5 m^3/s.[54] En el Estado de México los manantiales suministran 0.1 m^3/s, y las corrientes de montaña, generadas por agua de deshielo, contribuyen con una cantidad igual.[49]

La figura 2.2.2 es un esquema conceptual del agua que entra a las áreas de servicio del DF y del Estado de México, en el que se consignan las fuentes internas y externas y la cantidad aportada por cada una de ellas: es un resumen del sistema de suministro de agua de la ZMVM con respecto a la

FIGURA 2.2.2

FUENTES Y CANTIDADES DE AGUA QUE INGRESAN EN LA ZMVM



(+) Todos los valores en $m^3/seg.$

(++) Extracción interna; es decir, dentro del area de servicio

(+++) Subrayado = suministro superficial

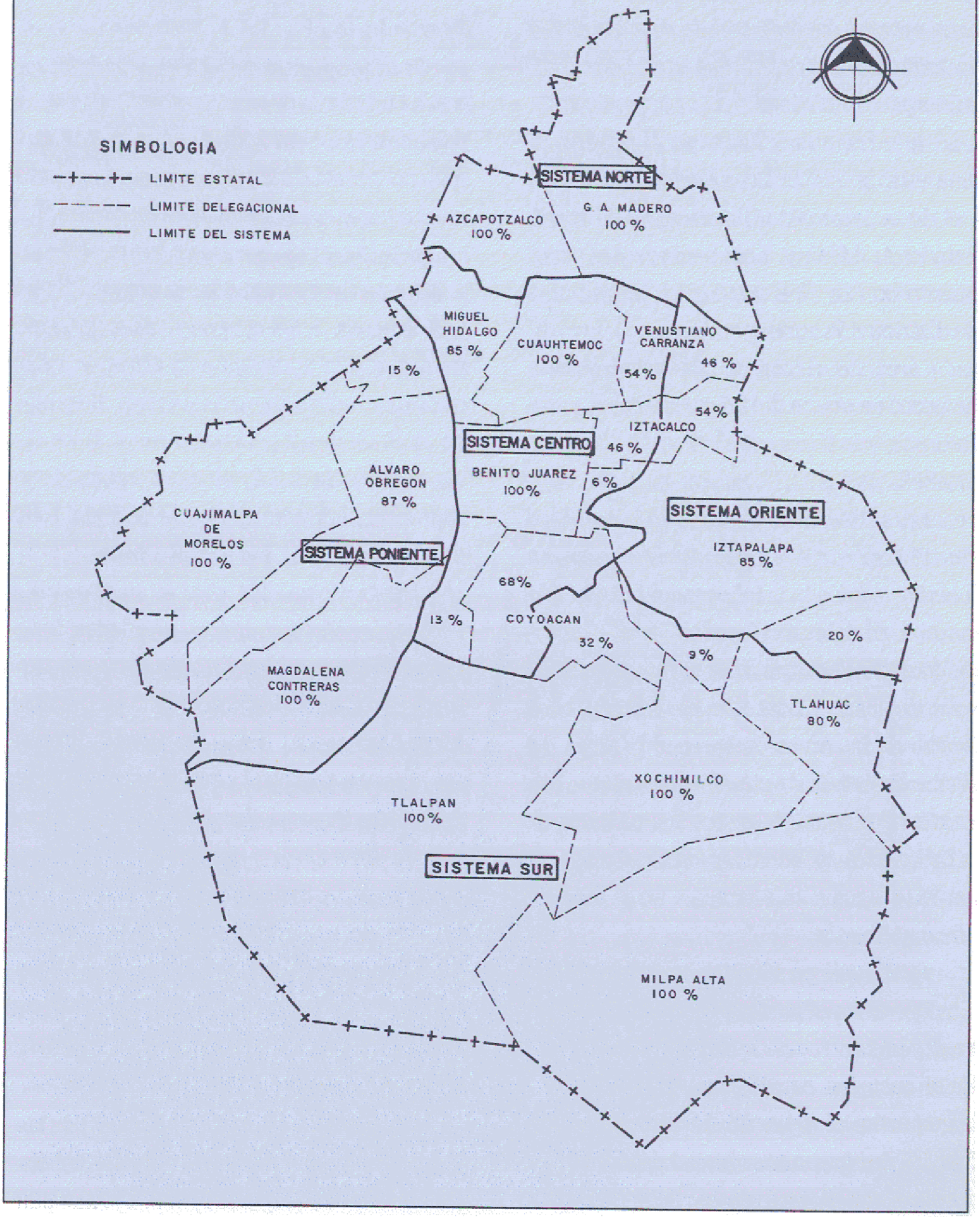
cantidad. Excepto en el caso del Sistema Cutzamala-Lerma, el nombre dado a las varias fuentes se refiere a la localidad donde el agua entra al sistema de distribución de las áreas de servicio o, en el caso del agua subterránea, al campo de pozos que la produce. El sitio de extracción ubicado en el río Magdalena está dentro del área de servicio del DF, y el de la presa Madín se localiza en la del Estado de México; así, después del tratamiento entran directamente a los sistemas de distribución correspondientes. Dentro de cada área de servicio hay cierta cantidad de pozos en operación (Fig. 2.2.2-Extracción Interna); en el caso del Estado de México hay 242, que producen aproximadamente 16.2 m^3/s;[55] los del DF son 847, que contribuyen 17.5 m^3/s.[46] Posteriormente a la desinfección, esta agua de extracción interna también se agrega directamente al sistema de distribución. Similarmente, el agua derivada de manantiales y/o de deshielo está dentro de las áreas de servicio y, luego de recibir desinfección con cloro, entra directamente al sistema de distribución. Excepto la de deshielo y las tres fuentes superficiales, toda el agua interna que entra a ambas jurisdicciones es subterránea (Fig. 2.2.2); ésta recibe sólo un tratamiento: desinfección por cloración, hasta obtener 2.0 mg/l de Cl residual total, en el sitio de los pozos. En el caso del DF, 490 km de acueductos transportan el agua desde las diferentes fuentes de agua subterránea hasta el punto donde entra al área de servicio;[46] el agua subterránea de las varias fuentes externas que proveen al área de servicio del Estado de México se transporta a lo largo de 348 km de acueductos.[48]

Para propósitos prácticos, tomando en cuenta la(s) fuente(s) proveedora(s), ambas áreas de servicio están divididas en cinco zonas geográficas. Sin embargo, a causa de la complejidad del sistema de distribución inherente a la del DF, que está completamente interconectado, la referencia se hace de los lugares donde el agua entra al área de servicio, es decir, "los puntos de entrada". Así, para este caso, las cinco zonas se designan simplemente sistemas Norte, Sur, Oriente, Poniente, y Central (Fig. 2.2.3). El Sistema Norte incluye las delegaciones Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; el Sistema Sur, Milpa Alta, Tlalpan, Xochimilco y una porción de Tláhuac, Coyoacán e Iztapalapa; el Sistema Poniente, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, la mayor parte de Álvaro Obregón y parte de Miguel Hidalgo; el Sistema Oriente, la mayor parte de Iztapalapa y parte de Tláhuac, Venustiano Carranza e Iztacalco; y el Sistema Central, Benito Juárez, Cuauhtémoc y una porción de Coyoacán, Álvaro Obregón, Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Miguel Hidalgo. En la figura 2.2.3 se expresa también el porcentaje del área superficial de cada delegación con respecto a las cinco zonas.

Las demarcaciones (cinco zonas) de las que se compone el área de servicio del Estado de México (Fig. 2.2.1) son: 1) Atizapán

FIGURA 2.2.3

LAS CINCO ZONAS ASOCIADAS A LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL ÁREA DE SERVICIO DEL DISTRITO FEDERAL



Huixquilucan-Naucalpan (NZT), que además de estos tres municipios incluye el de Nicolás Romero y la porción occidental del de Tlalnepantla; 2) Valle de Cuautitlán (VC); 3) Ecatepec (EC): municipios de Coacalco, Ecatepec, Nezahualcóyotl (parte septentrional), Tecámac, Tlalnepantla (porción oriental) y Tultiltán; 4) Nezahualcóyotl (NZ): municipios de Chicoloapan, Chimalhuacan, La Paz y Nezahualcóyotl (parte meridional); y 5) Chalco (CH); municipios de Chalco e Ixtapaluca.

La cantidad total de agua suministrada al área de servicio del DF es 35.3 m^3/s, y a la del Estado de México 25.0 m^3/s: 60.3 m^3/s en total (Tabla 2.2.2). Se notará que estos valores calculados están basados en la cantidad de agua aportada por cada fuente y enviada a la ZMVM. Usando la información disponible hasta 1981,[57] Murillo[58] concluyó que la cantidad total de agua provista al Valle de México era de 68.1 m^3/s. Esta cifra es 12% mayor que la calculada en este estudio: 60.3 m^3/s. La razón de esta discrepancia no es clara. Una explicación posible es que los cálculos de Murillo incluían, además de la abastecida a la ZMVM, el agua suministrada a otras área del Valle de México.

Con base en el total aportado (Tabla 2.2.2) y en la población total, el consumo *per capita* en el área de servicio del Distrito Federal concuerda bastante bien con la cifra expresada en la tabla 2.2.1: 368 *vs.* 364 l/cap. día. Sin embargo, en el caso del Estado de México los datos de la tabla 2.2.2 indicarían un consumo de 292 l/cap. día (considerando una población estimada de 7.4×10^6 en 1993[52]), algo mayor que los 230 l/cap. día citados en la tabla 2.2.1. Esta discrepancia puede deberse a que el valor más bajo no toma en cuenta el agua provista por pozos particulares en esa área, o según la cantidad real que se está suministrando, simplemente que hay más consumo que el reportado.[48] A causa de la pérdida por fugas, que ocurren en el sistema de distribución, la cantidad total real enviada a los diversos usuarios sería menor que la aportada a la ZMVM, y así el consumo individual sería inferior al indicado en la tabla 2.2.1. De acuerdo con los datos de la tabla 2.2.2, el agua subterránea representa aproximadamente 80% del total suministrado a las dos jurisdicciones.

De conformidad con la información proporcionada por ambas entidades federativas acerca de las fuentes de agua subterránea y su ubicación,[54, 55, 59] es posible identificar cuatro áreas de pozos diferentes, que suministran agua a la ZMVM (Fig. 2.2.4): Sur-Sistema Sur del Distrito Federal y de la Zona Chalco del Estado de México; Metropolitana-Sistemas Norte, Central, Este y Oeste, del DF (esta área incluye extracción de pozos particulares); Este-Primordialmente las zonas Nezahualcóyotl y Texcoco, del Estado de México; Norte-Norte del Distrito Federal, y las zonas Cuautitlán, Ecatepec, NZT y otras.

La tabla 2.2.3 enlista las cuatro áreas de campos de pozos y la tasa de extracción de

FIGURA 2.2.4

UBICACIÓN DE LOS CAMPOS DE POZOS QUE SUMINISTRAN AGUAS SUBTERRÁNEAS A LA ZMVM: 1) SUR, 2) METROPOLITANO, 3) ESTE Y 4) NORTE

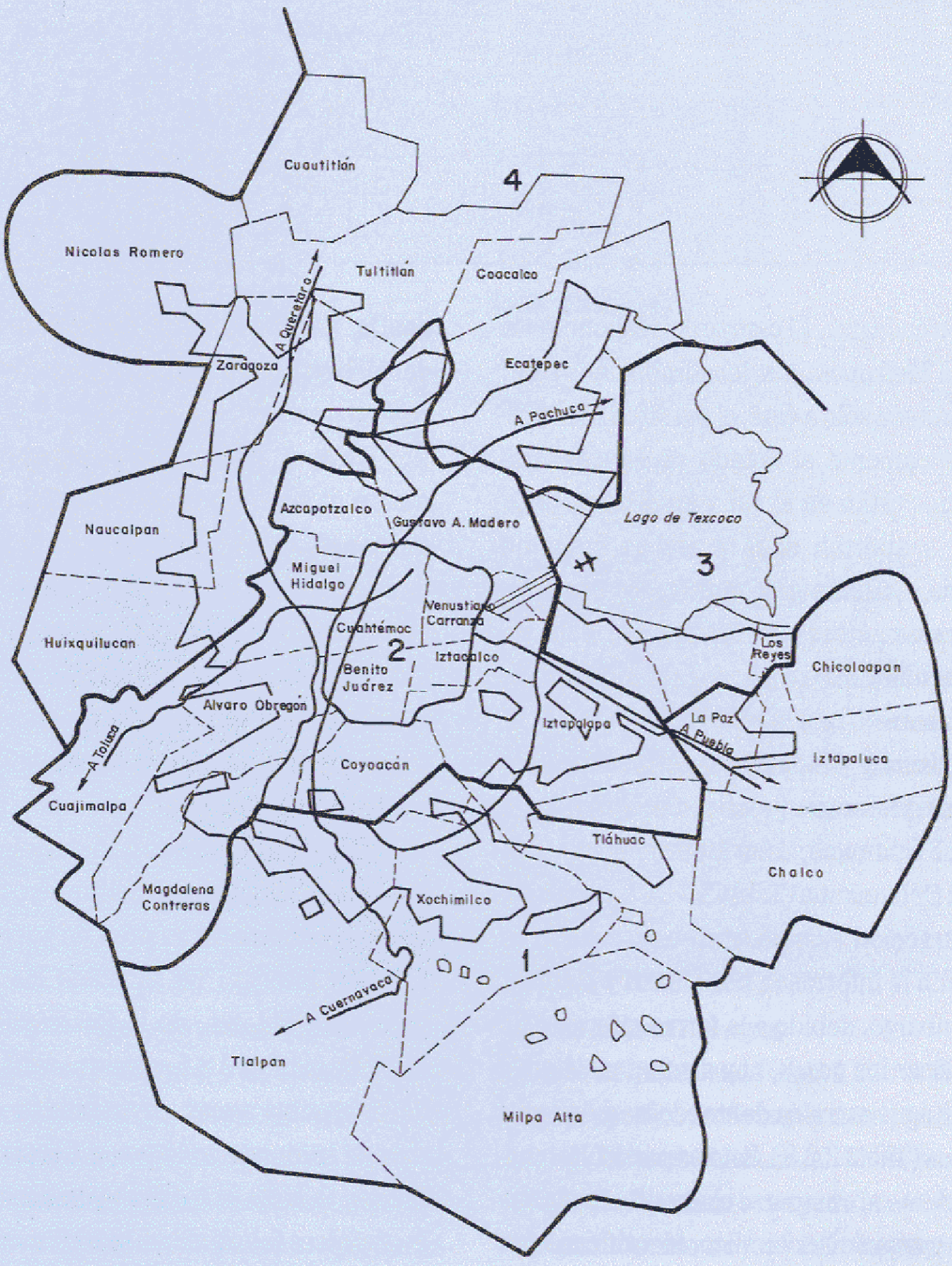


TABLA 2.2.3
CAMPOS DE POZOS DENTRO DEL VALLE DE MÉXICO Y SUS TASAS DE EXTRACCIÓN DE AGUA

Áreas de campos de pozos en servicio en la ZMVM	*Tasa de extracción (m^3/s)*	*Campos de pozos*[60]	*Tasa de extracción (m^3/s)*
Sur	12.2	Xochimilco	27.0
Metropolitana	7.3	Zona Metropolitana	8.3
Este	3.3	Texcoco	5.2
Norte	20.2	Chiconautla	4.5
Total	43.0	Total	45.0

agua en cada una. El campo correspondiente al Área Metropolitana, localizado dentro del DF, abastece sólo a éste; el del Área Este provee únicamente al Estado de México. Los otros dos están en el sur y en el norte de la ZMVM, y aportan agua a ambas áreas de servicio. Actualmente, registrados por autoridades de ambas entidades, en el Valle de México hay 1,089 pozos, de profundidad que varían entre 70 y 200 m.[46, 48]

Mazari y Mackay[60] reportaron cuatro campos diferentes, proveedores de agua a la ZMVM: Xochimilco, Zona Metropolitana, Texcoco y Chiconautla (Tabla 2.2.3). La tasa total de extracción calculada en este estudio es similar a la informada por Mazari y Mackay. Sin embargo, debido a la forma diferente de identificar los pozos, hay discrepancia en la tasa de agua extraída dentro de los diferentes campos (Tabla 2.2.3). Esto es particularmente evidente al comparar el Área Sur y el campo de pozos de Xochimilco, identificado por los autores mencionados y, paralelamente, el Área Norte con el campo de pozos de Chiconautla. Asimismo, estas discordancias pueden deberse a la incertidumbre relativa a los registros existentes.

Excepto el agua que se agrega directamente al sistema de distribución derivada de manantiales y de unos pocos pozos aislados del Distrito Federal, hay nueve grandes puntos donde se incorpora agua al sistema distribuidor del área de servicio del DF.[54] En la tabla 2.2.4 se enuncian estos grandes puntos de entrada, junto con su ubicación general dentro de esta área.

El Estado de México ha determinado que la calidad del agua de cierto número de pozos ubicados dentro de su área de servicio (extracción interna) no satisface las Normas para Agua Potable, de la Secretaría de Salud.[55] En la tabla 2.2.5 se enumeran los pozos de diferentes zonas cuya calidad de agua excede la norma relativa a bacterias coliformes (totales y fecales) y constituyentes inorgánicos (alcalinidad, hierro, manganeso, o cloruros). Considerando que hay un total de 242 pozos internos registrados, 23% están

TABLA 2.2.4

PUNTOS PRINCIPALES DE ENTRADA DE AGUA POTABLE AL SISTEMA DE DISRIBUCIÓN DEL ÁREA DE SERVICIO DEL DISTRITO FEDERAL

Punto de entrada	*Ubicación*	*Características de la fuente*	*Ubicación de la fuente de origen*
Cerro de la Estrella	Sur	Extracción interna (agua subterránea)	Este
Chalmita	Norte	Extracción interna (agua subterránea)	Campo Norte, (Barrientos)
Chiconautla	Norte	Extracción interna (agua subterránea)	Campo Norte
El Peñón	Oriente	Extracción interna (agua subterránea)	Este
La Caldera	Este	Extracción interna (agua subterránea)	Sur
Metro Cúbico,	Sur	Extracción interna (agua subterránea)	Sur
Río Magdalena	Sur	Extracción externa (agua superficial,	Río Magdalena
Río San Joaquín	Poniente	Extracción interna (agua subterránea),	Cutzamala
Xotepingo	Sur	Extracción interna (agua subterránea)	Sur

produciendo agua que no cumple las normas referentes a coliformes, y 11% las de constituyentes inorgánicos. En total, el 34% de los pozos rebasa las normas. También se reportan, no obstante la carencia de norma acerca de ácido sulfhídrico, 21 pozos en que ha habido incremento del mismo, la mayoría en la zona NZ.[55]

Tratamiento del agua

Como se indica en la tabla 2.2.2, la fuente de agua superficial más importante para la ZMVM, es el Sistema Cutzamala. Toda el agua tomada de esta fuente se purifica en la planta de tratamiento de Los Berros, operada por la Comisión Nacional del Agua.[56] Originalmente se planeó para 24 m^3/s de capacidad

TABLA 2.2.5
NÚMERO DE POZOS DENTRO DEL ÁREA DE SERVICIO DEL ESTADO DE MÉXICO QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS DE AGUA POTABLE

Zona	*Bacterias coliformes* (+)	*Inorgánicos* (++)	*Total*
NZT	17	13	30
VC	13	–	13
EC	8	11	19
Z	11	–	11
CH	7	3	10
Total	56	27	83

(+) Pueden ser totales o fecales
(++) Alcalinidad, Fe, Mn y Cl.

máxima, aunque no toda está instalada. El tratamiento consiste en precloración, coagulación/floculación con alumbre, sedimentación por gravedad, y filtración rápida con arena.

El DF tiene cuatro plantas de tratamiento, para suministro de agua, con capacidad total de 1.1 m^3/s (Tabla 2.2.6). Las denominadas Ing. Roberto Gayol (Santa Cruz Meyehualco), M. Marroquín y R. (Agrícola Oriental) e Ing. Francisco de Garay (Sta. Catarina), se proyectaron para tratar agua subterránea, pero son anticuadas y están en malas condiciones; hay informes contradictorios acerca de si actualmente están en uso, [54, 61] Originalmente se intentaba que la Ing. Roberto Gayol separara gases disueltos, color y fierro; incluía remoción mediante aereación, filtración con arena, ozonación y cloración.[54] La planta M. Marroquín y R. operaba reducción de dureza por el proceso de cal-sosa, floculación con alumbre, sedimentación, filtración con arena y cloración. La Ing. Francisco de Garay se proyectó para eliminar color, sabor y olor; incluía separación por aeración, precloración, ozonación, filtración y coloración. En la actualidad, en estas tres plantas se efectúa solamente desinfección con cloro; es decir, al agua subterránea se le aplica este halógeno para obtener un total residual de 2.0 mg/l. La planta río Magdalena, con capacidad de

TABLA 2.2.6
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA DENTRO DEL ÁREA DE SERVICIO DEL DISTRITO FEDERAL

Denominación	*Capacidad instalada* (m^3/s)
Ing. Roberto Gayol	0.065
M. Marroquín y R.	0.325
Ing. Francisco de Garay	0.500
Río Magdalena	0.210
Capacidad total	1.100

0.210 m^3/s, trata agua del río del mismo nombre por coagulación/floculación con alumbre, sedimentación por gravedad, filtración rápida con arena, y desinfección mediante cloro (residuo total de 2.0 mg $^3/l$).[54]

En la presa Madín se localiza otra planta de tratamiento, cuya capacidad de diseño es de 1.0 m^3/s; la opera la Comisión Nacional del Agua y suministra 0.4 m^3/s en la actualidad, al área de servicio del Estado de México.[56] El tratamiento consiste en coagulación/floculación con alumbre, sedimentación por gravedad, filtración con arena, y desinfección con cloro. El total de cloro residual en el agua tratada es de 2.0 mg/l.

Sistema de distribución

El sistema de distribución de agua dentro del área de servicio del DF consiste de: 1) una red primaria de tubería de 690 km de longitud y diámetros que varían de 0.5 a 1.83 m; y 2) de una red secundaria de más de 10,000 km de tubería, con diámetros inferiores a 0.5 m.[46] Incluye 243 tanques de almacenamiento, con capacidad total de 1.5 x 10^6 m. Estos tanques constituyen un medio de almacenamiento y regulación del flujo de agua dentro de los sistemas de distribución. Para asegurar que el total de cloro residual sea de 0.2 a 0.5 mg/l en cualquier punto de consumo, en todo el sistema hay 326 localidades de recloración. Todas las conexiones separadas de agua hacia el área de servicio del DF están interconectadas al sistema de distribución. El DF está construyendo una línea periférica de transmisión (Acueducto Periférico) que, desde el Sistema Cutzamala, con entrada por el poniente, transportará agua al oriente del área de servicio. Circundará a ésta por el sur y proveerá a las porciones sur y suroriental de la ZMVM: en el oriente se unirá con el sistema Macrocircuito de Distribución (descrito posteriormente), de modo que toda la ZMVM quede circundada por una gran línea de transmisión. Ya se terminó la construcción del Ramal Sur, que consta de un túnel de 4 m de diámetro y 11 km de longitud.[46]

Una fuente externa de agua importante para el área de servicio del Estado de México, es el Sistema Cutzamala (Tabla 2.2.2). Relacionado con esta fuente de agua superficial está el Macrocircuito de Distribución, proyectado para transportar agua de poniente a oriente.[47] Este sistema, que circunda el área de servicio en el norte, actualmente consta de 49.1 km de líneas de transmisión, con tubería cuyo diámetro oscila entre 8 y 84 pulgadas (20.3 a 213.4 cm). Se está ampliando 46.0 km, con 3.9 km adicionales proyectados para el futuro. En la actualidad, el almacenamiento en este sistema consta de seis tanques, con capacidad total de 256,000 m^3. Se están construyendo siete tanques adicionales, con capacidad total de 25,000 m^3; para el futuro están planeados cinco más, con capacidad total de 38,500 m^3. Además de este sistema, en el área del Estado de México hay 348 km de líneas de transmisión y 32 tanques de almacenamiento, con una capaci-

dad total de aproximadamente 0.44×10^6 m^3. El agua se distribuye a lo largo de 425.7 km de tubería, de 3 a 42 pulgadas (7.6 a 106.7 cm); actualmente se están aumentando 649 km; la expansión futura demanda 118.7 km adicionales de tubería.[47]

2.2.2. Recolección y eliminación de aguas de desecho

Sistema de drenaje

Básicamente, en la ZMVM hay un sólo sistema de colección de aguas de desecho o residuales.[59] Aunque cada área de servicio tiene su propia red albañal, de una u otra manera todas las cloacas descargan en los interceptores principales del Sistema General de Drenaje, que desaloja las aguas residuales hacia fuera de la cuenca. Hay tres interceptores principales: el Gran Canal, el Emisor Central y el Emisor Poniente. Siendo una cuenca endorreica, estos interceptores cumplen su función mediante cuatro salidas artificiales, ubicadas en la parte septentrional del valle. Por lo tanto, todo el sistema drena la cuenca de sur a norte.

De los resultados del censo más reciente, efectuado en 1990,[48] se determinó que 82.1% de las viviendas de la ZMVM tiene servicio de drenaje (Tabla 2.2.7). Sin embargo, es importante notar que 6.1% de ellas, aproximadamente 190,000, usan fosas sépticas, que frecuentemente no están reguladas ni bien operadas, y 9.4%, de dichas viviendas, alrededor de 294,000, carecen por completo de drenaje. Además, estas cifras no reflejan la diferencia en disponibilidad de este servicio en las diversas partes de la ZMVM. Por ejemplo, en Chalco, dentro del Estado de México, sólo 11% de las viviendas tienen acceso a él, en tanto que el 76.7%, aproximadamente 41,000, carecen totalmente del mismo.[48] Similarmente, en los municipios de Ixtapaluca y de Nextlapa también en el área de servicio de ese estado, quienes lo tienen representan el 59.4%, y el 45.9%, respectivamente. En el área de servicio del Distrito Federal, en la delegación de Milpa Alta, el porcentaje correspondiente es 35.3.[48]

Operación del Sistema de Drenaje

Básicamente, en la ZMVM el sistema de drenaje opera para desalojar las aguas municipales de desecho y para controlar las inundaciones. Operacionalmente consta de las redes colectoras secundaria y primaria y del Sistema General de Drenaje. La red secundaria colecta aguas residuales domésticas e industriales –municipales– así como pluviales. La red primaria conecta a la secundaria con el Sistema General de Drenaje, que controla el flujo de aguas residuales y pluviales y las transporta fuera del Valle de México. Es importante mencionar que, más que disponer de agua para reúso, el desarrollo del sistema de desagüe se determinó por la necesidad de controlarla y desalojarla del valle.[51]

El sistema de recolección dentro del área de servicio del DF se divide en seis áreas o

TABLA 2.2.7

RESULTADOS DEL CENSO DE 1990

Concepto	*Área de servicio del Distrito Federal*	*Área de servicio del Estado de México*	*ZMVM*
Población	8,235,744	6,812,121	15,047,865
Número de viviendas	1,789,171	1,331,772	3,120,943
Viviendas conectadas al drenaje (%)	85.7	77.2	82.1
Viviendas con fosas sépticas (%)	6.8	5.1	6.1
Viviendas con descarga directa (%)(*)	1.2	2.0	1.5
Viviendas sin servicio (%)**	5.4	14.8	9.4

(*) Viviendas que descargan directamente al suelo o a cuerpos de agua

(**) Viviendas sin ninguna clase de drenaje

Físicamente, el sistema de drenaje de la ZMVM consta de[*]:

1) 9,000 km de red secundaria (diámetro < 0.61 m)*
2) 1,260 km de red primaria (diámetro > 0.61 m)*
3) 68 estaciones de bombeo (capacidad total: 510 m3/s)
4) 17 estaciones de aforo*
5) Presas y lagunas para control de flujo
6) 111.3 km de canales a cielo abierto:
   - Gran Canal del Desagüe - 47.5 km
   - Río de los Remedios - 15.3 km
   - Río Tlalnepantla - 13.5 km
   - Río San Buenaventura - 17.0 km
   - Canal Nacional - 9.0 km
   - Canal de Chalco - 9.0 km
7) 42.65 km de ríos entubados*:
   - Río Churubusco - 21.0 km
   - Río de la Piedad (Viaducto) - 11.25 km
   - Río Consulado - 10.4 km
8) 6.0 km de túneles semiprofundos:
   - Colector Iztapalapa - 5.29 km
   - Colector Obrero Mundial - 0.71 km
9) 112.80 km de túneles profundos:
   - Interceptor Poniente - 16.5 km
   - Interceptor Central - Poniente - 16.5 km
   - Interceptor Central - 16.1 km
   - Interceptor Oriente - 10.3 km
   - Emisor Central - 49.7 km
   - Interceptor Central - Central - 3.7 km

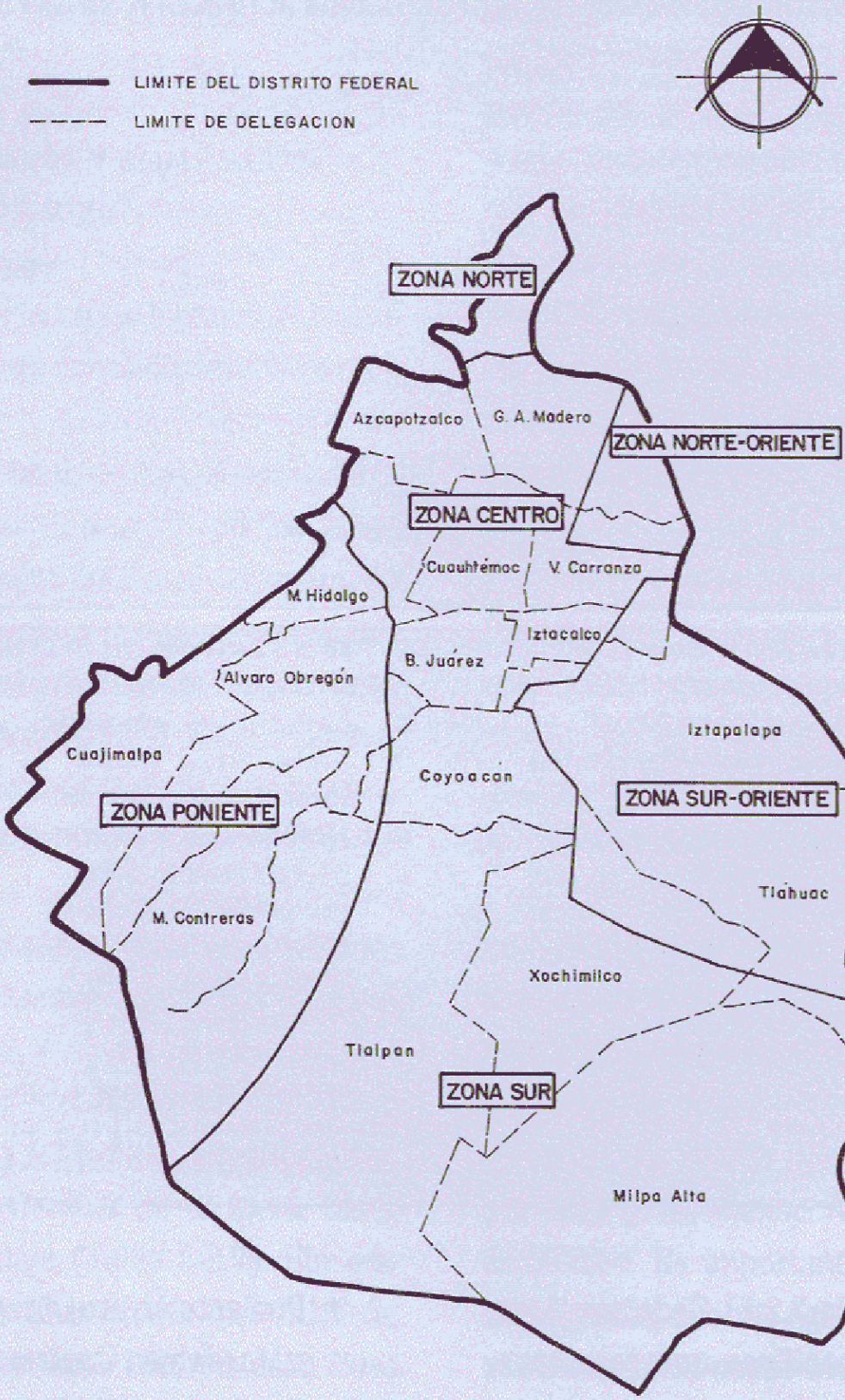
* Estas cifras se aplican sólo al área de servicio del DF; de las correspondientes al Estado de México no se dispuso.

zonas diferentes (Fig. 2.2.5). Cada una tiene características específicas que requieren una estrategia operacional diferente; por ejemplo, control de flujo por bombeo y/o gravedad, y almacenamiento. Las delegaciones incluidas en cada área son:

- Poniente-Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Magdalena Contreras
- Sur-Coyoacán, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco
- Sureste-Iztapalapa y Tláhuac
- Noreste-Venustiano Carranza

FIGURA 2.2.5

ÁREAS DEL SISTEMA DE DRENAJE DEL DISTRITO FEDERAL



- Norte-Gustavo A. Madero
- Central-Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Iztacalco y Miguel Hidalgo.

Como se mencionó previamente, el sistema de desagüe de la ZMVM capta aguas de desecho y pluviales; así, es un sistema combinado.[59] Asimismo, una cantidad significativa de aguas residuales industriales se descarga al drenaje en las redes primaria y secundaria. En el Valle de México las temporadas de lluvia y de estiaje están bien definidas: la primera dura de mayo a octubre; los meses restantes son bastante secos. Según la época del año, la operación del Sistema General de Drenaje es diferente: durante la época de lluvias el flujo pluvial es considerablemente mayor que el producido por las descargas domésticas e industriales. Por otra parte, la forma en que operan de las redes primaria y secundaria, no depende de la época del año.

Temporada de estiaje: durante esta época (de noviembre a abril), el flujo producido en la ZMVM, primordialmente aguas de desecho municipales, se expulsa por el Gran Canal y el Emisor Poniente.[59] No obstante que no hay disponibilidad de aforos precisos del flujo total de aguas residuales, se estima que aproximadamente 80% del total de agua suministrada a la ZMVM llega al sistema de desagüe. En el caso del área de servicio del Distrito Federal, esta cantidad asciende a alrededor de 26-28 m^3/s, en tanto que el Estado de México informa de un flujo de 44.4 m^3/s para toda la ZMVM.[62] Además del Gran Canal y del Emisor Central, que drenan las áreas de servicio de ambas entidades federativas, hay otros tres sistemas principales o interceptores cloacales que desaguan la del DF (los ríos Churubusco, de La Piedad y Consulado), que descargan en el Gran Canal. Similarmente, el área del Estado de México tiene tres interceptores adicionales, de los cuales dos (ríos de Los Remedios y de La Compañía) vierten en el Gran Canal, y el tercero (Río Cuautitlán) descarga en el Emisor Poniente.[59]

Todos los ríos antedichos, una vez fueron corrientes fluviales naturales que de manera predominante drenaban la Cuenca del Valle de México de poniente a oriente; sin embargo, hoy sirven primordialmente para transportar aguas de desecho.[59] Ahora las porciones de ellos que fluyen dentro del área de servicio del DF están cubiertas, y así están bajo el nivel del terreno; la mayor parte de las respectivas al Estado de México permanecen descubiertas. A causa de la subsidencia, hoy es necesario bombear el caudal del Gran Canal y los de los sistemas interceptores: Churubusco, Consulado y Viaducto. Aún en casos de lluvias extraordinarias, la capacidad de todo el sistema es holgadamente suficiente para transportar el flujo de aguas municipales residuales durante la época de estiaje.

Gran Canal del Desagüe: durante el estiaje, ésta obra (Fig. 2.2.6) es la componente principal del Sistema General de Drena-

je.[59] Desaloja las porciones septentrional, nororiental y central de la ZMVM; dentro del área de servicio del DF recibe descargas de los ríos de La Piedad (el Viaducto) y Consulado, y en la del Estado de México, de la cuenca de Texcoco a través del canal de la Draga, el río de los Remedios y el Dren Cartagena, en la porción septentrional. Originalmente el flujo era por gravedad; empero, debido a la subsidencia, hoy es necesario impulsar el líquido por medio de once estaciones de bombeo estratégicamente ubicadas a lo largo de sus 47.5 km.[59]

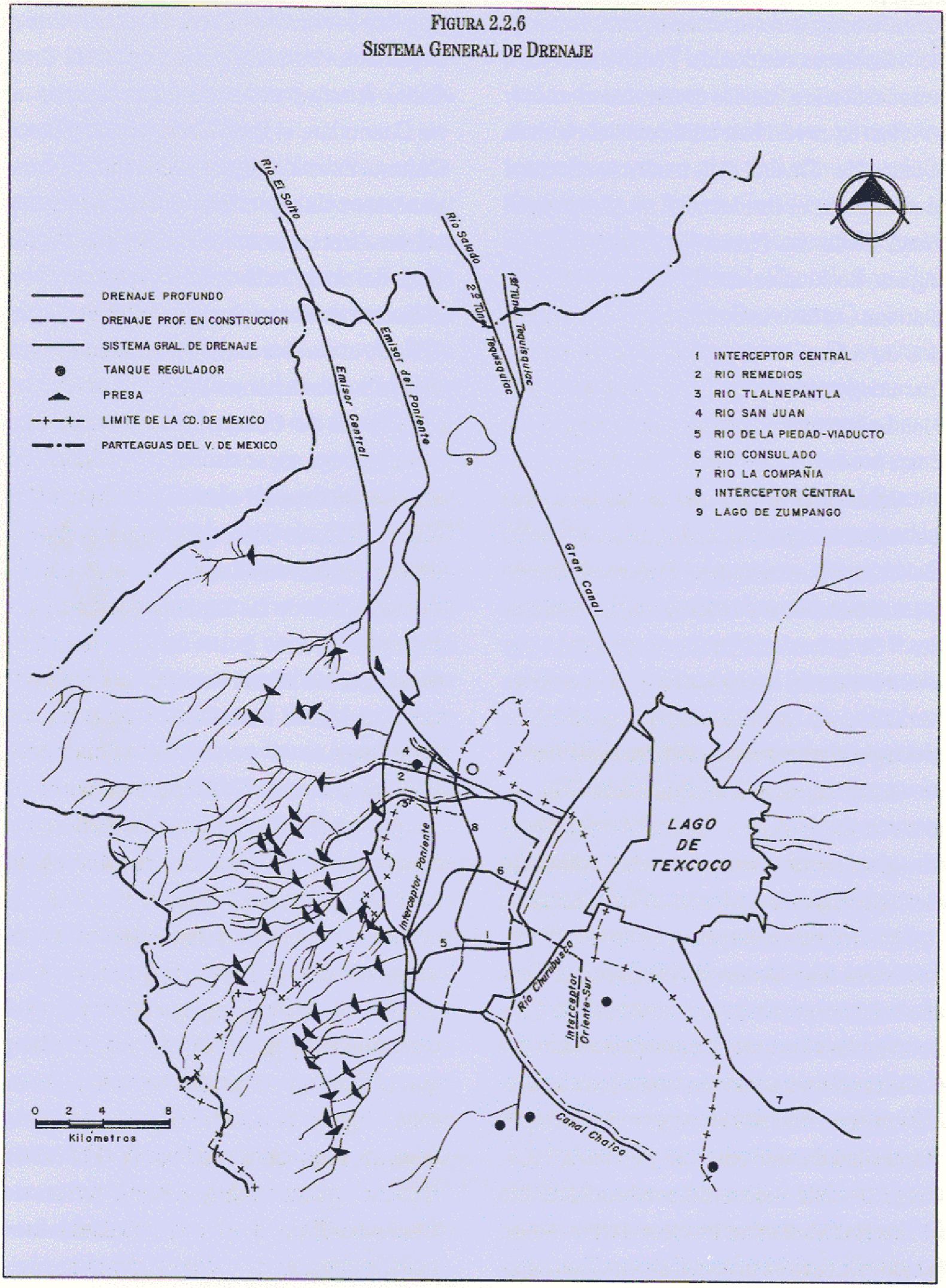
Inicialmente, la capacidad del Gran Canal era de 5 m^3/s en sus primeros 20 km, y de 17.5 m^3/s en el resto. Posteriormente se ha ampliado, y ha transportado un flujo máximo de 130 m^3/s. Sale del Valle de México por los dos túneles de Tequisquiac; la capacidad máxima del más antiguo es 17.5 m^3/s, y 60 m^3/s la del nuevo.[49] Ambos túneles descargan en el río Salado, que a su vez es tributario del río Tula.

Emisor del Poniente: con longitud de 44.3 km, esta obra (Fig. 2.2.6) drena la cuenca de la laguna de regulación Vaso de Cristo. Recibe descargas de aguas de desecho de la zona NZT, dentro del área de servicio del Estado de México, y del Interceptor Poniente, en la del Distrito Federal.[52] En sus primeros 12 km es un ducto cerrado semielíptico, con capacidad de flujo entre 30 y 80 m^3/s.[59] A lo largo de este segmento recibe descargas de los ríos Tlalnepantla y San Javier. Aguas abajo, consiste en un canal abierto, con capacidad variable entre 80 y 130 m^3/s. En esta porción recibe otras pequeñas descargas en la parte septentrional del valle, y luego confluye con el río Cuautitlán. La corriente conjunta de ambos abandona el Valle de México por el Tajo de Nochistongo, que es la tercera salida artificial del valle; finalmente se une al río El Salto.[59] Un componente importante relacionado con el Emisor Poniente es la laguna de Zumpango; es el último vaso de regulación del sistema, localizado al norte de la ZMVM. Controla flujos pico del Emisor Poniente, descargando en el Gran Canal justo antes del nuevo Túnel de Tequisquiac.[52]

Interceptor Poniente: es un constituyente importante que drena el área más alta de la ZMVM: la occidental, con elevación de 3,300 msnm.[61] En esta área, varias presas colectan y regulan el agua de lluvia. Después de estos embalses, toda agua pluvial y de desecho se descarga directamente en el Interceptor Poniente. Fluye de sur a norte y vierte en el Vaso de Cristo. La capacidad máxima de este interceptor es de 25 m^3/s.[46]

Río Churubusco: esta corriente desagua de poniente a oriente las porciones meridional y suroriental del área de servicio del DF.[59] Recibe aportaciones del río San Buenaventura y de los canales Nacional y Chalco; su flujo es de 6 a 8 m^3/s. En su punto de descarga, en la cuenca de Texcoco (Fig. 2.2.6), el caudal se bifurca entre el lago Churubusco y la laguna Horaria. Ambos embalses tienen función regulatoria y sirven como lagunas

FIGURA 2.2.6
SISTEMA GENERAL DE DRENAJE



de oxidación, pues aportan algún tratamiento a las aguas residuales. Posteriormente a estos embalses, las dos corrientes se unen y reciben agua residual adicional del río de la Compañía. Finalmente, mediante el canal de la Draga, el caudal total se vierte en el Gran Canal. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Texcoco opera una porción (aproximadamente 1 m^3/s) del agua del lago Churubusco, y el efluente se usa para riego agrícola.[59]

La cuenca de Texcoco es importante con respecto a la disposición final de aguas de desecho en la ZMVM; además de ser desde su origen un vaso regulador de las avenidas del Valle, ahí se asienta el Proyecto Texcoco para tratamiento y reúso de aguas residuales.[63] Se seleccionó para este propósito por dos razones: 1) la geomorfología y las características de mecánica de suelos del área del lago de este nombre son apropiadas para construir lagunas artificiales con el fin de almacenar y regular grandes volúmenes de aguas residuales, y 2) había suficiente terreno disponible para construir plantas de tratamiento de estas aguas.[63]

Ríos La Piedad (el Viaducto) y Consulado: se encuentran al norte del río Churubusco y cruzando el área de servicio del DF de poniente a oriente, estos dos ríos drenan el área central y descargan directamente en el Gran Canal.[61]

Río de los Remedios: esta corriente capta fluidos de la parte norte de la ZMVM; recibe aguas cloacales de los ríos Tlalnepantla y San Javier.[49,52,59] Desde el Vaso de Cristo fluye hacia el oriente, y descarga en el Gran Canal. A esta parte la desfogan también el río Cuautitlán, el Dren Cartagena y el canal Castera. Estos últimos canales son los componentes más septentrionales del sistema, y vierten directamente en el Gran Canal: aguas abajo del río de los Remedios el primero, y en el Emisor Poniente el segundo.[52] El río Cuautitlán se une a este emisor y sale del valle por el Tajo de Nochistongo.

Río de la Compañía: esta corriente fluvial recoge agua de los municipios del sureste del área de servicio del Estado de México.[59] Desde Chalco, fluye de sur a norte, hacia la cuenca de Texcoco, donde une su descarga a la de las lagunas Churubusco y Horaria. En este punto la denominación del río cambia a Dren General del Valle, y por medio del canal de la Draga descarga en el Gran Canal.

Temporada de lluvias: sistema de drenaje profundo. La época lluviosa ocurre de mayo a octubre, y produce una precipitación media anual de 700 mm. Durante ella acontecen muchas tormentas de alta intensidad y corta duración; tanto así, que es posible que una de tales tormentas produzca de 7 a 10% de la precipitación de todo un año, y que el 50% de ese volumen se precipite en solamente 30 minutos.[51] A causa de esto y del patrón geográfico irregular de las tormentas, fue necesario proyectar el Sistema General de Drenaje de modo que satisficiera los requisitos de capacidad de desalojo

para volúmenes generados por flujos pico muy grandes, y de esta manera se evitaran las inundaciones, que anteriormente sufría con frecuencia la ZMVM.

Durante la temporada de lluvias, el Sistema de Drenaje Profundo –que es parte del Sistema General de Drenaje– entra en funcionamiento, para desalojar la gran afluencia de aguas producida por las tormentas, que se agregan a las municipales de desecho.[59] En virtud de que la capacidad de flujo del sistema utilizado en el estiaje era insuficiente, para enfrentar eficazmente los volúmenes pico de la época de lluvias, se planeó y proyectó el Sistema de Drenaje Profundo. El sistema transporta el fluido de sur a norte, primordialmente por gravedad, y consta de una serie de túneles: unos profundos, de 22 a 217 m, y otros semiprofundos, a menos de 20 m bajo el terreno.[61] Con base en una estimación, correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años, la capacidad máxima de flujo se proyectó para desfogue de 200 m^3/s durante 45 horas; esta capacidad es aproximadamente siete veces la de desalojo de aguas residuales del periodo de estiaje. La primera etapa del sistema entró en operación en 1975; de manera significativa alivió las inundaciones que con frecuencia ocurrían en porciones de la ZMVM. Con la construcción de túneles adicionales, actualmente el sistema está en expansión.

Mediante colectores y estructuras de admisión de sobreflujo, el Sistema de Drenaje Profundo está conectado al de alcantarillado del estiaje.[59] Los colectores están conectados directamente al sistema profundo por medio de tiros verticales con compuertas corredizas que se abren al comienzo de la temporada de lluvias. Tales estructuras se localizan en los interceptores principales del sistema: Gran Canal, Churubusco, Consulado, Viaducto y Los Remedios. Constan de compuertas radiales operadas y reguladas manualmente, con base en el volumen del flujo presente en los interceptores. La operación de las compuertas se determina por la profundidad de la corriente en los interceptores y por el nivel del flujo combinado en los pozos húmedos anexos a las estaciones de bombeo. Una de las mayores estructuras de admisión de sobreflujo se encuentra en el Gran Canal. Consiste en tres compuertas radiales, con capacidad total de 110 m^3/s.[59] Durante el estiaje no se requieren los túneles profundos; por lo tanto, se cierran las compuertas y se efectúa cualquier mantenimiento que se requiera. Los túneles del Sistema de Drenaje Profundo consisten en cuatro interceptores y el Emisor Central:

Interceptor Central. Está localizado en la parte central de la ZMVM; recibe descargas de los ríos La Piedad, Consulado, Remedios, Tlalnepantla y San Javier. Su capacidad máxima es 90 m^3/s, y vierte en el Emisor Central.

Interceptor Central-Poniente. Conecta el Interceptor Poniente (IP) con el Emisor Central. Además del flujo combinado

del IP, el Interceptor Central Poniente recibe descargas de una zona industrial importante (Azcapotzalco). La capacidad máxima de esta obra es 40 m^3/s.[46]

Interceptor Oriente. Se localiza en la porción septentrional de la ZMVM; por medio del Emisor Central transporta parte del flujo del Gran Canal. Es muy importante, pues auxilia a este último. Capacidad máxima: 85 m^3/s.[46]

Interceptor Central-Central. Conecta el Interceptor Oriente con el Interceptor Central. Recibe afluencias excedentes del río Churubusco y del Canal Nacional. Capacidad máxima: 90 m^3/s.[46]

Emisor Central. Esta estructura mayor del Sistema de Drenaje Profundo está ubicada en la parte nororiental del Valle de México. Consiste en un túnel de 49.7 km de longitud, 6 m de diámetro, profundidad mínima de 48 m y máxima de 217 m.[46] Recibe descargas de los interceptores Central, Central-Poniente y Oriente. Se considera que es la cuarta salida artificial de aguas de desecho/pluviales de la cuenca. Su capacidad máxima es 220 m^3/s.[46]

Tratamiento y reúso de aguas de desecho

Dentro de la ZMVM hay en operación 27 plantas tratadoras de aguas residuales: 13 en el área de servicio del DF y 14 en la del Estado de México.[46, 47, 52] La cantidad total de agua sometida a este proceso es de 2.62 m^3/s[46] en la primera, y 1.69 m^3/s en la segunda.[52] El propósito de estas plantas es rehabilitar tales aguas para reúso, claramente distinto al del tratamiento previo a su disposición final, que en la actualidad se exige en muchos países. Considerando que, durante el estiaje, en el DF, el flujo de aguas municipales de desecho es de 26 a 28 m^3/s, sólo aproximadamente el 9.0% de aquél recibe tratamiento.[59] El 91% restante sale del Valle de México sin procesamiento alguno.

En la tabla 2.2.8 se enuncian las características del caudal de aguas residuales durante el estiaje y del caudal combinado durante la temporada de lluvias, cuando sale de la cuenca por el Gran Canal (túneles Tequisquiac).[54] Las cifras referentes a los varios contaminantes son la concentración promedio relativa a 1992. Para comparación, se proporcionan también los datos correspondientes a aguas residuales crudas (antes del tratamiento) municipales típicas de los EUA, señalando los valores considerados bajos, medianos o altos, y el promedio de dicho país.[64]

En la tabla 2.2.8, se puede ver que el nivel de muchos de los contaminantes en el flujo de aguas de desecho/combinado durante ambas temporadas es similar, y en varios casos mayor que el de uno típico de EUA. La concentración muy elevada de sólidos totales, sólidos disueltos totales y fósforo, y en proporción menor nitritos y nitratos, podría ser resultado de descarga industrial, a pesar de que existe un control.

En la tabla 2.2.9 se enuncian las plantas de tratamiento ubicadas en el área de servi-

TABLA 2.2.8

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS DE DESECHO DEL GRAN CANAL A LA SALIDA DEL VALLE DE MÉXICO

Contaminantes (*)	*En estiaje*[54]	*En época lluviosa*[54]	*Rango de concentración*[64] *bajo*	*medio*	*alto*	*Promedio EUA*[64]
Sólidos totales	1,800	1,800	350	720	1,200	–
Total de sólidos disueltos	1,611	1,445	250	500	850	–
Total de sólidos suspendidos	179	357	100	220	350	192
Total de sólidos asentables, (ml/l)	2.0	2.33	5	10	20	–
Nitratos, como N	0.30	0.30	0	0	0	0.60
Nitritos, como N	0.06	0.06	0	0	0	–
Fósforo total como P	30	30	4	8	15	6.80
DBO5	240	187	110	220	400	181

(*) mg/1, salvo que se indique otra cosa.

cio del DF, y en la 2.2.10 las del Estado de México, así como su capacidad instalada, operacional actual, ubicación (norte, sur, etc.), tipo de tratamiento y práctica de reúso.[46,47,52] Por alguna razón, la capacidad operativa actual de las 13 plantas de tratamiento del Distrito Federal (Tabla 2.2.9) es de sólo 55% de la instalada: 2.621 *vs.* 4.623 m^3/s.[46] En todas estas plantas se efectúa un tratamiento secundario, utilizando el proceso de lodo activado. Donde se realiza el tratamiento terciario este consiste en coagulación/floculación, sedimentación, filtración con arena, y desinfección. Para esta última, en cualquiera de las plantas o puntos de reúso se agrega cloro, para obtener un residual total de 1 mg/l.

En el DF, las plantas de tratamiento están localizadas de manera que sirvan a zonas específicas dentro del área de servicio. Por lo tanto, es probable que en cada planta las características de las aguas de desecho que se procesan sean diferentes, según sea su procedencia: doméstica o industrial. A esta diversidad es atribuible que el desempeño sea deficiente en tres plantas: El Rosario, Acueducto de Guadalupe y Colegio Militar.[54] Se ha informado que los mayores problemas vinculados con esta deficiencia operativa son: a) alto contenido de grasa, aceites, fósforo, nitritos y nitratos; b) baja remoción de alcalinidad y dureza, y c) alta conductividad eléctrica. Se sabe que la con-

TABLA 2.2.9

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DENTRO DEL ÁREA DE SERVICIO DEL DISTRITO FEDERAL

Planta	*Capacidad según diseño (m^3/s)*	*Capacidad actual (m^3/s)*	*Ubicación*	*Tipo de tratamiento*	*Práctica de reuso*
Chapultepec	0.160	0.106	W	Secundario	ER, IAV
Coyoacán	0.400	0.336	S	Secundario	ER, IAV
Ciudad Deportiva	0.230	0.080	E	Secundario	IAV
San Juan de Aragón	0.500	0.364	N	Secundario	ER, IAV
Tlatelolco	0.022	0.014	N	Secundario	IAV
Cerro de la Estrella	3.0	1.509	E	Secundario	RAI, RA
Bosque de las Lomas	0.055	0.027	W	Secundario	IAV
Acueducto de Guadalupe	0.08	0.057	N	Secundario	IAV
El Rosario	0.025	0.022	N	Terciario	ER, IAV
Tlaxialtemalco	0.075	0.055	S	Terciario	ER, RAI
Reclusorio Sur	0.030	0.013	S	Secundario	ER, IAV
Iztacalco	0.013	0.010	E	Terciario	ER, IAV
Colegio Militar	0.020	0.018	S	Secundario	ER, IAV
Capacidad total	4.623	2.621			

ER: embalses recreativos con contacto incidental
RAI: recarga del acuífero por inyección
IAV: irrigación de áreas verdes
RA: riego agrícola

centración elevada de grasa y aceite causa problemas operacionales con una variedad de procesos de tratamiento secundarios y terciarios. Es importante hacer notar que, de estas tres plantas, sólo en la de El Rosario se efectúa tratamiento terciario. Por la operación unitaria y por el proceso empleado, se puede esperar que sólo la concentración de fósforo se reduzca en esta planta. La remoción de nitritos, nitratos, etc., requeriría el uso de otros métodos avanzados de tratamiento. Se reporta que la calidad del efluente tratado en las otras 10 plantas satisface los requerimientos para su propósito específico de reúso.

Dentro del área de servicio del DF, la distribución por destino de reúso de los 2.62 m^3/s de aguas residuales tratadas (Tabla 2.2.9) es, 83%: irrigación de áreas verdes y embalses recreativos; 10% industrial; 5% riego agrícola, y 2% comercial, por ejemplo lavado de automóviles.[46] Se informa que en el área de servicio del Estado de México la mayor parte de las aguas de esta índole

TABLA 2.2.10

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DENTRO DEL ÁREA DE SERVICIO DEL ESTADO DE MÉXICO

Planta	*Capacidad instalada (m^3/s)*	*Capacidad actual (m^3/s)*	*Ubicación*	*Tipo de tratamiento*	*Práctica de reuso*
Pintores (Naucalpan)	0.005	0.005	NW	Secundario	IAV
Naucalli (Naucalpan)	0.040	0.030	NW	Secundario	IAV
S.J. Ixhuatepec (Tlalnepantla)	0.150	0.030	NE	Secundario	RI
Nezahualcóyotl (Nezahualcóyotl)	0.200	ND	E	Secundario	IAV
U. de Chapingo (Chimalhuacán)	0.040	0.040	E	ND	IAV
Lago de Texcoco (Chimalhuacán)				Secundario	RA
(dos plantas)	1.50	1.000	E	Terciario	RL
Termoeléctrica Valle de México (Ecatepec)	0.450	0.250	N	Secundario	RI
San Cristóbal (Ecatepec)	0.400	0.250	N	Secundario	RI
Lechería (Cuautitlán	0.030	0.010	N	Secundario	RI
Ford (Cuautitlán)	0.030	0.030	N	Secundario	RI
Club de Golf Chiluca (Atizapán)	0.020	0.020	NW	ND	RI
Revillagigedo Chiluca (Atizapán)	0.020	0.020	NW	ND	RI
La Estadía Chiluca (Atizapán)	0.020	0.020	NW	ND	RI
Capacidad Total	2.905	1.705			

IAV: irrigación de áreas verdes; RA: riego agrícola; RI: reuso industrial; ND: no disponible; RL: recarga de lagos

se reúsan en la industria, pero no se dispone de mayor información.[49]

En el caso de las 14 plantas del Estado de México (Tabla 2.2.10), se puede notar que 7, es decir el 50%, están laborando por debajo de su capacidad instalada de flujo,[52] debido a que todas ellas son operadas por alguna industria o por el municipio en que están ubicadas, no fue posible obtener información de su operación y eficiencia. El manejo, el tratamiento y la disposición final de la gran cantidad de sólidos/lodo normalmente generados en estas plantas constituyen un problema importante. La única información disponible in-

dicaría que en ambas áreas de servicio el lodo resultante se retorna directamente al sistema de alcantarillado, sin tratamiento alguno.

2.3. Descripción del acuífero

Se dedica esta sección y la siguiente al sistema acuífero de la ZMVM, debido a su importancia como fuente de suministro, pues de acuerdo con la sección 2.2, es la principal en la actualidad. Entre los temas que se tratarán, se incluyen la evolución de su explotación hasta el presente, y sus posibilidades futuras. Nos ocuparemos exclusivamente de la parte del acuífero localizada en la subcuenca sur (ver plano base; Fig. 1.4, capítulo 1), que es la utilizada actualmente por la ZMVM; se extiende al sur de las sierra de Guadalupe y no es completamente independiente de la parte norte, ya que tiene conexión hidráulica con ella, principalmente a través de la zona oriente del volcán de Chiconautla.

2.3.1. Marco geológico

La descripción que se presenta a continuación, sintetiza el estado actual del conocimiento de la estratigrafía del subsuelo del ZMVM. Como se mencionó en la sección 2.1 de este capítulo, aunque desde hace mucho tiempo que se estudia el subsuelo del Valle de México, gran parte del conocimiento que se tiene de las zonas más profundas es debida a estudios recientes que se emprendieron a consecuencia del macrosismo de septiembre de 1985, y que han producido-mo dificaciones importantes de la geología de la ZMVM.[43-45, 65] La descripción que se da a continuación está basada en la revisión y síntesis realizada por Mooser y Molina (Figs. 2.3.1 a 2.3.3).[45]

Arcillas lacustres superficiales

El área cubierta por estos estratos es cercana al 23.3% (848 km^2) de la superficie total de la subcuenca (3,632 km^2). En el norte son delgados (Fig. 2.3.2); hacia el sur, en los frentes de la sierra Chichinautzin, alcanzan espesores de 200 a 300 m, y están interestratificados con lavas basálticas. En el centro de la ciudad de México, en el interior de la arcilla y a una profundidad de alrededor de 30 m, existe un estrato apropiadamente llamado "capa dura", que durante muchos años se ha usado para cimentar edificios grandes mediante pilotes. En otras partes del valle existen capas similares a profundidades diversas. El examen de núcleos provenientes de pozos revela que esta roca es un depósito de ceniza volcánica de finura similar a un limo, densa y cementada, y de permeabilidad suficiente para funcionar como acuífero. Este estrato es capaz de soportar pozos de gasto reducido y en él se inició la explotación del agua subterránea en la ciudad de México, en el siglo XIX.

Rellenos aluviales

Alcanzan espesores máximos de 300 a 400 m. Son importantes en el sur y se acuñan en el norte. En el poniente sobreyacen a la base de la formación Tarango, donde sepultan una

red de valles erosionados; en el centro descansan sobre aglomerados volcánicos estratificados correlacionables con la formación Tepozteco, y también sepultan una red de valles.

Las propiedades hidráulicas de esta formación se han estudiado ampliamente y se les conoce bien. Poseen alta permeabilidad y capacidad de almacenamiento, por lo que constituyen un acuífero de buenas características.

Basaltos del Pleistoceno y Reciente

Los basaltos de la hilera volcánica de la sierra de Santa Catarina están interestratificados con los depósitos lacustres (1) y con los rellenos aluviales (2).

Similarmente, en el sur las lavas de la sierra Chichinautzin están interestratificadas con los depósitos lacustres (1) y con los rellenos aluviales (2); también forman la potente barrera que en el Pleistoceno Superior, hará unos 600,000 años, represó el antiguo sistema doble de valles que drenaba la cuenca hacia la parte alta del río Amacuzac. Estas formaciones constituyen acuíferos excelentes, ya que su permeabilidad y capacidad de almacenamiento secundarias, debidas a fracturas, son muy altas.

FIGURA 2.3.1
SISMOESTRATIGRAFÍA DEL VALLE DE MÉXICO

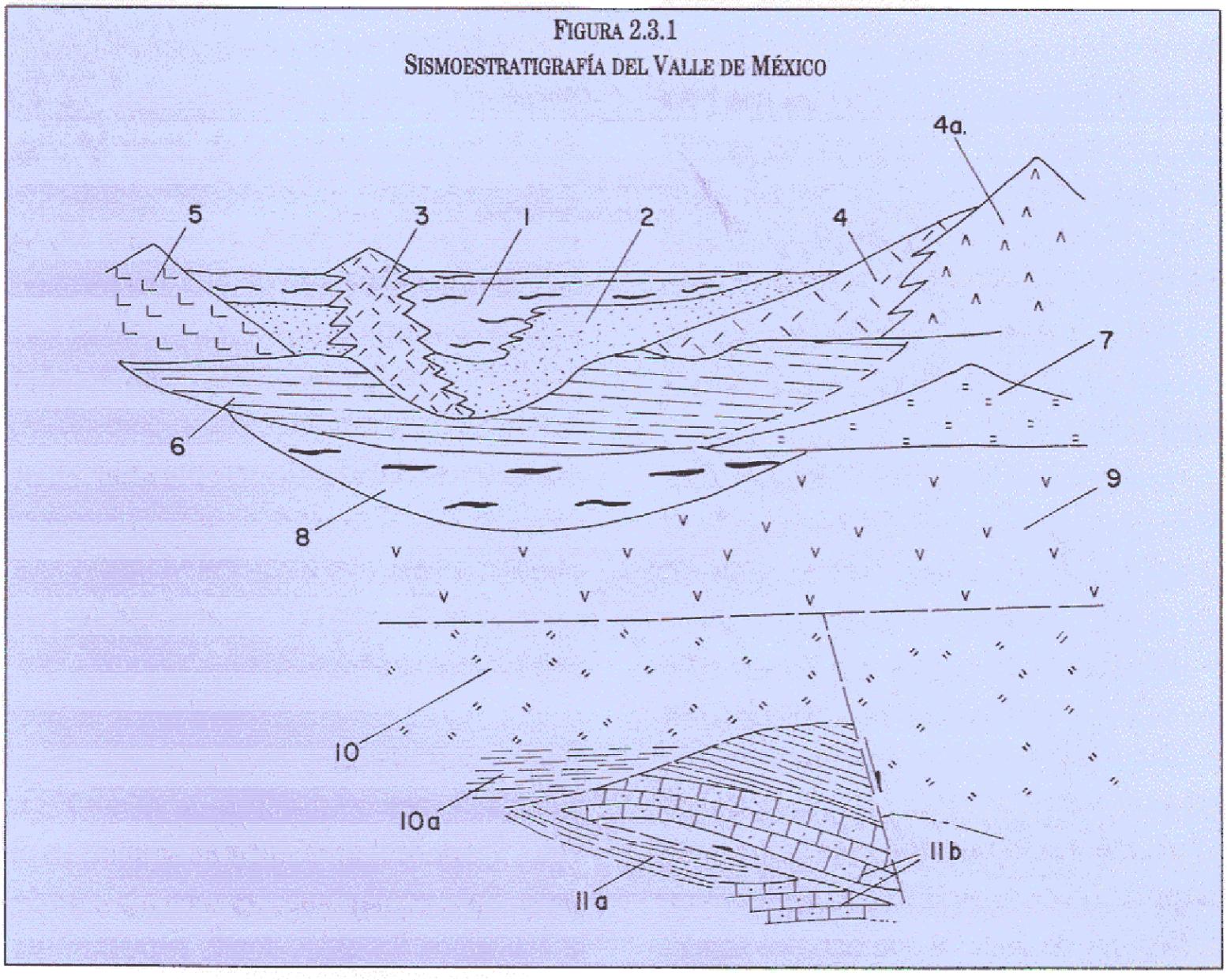
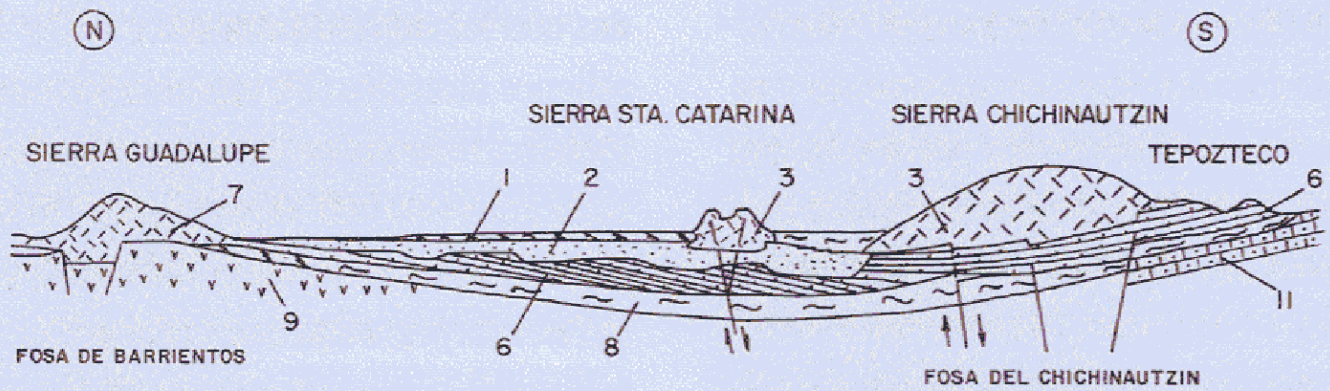


FIGURA 2.3.2

SECCIÓN GEOLÓGICA DEL MODELO CONCEPTUAL (NORTE - SUR)

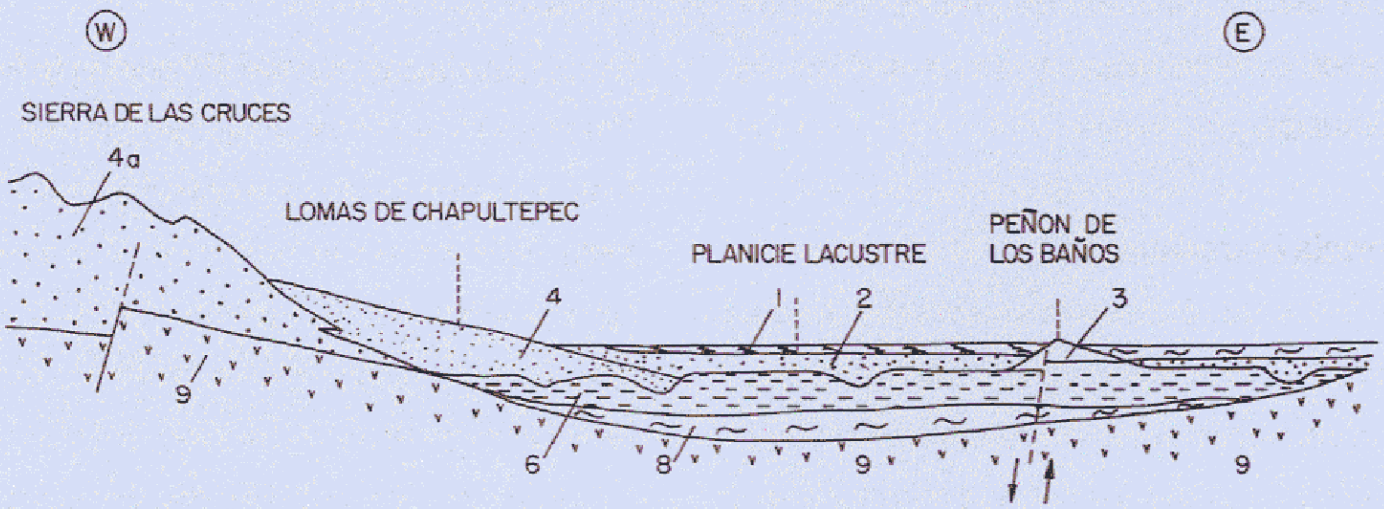


1 Acuitardo
2,3 Acuífero superior somero
6,7 Acuífero superior profundo
8 Acuicludo

1 Arcillas lacustres
2 Rellenos aluviales
3 Basalto del Peistoceno y Reciente
6 Tepozteco
7 Sierra de Guadalupe
8 Depósitos lacustres del Plioceno
9 Vulcanitas del Mioceno
11 Calizas del Cretácico

FIGURA 2.3.3

SECCIÓN GEOLÓGICA DEL MODELO CONCEPTUAL (OESTE - ESTE)



1 Acuitardo
2,4,5 Acuífero superior somero
6,7 Acuífero superior profundo
8 Acuicludo

1 Arcillas lacustres con capa dura
2 Rellenos aluviales
4 Formación Tarango
4a Sierra de Las Cruces
5 Peñón de Los Baños

6 Tepozteco
8 Depósitos lacustres del Plioceno
9 Vulcanitas del Mioceno

Formación Tarango

La formación Tarango (4) representa los abanicos volcánicos que se extienden en las estribaciones de las sierras elevadas (4a), que limitan la cuenca al oriente y al poniente.

Consiste en tobas, flujos piroclásticos, lahares, depósitos fluviales, capas de piedra pómez y suelos (4). Estos materiales se encuentran principalmente en la base de los depósitos aluviales (2), aunque sus elementos superiores (arenas azules) están interestratificados con ellos. La formación Tarango también posee buenas propiedades hidráulicas.

Cuerpos volcánicos basáltico-andesíticos

Elementos que forman las elevaciones aisladas del cerro de la Estrella, del peñón de los Baños, del cerro de Chimalhuacán y de los cuerpos dómicos basálticos del sureste de la sierra de Guadalupe. Estos cuerpos yacen directamente sobre la secuencia estratificada.

Secuencia estratificada

Depósitos volcánicos claramente estratificados que progradan del centro de la cuenca hacia el sur, con espesores en el norte de 100 a 200 m, y que en el sur aumentan hasta 600 m. Estos depósitos desaparecen bajo la sierra Chichinautzin y afloran en la sierra del Tepozteco, al oriente de Cuernavaca. El conocimiento que se tiene de estos estratos es reducido. De afloramientos en otras partes, se les conoce como porosos y con permeabilidad secundaria, debido principalmente a fracturas. Existen algunos pozos que alcanzan esta formación, y en ellos se han realizado pruebas de bombeo. Los valores que se han obtenido para la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico indicarían que la importancia de esta formación en el comportamiento hidráulico no es grande. Sin embargo, hacen falta más estudios para llegar a conclusiones definitivas.

Sierras pliocénicas

Elevaciones volcánicas de mediana altura que en parte están intercaladas y parcialmente en la base de la secuencia estratificada (6). Sus elementos en la cuenca de México son las sierras de Tepotzotlán, de las Pitayas, de Guadalupe y de Patlachique; son conjuntos de volcanes estratificados y de domos espectaculares.

Depósitos lacustres del Plioceno inferior

Formación que consiste en arcillas lacustres, generalmente de consolidación avanzada. Afloran en el norte de la cuenca por Huehuetoca, Taximay y Requena. Hacia el sur desaparecen bajo los rellenos aluviales (2) y las lavas pliocénicas intermedias y ácidas de las sierras de Tepotzotlán y de Guadalupe (7). Se registran espesores de 200 a 300 m bajo la ciudad de México, y subyacen a la secuencia estratificada (6). Al sur de la cuenca afloran bajo los elementos orientales de la sierra del Tepozteco. Su reducida permeabilidad, aunada a su escasa

capacidad de almacenamiento debida a lo avanzado de su consolidación, le confieren características de acuicludo. Sin embargo, el conocimiento de esta formación aún es insuficiente.

Vulcanitas del Mioceno

Forman un grueso paquete de rocas lávicas, clásticas y lacustres, generadas a consecuencia de las primeras erupciones volcánicas ligadas al principio de la subducción de la Placa de Cocos. Sus elementos más elevados afloran poco en el centro de la cuenca de México. Forman las elevaciones volcánicas de Barrientos y del cerro del Tepeyac (domo), en el norte de la ciudad. Parecen constituir eminencias dirigidas al NNO, en cuyos espacios intramontanos se acumularon la secuencia estratificada (6) y los depósitos lacustres del Plioceno (8).

Vulcanitas del Oligoceno

Importantes espesores de vulcanitas que se adscriben al Oligoceno, subyacen a la formación anterior (9). Afloran en muy pocos puntos de la cuenca: en el centro poniente, en la sierra del Tigre (Atizapán de Zaragoza); y en el centro oriente, en la sierra de Tlaixpan (Texcoco).

Ambas elevaciones representan calderas que como la mayoría de los elementos de esta época, están característicamente falladas al NNO. Así, el graben de Mixhuca, principal estructura tectónica del Oligoceno, se extiende bajo la ciudad de México; irrumpe desde la estribación septentrional de la sierra Chichinautzin hacia el NNO. La traza del flanco oriental de este graben se sumerge bajo del cerro de La Estrella y su flanco occidental aflora en la sierra del Tigre.

Los depósitos de la formación Balsas (10a): tobas, paleosuelos, yesos, conglomerados y lavas, no se distinguen sísmicamente, por lo que en esta descripción están incluidas en las vulcanitas del Oligoceno (10).

Basamento sedimentario marino

Bajo las vulcanitas de la cuenca de México se encuentran formaciones marinas del Cretácico; están plegadas y cabalgadas al oeste, hecho discernible en los perfiles sísmicos. Asimismo, en los sismogramas analizados por Mooser y Molina,[45] es bastante reconocible el contacto de las vulcanitas (incluyendo la formación Balsas (10a) en la base del complejo oligocénico) con lutitas, margas (11a) y calizas marinas (11b). Dos de los cuatro pozos perforados por Pemex alcanzaron este basamento, lo cual les permitió a dichos autores[45] identificar en la mayoría de las líneas sísmicas el contacto vulcanitas-depósitos marinos.

2.3.2. Modelo conceptual

Basándose en la columna estratigráfica es posible establecer una división en lo que a las propiedades hidráulicas se refiere. En las figuras 2.3.2 y 2.3.3 se presentan dos secciones del modelo hidrogeológico, el cual puede conceptualizarse como sigue:

- Acuitardo superior elemento 1
- Acuífero principal elementos 2-7
- Acuicludo inferior elemento 8
- Unidades independientes elementos 9-11

Acuitardo superior

Desde el punto de vista hidráulico, las arcillas lacustres superficiales (1) constituyen acuitardos, debido a su baja permeabilidad y alta capacidad de almacenamiento, ya que su porosidad es frecuentemente superior al 90%.[14] Por otra, parte los estratos arcillosos, junto con las capas de cenizas volcánicas o capas duras alojadas en su interior, forman un sistema de acuíferos semiconfinados. En él la *capa dura* funciona como acuífero principal, limitado superior e inferiormente por acuitardos. A la alta compresibilidad de las arcillas que constituyen los acuitardos de este sistema se deben los grandes asentamientos que ha provocado el bombeo de las aguas subterráneas.

El sistema de acuitardos que recubre al valle constituye un semiconfinamiento para el sistema acuífero que le subyace. Sin embargo, los estratos arcillosos semiconfinantes existen solamente en parte de la extensión horizontal del acuífero, por lo que originalmente solamente en el 23% del área, éste funcionaba como semiconfinado, y en el resto como libre. Esta observación se refiere a las condiciones inalteradas del sistema acuífero, antes de que se iniciara su explotación, pues debido al descenso de los niveles piezométricos, en la actualidad el área en que funciona como libre se ha ampliado.

Acuífero principal

Éste es el acuífero actualmente en explotación. En su parte superior está confinado por el acuitardo superior (1), y en su porción inferior por los depósitos lacustres del Plioceno (8). Lo integran sobre todo elementos granulares: rellenos aluviales (2) y la formación Tarango (4); y cuerpos lávicos: basaltos del Pleistoceno-Reciente (3), altamente permeables, y cuerpos volcánicos basáltico-andesíticos (5), medianamente permeables. Mooser y Molina[45] consideran a la formación Tepozteco (6) y a la sierra de Guadalupe (7), como partes integrantes del acuífero principal, y las agrupan en un "acuífero superior profundo". Sin embargo, la escasa información disponible indica que las propiedades hidráulicas de esa formación (6) son considerablemente inferiores a las otras formaciones de este acuífero. Por otra parte, la sierra de Guadalupe (7) participa en el sistema hidráulico subterráneo, solamente en la medida en que posee permeabilidad secundaria, debido a fracturamientos, los cuales no son tan abundantes como en la sierra Chichinautzin.

Acuicludo inferior

En la conceptualización del sistema hidráulico subterráneo presentada aquí se ha tomado como límite inferior a los depósitos lacustres del Plioceno (8), que tienen permeabilidad muy reducida, espesores de 200 a 300 m, y

cuyo funcionamiento hidráulico es el de un acuicludo.

Otras unidades independientes

En el modelo conceptual presentado, Mooser y Molina,[45] se proponen otras dos unidades hidráulicas: un acuífero medio (elementos 9-10) y un acuífero profundo (elemento 11b), separados por un elemento muy poco permeable (la formación Balsas y las margas y lutitas del Cretácico Superior). Sin embargo, en el presentado aquí, estas unidades no se han incluído por las razones que se explican a continuación. Las vulcanitas del Mioceno (9) y del Oligoceno (10) deben ser esencialmente impermeables, debido a la alta compresión a que están sometidas, y aunque debido al tectonismo a que están sujetas pueden poseer permeabilidad secundaria, su aislamiento con respecto a las formaciones actualmente en explotación las hace independientes de la zona de estudio, y su importancia estaría limitada al flujo regional.

En el Valle de México no se han perforado pozos de prueba o producción, que alcancen la secuencia carbonatada que constituye el acuífero profundo; tampoco existen afloramientos de esta formación en el valle. Donde se le ha observado en afloramientos fuera del valle, es porosa y permeable, debido a carsticidad, y con todas las características de un buen acuífero. De hecho, en muchos lugares se le explota. La función de este acuífero en el régimen subterráneo de la ZMVM es una cuestión técnica controvertida. Se ha sugerido que bajo la sierra Chichinautzin, drena agua subterránea del Valle de México hacia los manantiales de los valles de Yautepec y Cuautla. Sin embargo, si la formación Balsas (10a) y otros sedimentos marinos que sobreyacen al acuífero profundo constituyen acuitardos efectivos, esta secuencia aislaría al acuífero profundo del sistema hidráulico subterráneo de la ZMVM.

Se debe enfatizar que aún existen muchas dudas que deben aclararse; por esta razón tiene gran importancia continuar el estudio de estas formaciones y de su comportamiento hidráulico.

2.3.3. Zonas de recarga

La mayoría de las rocas que forman la parte meridional de la ZMVM son permeables, algunas de ellas en grado extremo. La erupción de los volcanes que formaron la sierra Chichinautzin determinó un cambio drástico en la hidrogeología del valle. En primer lugar, el drenaje hacia el sur se bloqueó, y la cuenca se convirtió en endorreica. En segundo lugar, el magma o roca fundida era de composición basáltica; es decir, carecía de sílice, y las rocas que cristalizaron no contienen cuarzo libre. La viscosidad del magma basáltico es menor que la del magma riolítico de todas las erupciones anteriores ocurridas en el valle, de manera que se extruyó como flujo de lava y no como ceniza o fragmentos volcánicos, del tipo que forman las rocas más antiguas. Mientras que las rocas de composición riolítica se vuelven permeables princi-

palmente debido a fracturamiento, en los basaltos hay muchos procesos que generan alta permeabilidad. Así, dondequiera que los basaltos del volcán Chichinautzin están bajo el nivel freático constituyen acuíferos excelentes.

La sierra Chichinautzin es la zona de recarga más importante del acuífero, como los pozos de Xochimilco lo han corroborado. En casi todas las tierras altas el escurrimiento es casi nulo. La vegetación es escasa, está constituida principalmente por arbustos del desierto y pastos, aunque aún se pueden reconocer vestigios de bosques de pinos. La cubierta de suelo es delgada o está ausente en grandes áreas donde los basaltos afloran, excepto por muy pequeños canales y depósitos pantanosos.

En los pozos que se han perforado en la parte alta del Chichinautzin el nivel freático es muy profundo (250m); esta condición parece ser general en toda esa zona. Una superficie freática profunda casi siempre indica buen drenaje subterráneo, que se explica por la existencia de rocas altamente permeables. Las manifestaciones más importantes de descarga de agua subterránea son los manantiales de Xochimilco, área en la que en años recientes se han construido algunos de los pozos más productivos de la ZMVM. La extensa zona de este lago es una indicación de la liberación difusa de aguas subterráneas sobre una gran área, cuyo caudal últimamente se ha reducido debido a explotación intensiva de los pozos en esa área.

Las otras montañas al oeste de la ZMVM son también zonas de recarga, si bien no tan importantes, en términos cuantitativos, como la sierra Chichinautzin, pues debido al origen y a la composición de las rocas que las forman no son tan permeables. Sin embargo, la interpretación frecuente de observaciones de campo en el sentido de que estas rocas tienen alta permeabilidad debida a fracturamientos, está soportada por varias líneas de evidencia. En muchos lugares la superficie freática es profunda, lo cual nuevamente indica buen drenaje natural. Túneles profundos para desviar el escurrimiento de las tormentas han producido grandes volúmenes de infiltración de agua subterránea. En algunos de los pocos lugares donde se ha perforado (Castañeda, Totolapa), han resultado pozos productivos. No hay duda de que en estas montañas ocurre recarga considerable.

Por otra parte, en algunas de las tierras altas son abundantes manantiales y corrientes permanentes; estas manifestaciones de descarga de aguas subterráneas constituyen una prueba de que parcialmente la precipitación pluvial que se infiltra emana localmente, y no recarga al acuífero. Es de sospecharse que en buena parte de la sierra Nevada y de la sierra de Río Frío prevalecen condiciones similares, aunque en esa zona se ha realizado poco trabajo de campo.

Más abajo, en las partes media y baja de la montaña, las extensiones de las pendientes del piamonte, a las que subyace la formación Tarango (Figs. 2.3.1 a 2.3.3), tie-

nen todas las características de buenas zonas de recarga. Además ahí hay muy pocas evidencias de descargas de sistemas de flujo locales, similares a las que ocurren en elevaciones mayores. La superficie freática está a gran profundidad; solamente en cañones muy profundos se encuentran algunos encharcamientos, debidos a las pocas corrientes permanentes que ahí existen. El escurrimiento en el terreno que separa a las corrientes es muy reducido o nulo. Debe mencionarse que alrededor de dos millones de habitantes viven en la zona de recarga de este acuífero, en suburbios nuevos o en crecimiento, principalmente sin servicios sanitarios, adecuados, lo que representa un riesgo considerable para el suministro del agua subterránea.

2.3.4. Sistema de flujo

Parece razonable suponer que, debido a la cubierta de vegetación natural de las montañas, en el estado virgen el escurrimiento directo hacia los lagos era aún menor de lo que es ahora. Si esto fue así, la mayor parte de la precipitación se infiltraba y subsecuentemente se perdía por evapotranspiración, o se convertía en recarga subterránea. Existe evidencia física abundante que demuestra que esta agua subterránea, que en las montañas recargaba al sistema acuífero, se movía hacia el valle, de donde surgía como manantiales cerca de las orillas de los lagos o como descarga difusa en el fondo de los mismos.

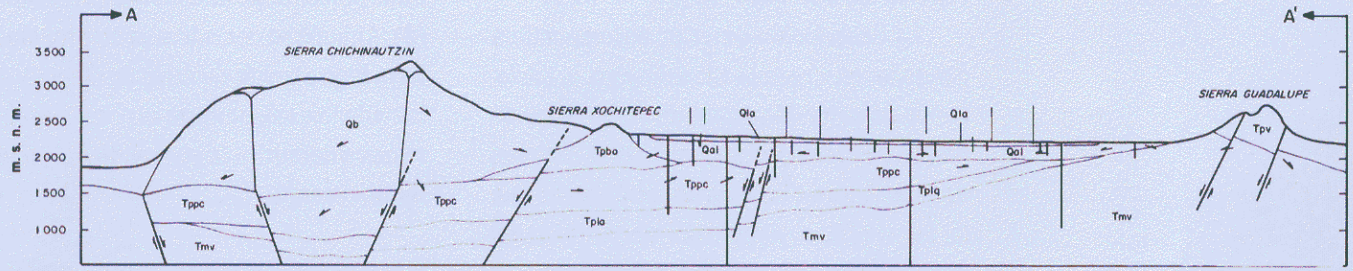
En la figura 2.3.4 se muestra esquemáticamente el sistema de flujo. Los factores que lo controlan son la topografía, la hidroestratigrafía y las propiedades hidráulicas. Bajo la influencia de la gravedad, el agua de lluvia y la nieve derretida que se infiltran en las partes altas, se mueven de manera lateral descendiendo hacia las zonas de descarga en las tierras bajas. Subyacentes a las sierras que limitan el valle existen montañas de agua subterránea, debido a la recarga que en ellas se produce. El movimiento tiende a apartar al agua alejándola de las vertientes en ambas direcciones. La rapidez con que se mueve depende de la permeabilidad de las rocas y del gradiente hidráulico.

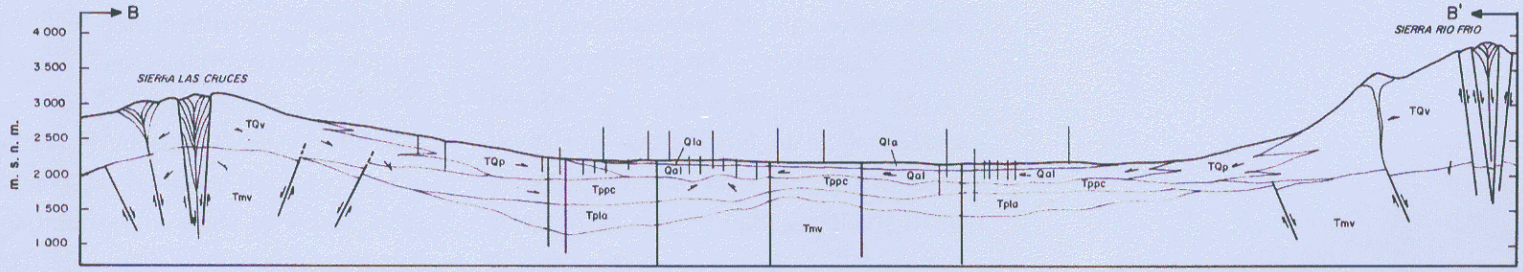
En la zona de recarga el nivel piezométrico decrece con la profundidad, por lo que el gradiente es hacia abajo y el movimiento del agua descendente. En la zona de descarga el gradiente es ascendente y el agua subterránea se mueve hacia la superficie del terreno, creando puntos focales de descarga tales como manantiales y corrientes, o descargas difusas distribuidas sobre zonas amplias de la superficie. En zonas de descarga donde la superficie freática es poco profunda, es previsible que, en condiciones vírgenes, existiera el artesianismo; efectivamente, los primeros pozos que se perforaron a través de la arcilla resultaron artesianos.

Para comprobar este modelo de sistema de flujo subterráneo se ha usado la composición isotópica de las aguas de la cuenca de México. Cerca de la cima de la sierra de las

FIGURA 2.3.4

SISTEMA DE FLUJO





EXPLICACIÓN

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
Qla: Arcillas lacustres recientes	ACUITARDO
Qal: Depósitos saturados del Cuaternario Qb: Raíces volcánicas del Cuaternario	ACUÍFERO PRINCIPAL
TQp: Formación Tarango del Plio-Cuaternario TQv: Raíces volcánicas andesíticas del Plio-Cuaternario	
Tpba: Raíces volcánicas andesíticas y basálticas del Plioceno Superior	
Tppc: Secuencia estratificada Piroclástica del Piroclástica del Plioceno Inferior Tpv: Raíces volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior	UNIDADES SEMIPERMEABLES
Tpla: Depósitos lacustres del Plioceno Inferior	ACUITARDO
Tmv: Rocas volcánicas andesíticas del Miocena	UNIDAD SEMIPERMEABLE

SIMBOLOGIA

- Pozo
- Línea sísmica de reflexión interpretada por Mooser, (1990)
- Línea sísmica de refracción (proyecto Texcoco, (1968)
- Sondeo eléctrico vertical. (UACH, 1991; DGCOH, (1992)
- Dirección de flujo de agua subterránea

ESCALA HORIZONTAL
0 2 4 6 8 10
Km

ESCALA VERTICAL
0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5
Km

Cruces, el contenido de oxígeno-18 y de deuterio de las aguas subterráneas poco profundas es el mismo que el de los acuíferos del valle. En la cuenca, tanto la composición química como la isotópica de otras aguas naturales también es consistente con esta concepción del sistema de flujo.[66]

La descripción anterior corresponde a condiciones vírgenes. Sin embargo, la explotación a que ha sido sometido el sistema acuífero ha producido alteraciones en el régimen de flujo. Una de las más importantes es que en las arcillas el sentido del movimiento del agua se ha invertido en casi toda la ZMVM. Así, lo que antes era descarga difusa a los lagos a través de las arcillas, ahora es recarga al acuífero proveniente del agua almacenada en ellas, que se genera por una depresión piezométrica que ha provocado su explotación. Este efecto es de gran trascendencia por al menos dos motivos: se producen asentamientos del terreno, que en algunas zonas han llegado a ser muy acentuados y crean problemas difíciles para las obras civiles y, por otra parte, al invertirse el sentido de flujo en la capa semiconfinante, se han suscitado condiciones de contaminación potencial del acuífero.

Otros puntos que deben mencionarse respecto a la conceptualización del sistema de flujo se refieren a las fronteras del sistema acuífero de la ZMVM. Al norte el límite está formado por la sierra de Guadalupe, pero existe conexión hidráulica subterránea con la parte septentrional de la cuenca (la cual se extiende hasta Pachuca), a través del volcán Chiconautla y las formaciones aluviales que afloran desde aquél hasta la sierra de Guadalupe (véase plano base en el capítulo I).

Finalmente, en el modelo conceptual aquí adoptado, el límite inferior está constituido por los depósitos lacustres del Plioceno (8). Aunque se considera poco probable que haya flujo a través de estas formaciones, con la evidencia existente no es posible excluir de manera definitiva la posibilidd de que transmitan recarga.

2.3.5. Calidad natural del agua

La calidad natural del agua varía considerablemente según los estratos de donde deriva.

Aguas del acuitardo superior. Después que la sierra Chichinautzin cerró al Valle de México, hasta que en 1607 se construyó el drenaje artificial hacia el norte, la evaporación de los lagos y pantanos, y la transpiración de la vegetación fueron los únicos procesos por los que el valle eliminaba agua. Todos los lagos aumentaron su salinidad, y el más bajo de ellos, el de Texcoco, se volvió salado.

Debido a su origen, el agua de las arcillas lacustres superficiales es de mala calidad, especialmente en la zona del lago de Texcoco y en el área circunvecina. En la actualidad, en los llanos de este lago varios cientos de pozos de baja capacidad bombean salmuera a través de las capas duras. La salmuera tiene concentraciones de hasta 130,000 mg/l de sales disueltas, que se con-

centran y evaporan para usarse en una empresa química.[67]

Aguas del acuífero principal. El acuífero principal, actualmente en aprovechamiento, es el más abundante y el de mejor calidad. Se explota preferentemente en los aluviones del Cuarternario, en los flujos pirocásticos de las lomas y en los basaltos permeables del Chichinautzin. En el estado virgen de la cuenca su calidad era extraordinaria, y en las márgenes de la planicie, al pie de las elevadas zonas de recarga, continúa siéndolo.

Debido a las salmueras de las arcillas, en la zona del lago de Texcoco la calidad del agua subterránea es pobre en el acuífero principal. En el Peñón de los Baños y en algunos otros puntos bastante restringidos, el agua de estas facies no es potable debido a la existencia de manantiales termales mineralizados, pero en el resto del Valle de México ella es de excelente calidad. Sin embargo, el contenido de sales y sólidos remanentes de las aguas producidas por los pozos aumenta desde los pies de las elevaciones hacia el centro de la planicie, por lo que la calidad disminuye al avanzar en esa dirección. Este efecto es correlativo a la dirección en que aumentaba la salinidad de los antiguos lagos.

Aguas del acuífero medio. Por su profundidad y aislamiento, no se conoce directamente la calidad de las aguas del acuífero medio. Debe contener aguas fósiles, como lo indican los manantiales de Oaxtepec, en la parte alta de la cuenca del río Amacuzac.

Aguas del acuífero profundo. El acuífero profundo, se conoce indirectamente por sus extravasaciones hacia la parte alta de la cuenca del río Amacuzac. En esta zona algunos de los grandes manantiales, como el de Las Estacas y el de La Taza, contienen aguas con carbonato de calcio.

Las aguas termales y salobres que brotan en el centro de la cuenca, en los peñones, puede considerarse que ascienden por fallas tectónicas a través de los acuíferos. Por esta razón, en el lado occidental del Peñón de los Baños las agua termales han producido típicos depósitos de travertino. Seguramente, estas aguas termales provienen de las formaciones calizas del basamento mesozoico.

2.4. EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO

Al discutir la explotación del acuífero, es apropiado distinguir los aspectos siguientes: evolución de la extracción en el transcurso del tiempo, consecuencias físicas y químicas de la explotación, balance del agua y, estrategias que podrían aplicarse en el futuro.

2.4.1. EVOLUCIÓN DE LA EXTRACCIÓN

Hasta hace relativamente poco los manantiales del valle suministraban agua de calidad excelente, y hasta hace siglo y medio en la ciudad de México no se utilizó el agua subterránea. A pesar de que poseían la tecnología necesaria para perforar pozos de agua, los españoles no los utilizaron. Segu-

ramente la baja permeabilidad de las arcillas y la mala calidad de sus aguas contribuyó a que así fuera.

Sin embargo, debido a capacidad insuficiente de los acueductos que transportaban el agua desde los manantiales, a mediados del siglo XIX se inició la explotación de los acuíferos, a través de la capa dura. En 1847 se perforó el primer pozo: se localizó en el centro de la ciudad, atravesó la primera capa de arcillas, cuyo espesor ahí fue de 40 m, resultó artesiano y encontró aguas de excelente calidad. Este descubrimiento motivó una efervescencia perforadora; en 1864, Orozco y Berra[68,37] reporta que ya existían 200 pozos artesianos, en 1877 había ya 483, y en 1888, 1,100 de los que se extraía un volumen importante. Es probable que el hundimiento de la ciudad haya empezado desde esa época, pues de 1891 a 1895 hubo hundimientos en el centro de la ciudad de 5 cm por año.[69]

La extracción del agua subterránea debió incrementarse poco hasta 1936, posiblemente debido a la terminación, en 1913, del acueducto que desde los manantiales de Xochimilco conducía un caudal de 2.6 m^3/s.[13] Sin embargo, ya en ese año el déficit municipal de agua había aumentado grandemente debido al rápido crecimiento y modernización de la vida de la ciudad en todos sus aspectos, por lo que el DDF puso en servicio 18 pozos que atravesaban las capas arcillosas superficiales; de esta manera se inició entonces la explotación intensiva del acuífero principal mediante pozos profundos (profundidades de 100-200 m). El número de pozos perforados fue de 19 y 56, en los años 1940 y 1944, respectivamente.

En 1953 se demostró en forma definitiva que el hundimiento del suelo se debía principalmente al bombeo de las aguas subterráneas, por lo que las autoridades impusieron veda a la explotación de los acuíferos dentro del área urbana, la cual aún está vigente. Desde entonces la explotación del agua en el centro de la ciudad se ha limitado severamente y nuevos campos de pozos se han establecido en el sur del valle, especialmente en la subcuenca de Chalco y cerca de Xochimilco; los pozos más viejos han sido reemplazados por otros a mayor profundidad, muchos a 400 m, siguiendo una política general tendiente a explotar las áreas más cercanas a las zonas de recarga y las partes más profundas del acuífero. Muchos de los nuevos pozos están localizados en basaltos.

La distribución de los pozos en los campos de bombeo más antiguos, era más o menos aleatoria, pero en el caso de los nuevos se sigue usualmente un esquema regular de distribución, colocándolos generalmente en terrenos públicos, donde su accesibilidad no presenta problemas. Así, se prefiere colocarlos a lo largo de caminos, calles, líneas de ferrocarril, canales de drenaje de escurrimientos y terrenos baldíos. La figura 2.4.1, muestra la ubicación de los principales campos de pozos en la ZMVM.

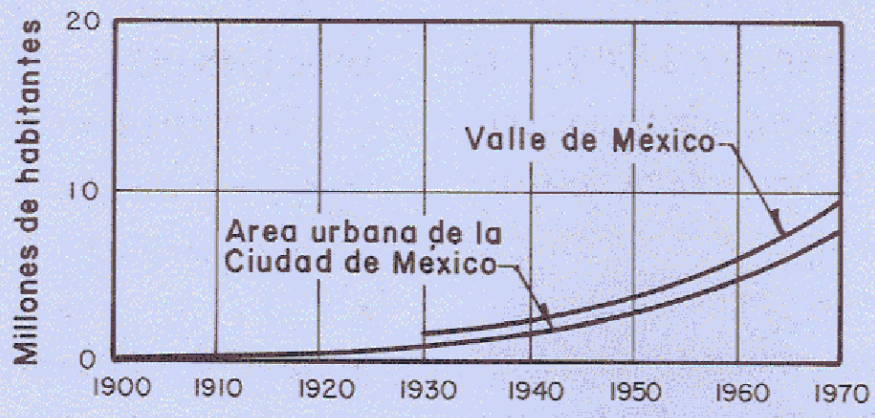
FIGURA 2.4.1

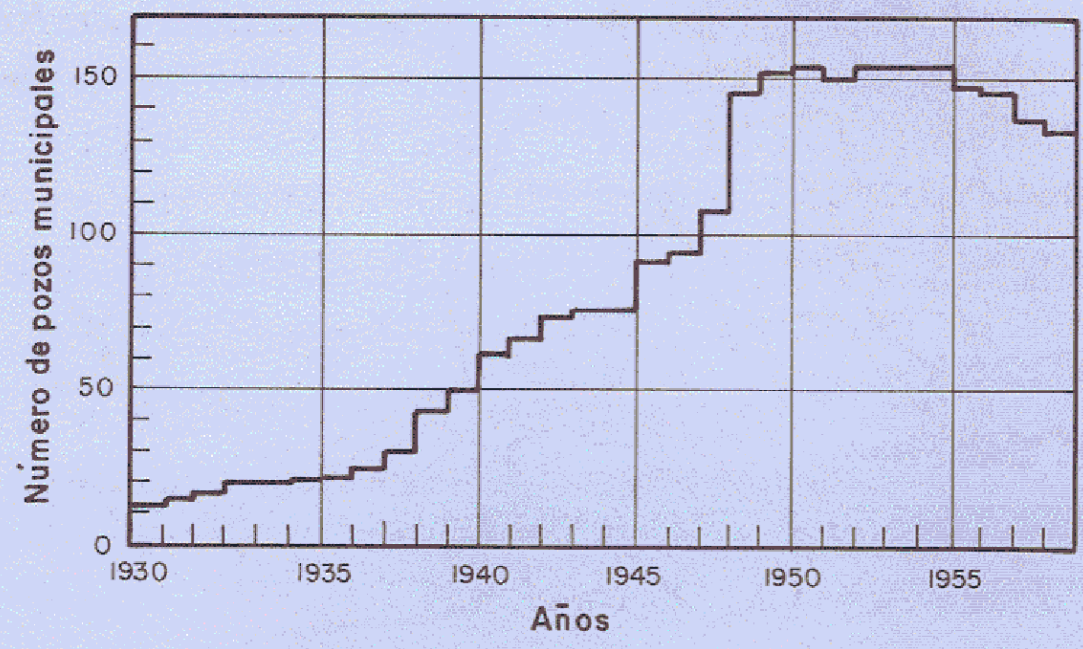
MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PRINCIPALES CAMPOS DE POZOS DE LA ZMVM

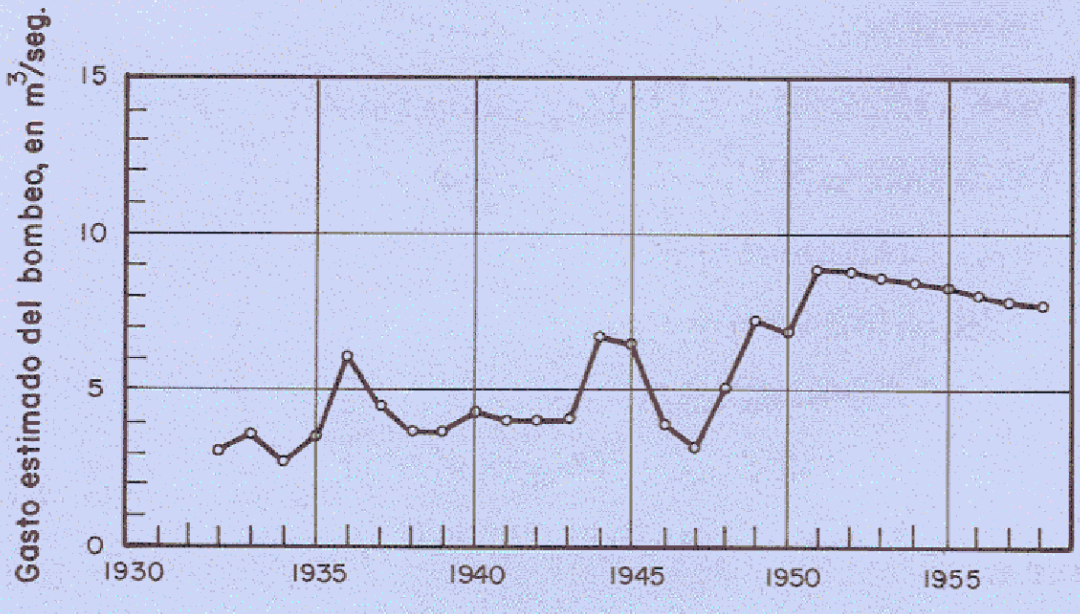


FIGURA 2.4.2

CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN *VS.* POZOS MUNICIPALES Y GASTOS DE BOMBEO







La figura 2.4.2, tomada de Marsal,[1] presenta en la parte superior el crecimiento de la población, en la intermedia el desarrollo de pozos municipales a partir de 1930 y en la inferior la evolución de los gastos de bombeo. En 1948, se produjo un fuerte incremento en el número de pozos municipales motivado por un atraso en la construcción del acueducto del Lerma. Los datos acerca del caudal que se bombeaba y su evolución en el pasado son inciertos. De los pozos particulares que existieron y los que actualmente operan, la información es insuficiente. En 1954 se hizo un muestreo de los pozos municipales y mediante aforos se calculó que el caudal extraído era del orden de 8 m^3/s. Para estimar su variación en el periodo 1933-1958 se estableció una correlación con los gastos de aguas negras en el Gran Canal. Los resultados obtenidos están en la parte inferior de la figura 2.4.2, destacando el notable incremento del lapso 1948-1952.

Por lo que se refiere a la situación actual, la fuente y cantidad suministrada se muestran en la tabla 2.4.1, tomada de la sección 2.2 (Sistemas de suministro público y drenaje de agua). En la actualidad, alrededor del 71% del suministro municipal proviene de pozos de la cuenca de México.

En la tabla 2.4.2, se muestran el número de pozos y sus gastos volumétricos, clasificados de acuerdo con el tipo de usuarios que sirven. Del total de 3,537 pozos, aproximadamente una tercera parte provee los sistemas urbanos con 42 m^3/s, y 2,314 a la industria, al riego y a otras necesidades.

TABLA 2.4.1
FUENTE Y CANTIDAD DE AGUA CRUDA ABASTECIDA AL DISTRITO FEDERAL Y A LAS ÁREAS DEL ESTADO DE MÉXICO (ZMVM)

Fuente de agua cruda	*Distrito Federal* m^3/s	*Estado de México* m^3/s	*Total* m^3/s	*%*
Agua subterránea	27.0	21.3	48.3	80.1
Valle de México	22.7	20.3	43.0	71.3
Lerma	4.3	1.0	5.3	8.8
Agua superficial	8.3	3.7	12.0	19.9
Sistema Cutzamala	7.6	3.0	10.6	17.6
Río Magdalena	0.2	--	0.2	0.3
Presa Madín	--	0.5	0.5	0.8
Manantiales y deshielos	0.5	0.2	0.7	1.2
Abastecimiento total de agua	35.3	25.0	60.3	100

2.4.2. Consecuencias de la explotación

Las consecuencias principales de la explotación del acuífero han sido la declinación de los niveles del agua, el deterioro de su calidad, el hundimiento del terreno en una parte importante de la ZMVM, así como el aumento de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

Abatamiento de los niveles del agua

Las primeras manifestaciones de la declinación de los niveles del agua en los acuíferos de la ZMVM ocurrieron antes de la medición sistemática de los mismos. La extinción de los manantiales de Chapultepec, al oeste de la ciudad, constituye la revelación de este fenómeno; ella fue debida a la extracción del agua subterránea y en general, a las actividades que contribuyeron a la desecación del Valle de México.

Por otra parte, la medición de los niveles del agua se inició desde hace varios decenios aunque al principio no fue sistemática, pues estuvo destinada exclusivamente a proyectos de estudio e investigación de carácter especial. Marsal y Masari[14] realizaron uno de tales estudios, muy importante y completo, que incluyó actividades de campo y laboratorio. También comprendió la instalación de varias docenas de piezómetros multiniveles en numerosas localidades; en éstos se generaron los datos que claramente muestran la relación entre declinación de los niveles del agua subterránea y la subsidencia del terreno.

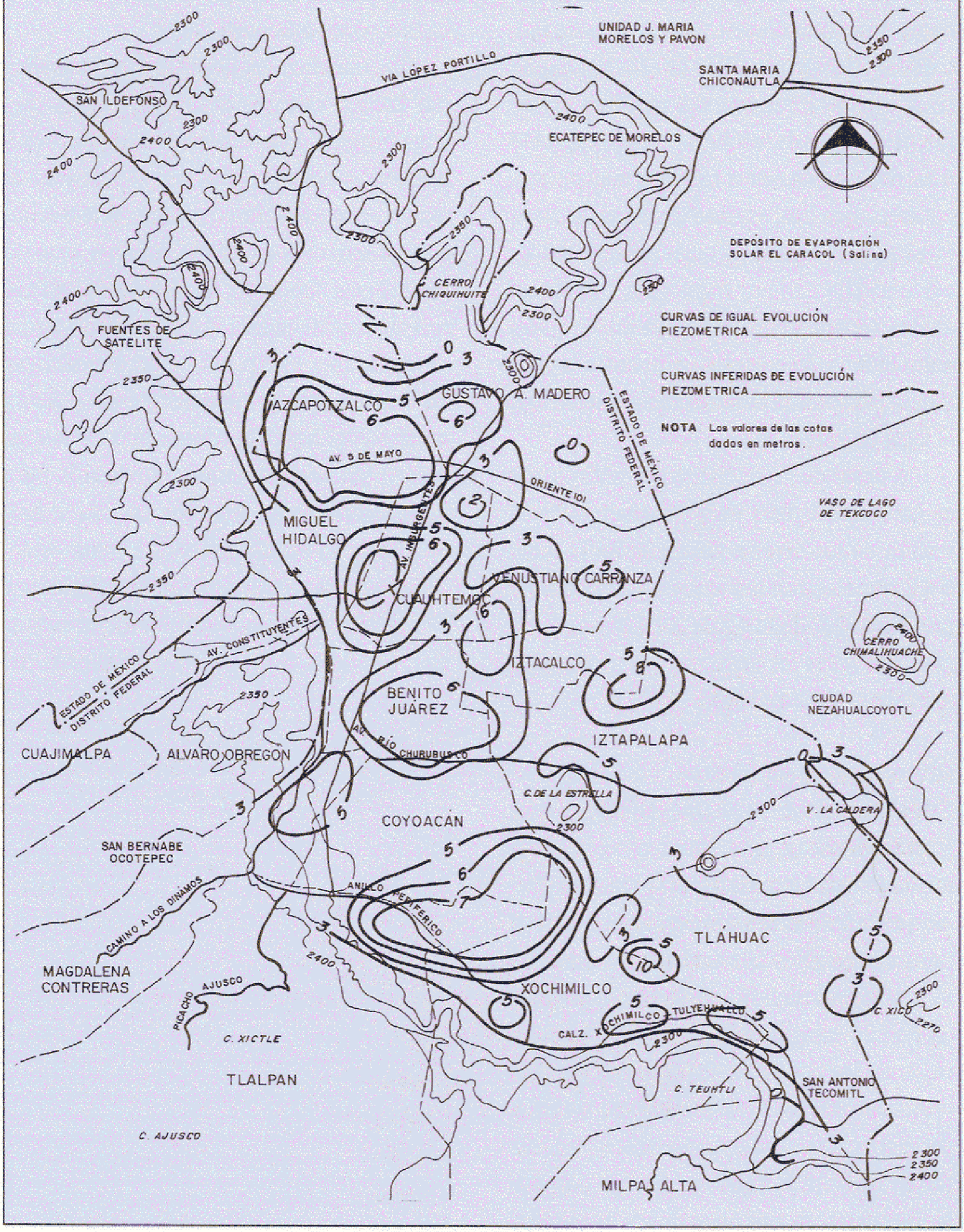
En 1983 comenzó el monitoreo sistemático de los niveles del agua en el acuífero. En la figura 2.4.3[70] se muestran las isobatas de los *niveles estáticos* correspondientes a septiembre de 1987. Los conos de influencia o de depresión causados por los centros principales de bombeo están definidos claramente, y pueden observarse los parteaguas que se han producido entre centros de bombeo adyacentes. Los niveles del agua que a principios de siglo se encontraban a profundidades someras, han descendido hasta alcanzar profundidades medias de 40 m en el centro del valle y de más de 100 m en las estribaciones de las

Tabla 2.4.2
Pozos en operación –según el censo de 1990– por uso y tasa de extracción

Uso	*Cantidad de pozos*	*Gasto promedio de extracción (m^3/s)*
Público urbano	1,223	42.11
Industrial	1,054	4.30
Agropecuario	90	0.22
Doméstico, agrícola, etc.	1,170	4.72
Total	3,537	51.35

FIGURA 2.4.3

ISÓBATAS DE NIVELES ESTÁTICOS, SEPTIEMBRE DE 1987



sierras que lo rodean. Una observación curiosa es que los niveles piezométricos han formado un montículo, en el centro de la ciudad. Una explicación plausible de este fenómeno es atribuirlo a recarga del acuífero proveniente de fugas de la tubería del agua potable o del drenaje. Lesser *et al*[1] informan de concentraciones ligeramente elevadas de cloro en el agua de esta zona; sugieren que esto es evidencia de que hay fugas en la tubería de abastecimiento, pero parece probable que el contenido orgánico de los sedimentos rápidamente consumiría el cloro libre contenido en el agua de la tubería.

A pesar de las acciones correctivas que se han emprendido, ha continuado la declinación de los niveles del agua. En la tabla 2.4.3 se muestran datos del abatimiento en áreas críticas. En la figura 2.4.4 se representa el patrón de los abatimientos producidos durante el periodo 1986 a 1992.

Hundimiento del terreno

En el subsuelo de la ciudad de México está almacenado un gran volumen de agua que si no existiera limitación alguna para su extracción sería suficiente para abastecer a la ZMVM por muchos años. Sin embargo, las arcillas lacustres superficiales que cubren el valle son altamente compresibles, y a medida que se explotan los acuíferos se producen grandes hundimientos de la superficie del terreno. Aunque solamente alrededor del 23% del área de la ZMVM está cubierta por los estratos arcillosos, en esta parte es donde se inició el desarrollo de la ciudad, y donde hasta ahora se encuentran situadas las construcciones e instalaciones más costosas.

En realidad, los problemas provocados por dichos estratos arcillosos tienen una larga historia, pues desde que se inició la civilización en el Valle de México han representado un grave obstáculo para la cimentación de las obras civiles. Por este motivo, cuando los aztecas fundaron Tenochtitlán utilizaron pilotes de madera distribuidos en forma de malla para repartir la carga y estabilizar las construcciones pesadas sobre el fondo arcilloso del lago. En épocas más recientes, las arcillas han constituido un desafío para la ingeniería civil mexicana, que ha utilizado pilotes de diseño sofisticado para proteger a las construcciones de los hundimientos.

Seguramente la iniciación de la extracción del agua subterránea a mediados del

TABLA 2.4.3.
PROMEDIO ANUAL DE ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO DURANTE LOS AÑOS 1988 A 1991

Zona	*Promedio anual de abatimiento* (m)
Ciudad de México	0.9
Tláhuac-Xochimilco	1.2
Chalco	0.9
Cuautitlán	1.5
Tizayuca-Pachuca	1.0
Texcoco	0.9
Apan	0.1

FIGURA 2.4.4

EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO EN EL PERIODO 1986-1992

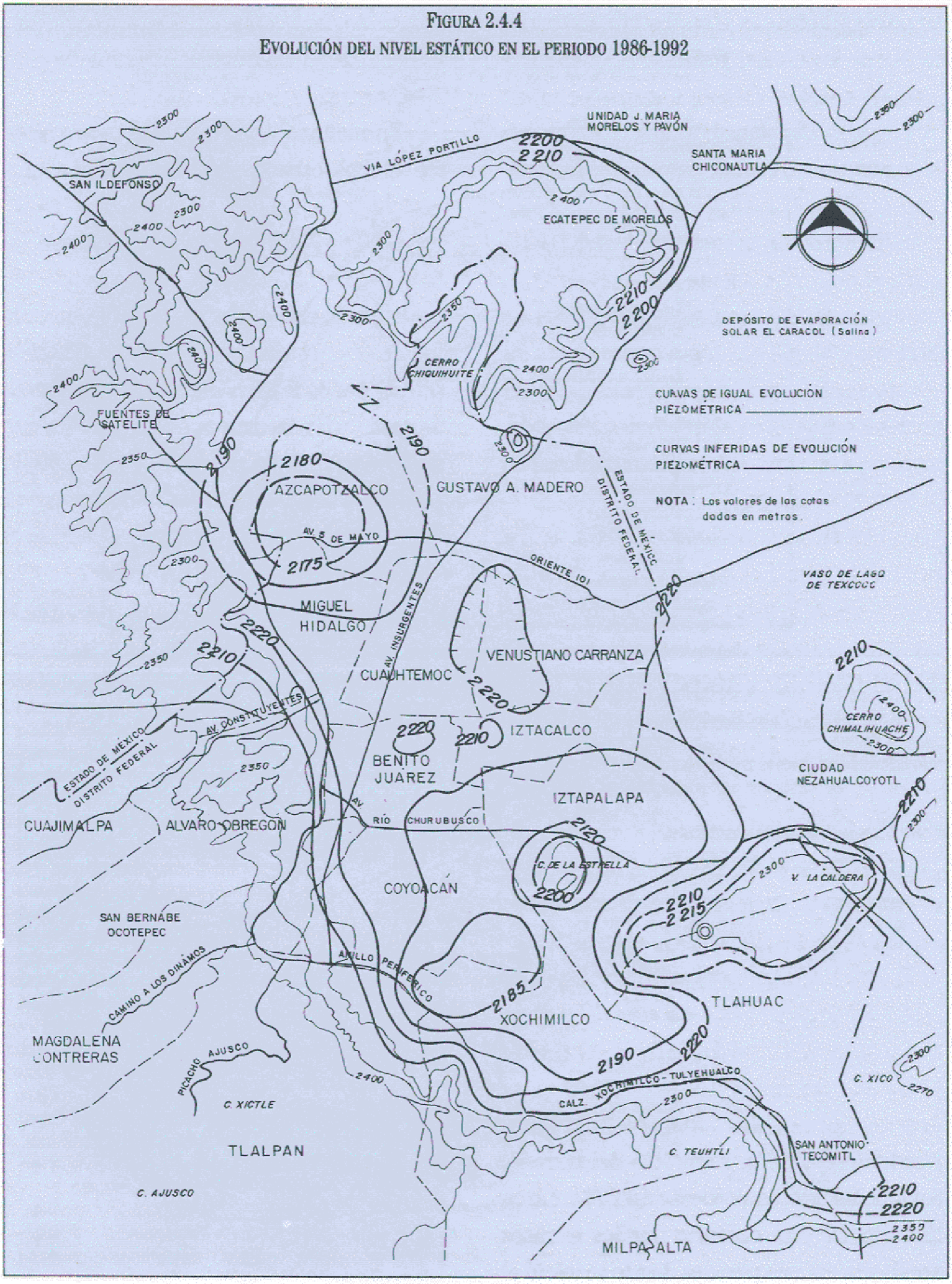


FIGURA 2.4.5

HUNDIMIENTO DE LA CATEDRAL Y LA ALAMEDA

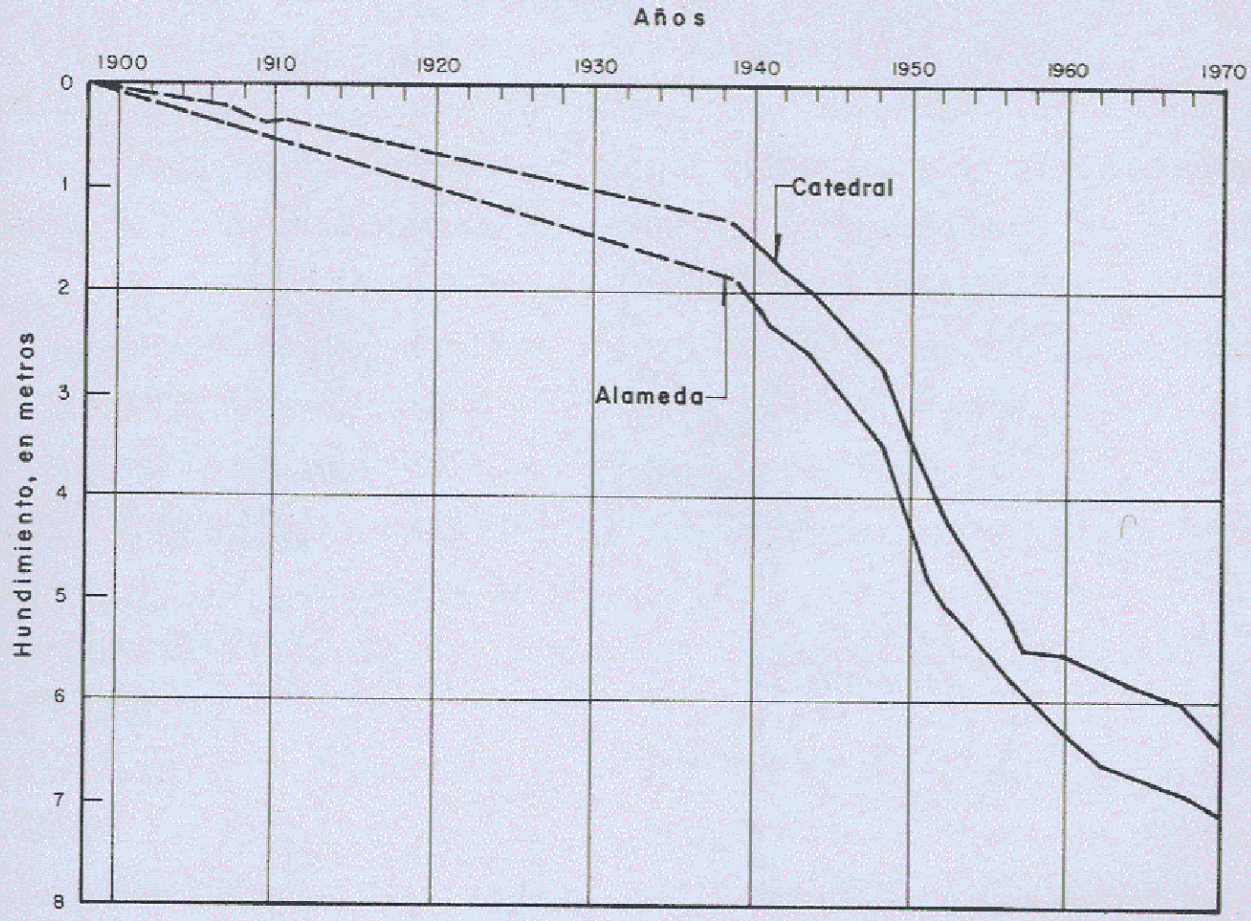


FIGURA 2.4.6

DECLINACIÓN ANUAL DEL NIVEL ESTÁTICO EN EL ACUÍFERO DE CHALCO (1978-1986)

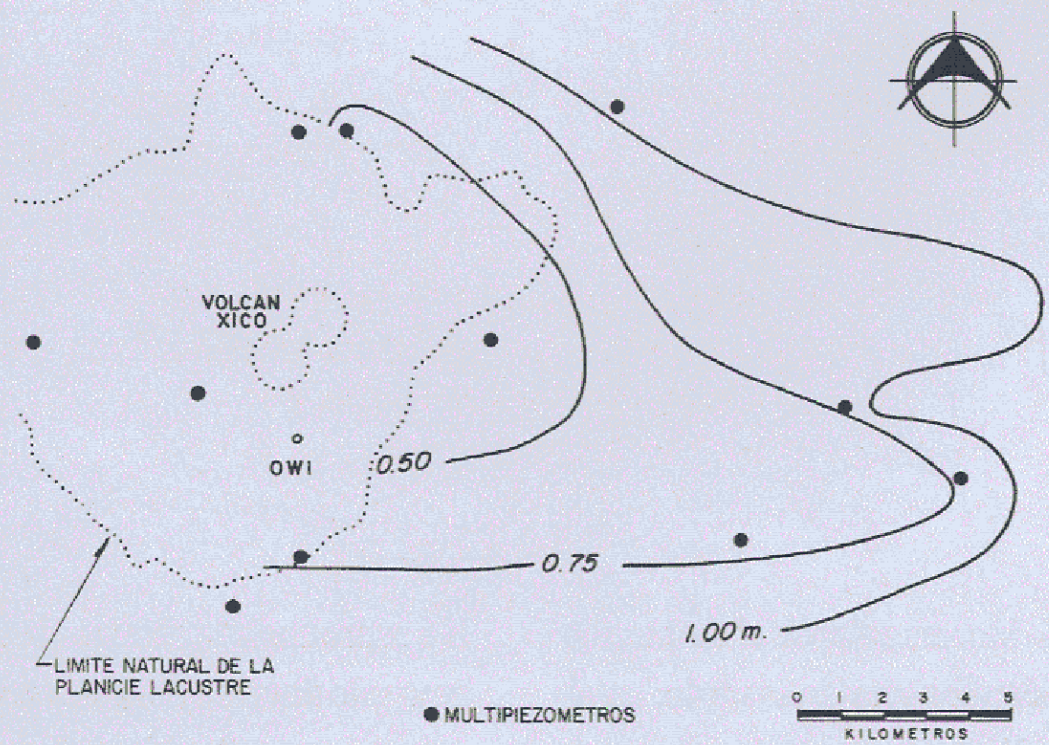


TABLA 2.4.4
EVOLUCIÓN DEL HUNDIMIENTO

Periodo de nivelación	*Hundimiento* (cm)	*Periodo* (años)	*Rapidez media de hundimiento* (cm/año)
1891-1938	212	47	4.5
1938-1948	76	10	7.6
1948-1950	88	2	44.0
1950-1951	46	1	46.0
1951-1952	15	1	15.0
1952-1953	26	1	26.0
1953-1957	68	4	17.0
1957-1959	24	2	12.0
1959-1963	22	4	5.5
1963-1966	21	3	7.0
1966-1970	28	4	7.0
1970-1973	17	3.4	5.1
1973-1977	18	4	4.5
1977-1982	23	5	4.6
1982-1986	25	3.4	7.4
1986-1991	46	5	9.2

siglo XIX, aceleró el descenso de los niveles del agua en el valle y suscitó algunos hundimientos, los cuales se incrementaron al aumentar la explotación algunos años más tarde; en el periodo 1891-1895 alcanzaron valores de hasta 5 cm/año. Con base en citas históricas y en el levantamiento topográfico de la ciudad, en 1891, por Roberto Gayol, ha sido posible reproducir la secuencia del hundimiento ocurrido durante el siglo actual. La tabla 2.4.4, muestra la evolución de la subsidencia en la zona antigua de la ciudad (La Traza). Los va-

lores correspondientes al periodo 1891-1991 están basados en datos de la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) y de la actual Gerencia de Aguas del Valle de México (GAVM).[72,11,12] Además, ha habido algunos puntos de control cuya evolución se ha registrado de manera más continua. En la figura 2.4.5, tomada de Jaime[75], se muestra la historia del hundimiento en la Catedral y en la Alameda de la ciudad de México.

Hasta el decenio de 1930, en que aumentó el bombeo, la velocidad a la que se hundía el terreno se mantuvo inferior a 5 cm/año. En el periodo 1938-1948 ocurrió un aumento moderado, que coincide con el incremento en la explotación del acuífero por el DDF. En la tabla 2.4.4, destaca el gran incremento habido durante el lapso 1948-1952, en que se alcanzan las velocidades máximas de hundimiento medio para la ciudad de México, que fueron de 46 cm/año en 1951.

Tanto la política de veda como la redistribución del bombeo, basada en la mejor comprensión del fenómeno del hundimiento del suelo, han permitido que este problema mejore, al menos en la antigua traza de la ciudad. Sin embargo, recientemente incluso ahí el hundimiento está aumentando, pues de un mínimo de 4.5 cm/año, que se alcanzó en el periodo 1973-1977, se ha pasado a 9.2 cm/año, en el de 1986-1991.

Por otra parte, en la actualidad existen hundimientos importantes en las áreas donde la extracción se ha intensificado, como en el campo de pozos del Sur (Chalco, Tláhuac y Xochimilco) donde el bombeo es de 12.2 m^3/s, destinados exclusivamente al abastecimiento municipal de la ZMVM. La figura 2.4.6 muestra la tasa anual de abatimiento en el acuífero de Chalco durante el intervalo 1978-1986; en la figura 2.4.7[73] se representa la subsidencia total del terreno en la planicie lacustre de Chalco de 1984 a 1989 y en la figura 2.4.8[73] se compara con la del centro de la ciudad de México. Los efectos de subsidencia se manifiestan en los lagos formados recientemente por las depresiones que se han creado en la planicie arcillosa lacustre de Chalco. A medida que continúa el bombeo intensivo, esos lagos se están expandiendo.

Aumento de la contaminación y la vulnerabilidad

El agua que el acuitardo aporta al acuífero durante su explotación, lo debe contaminar en cierta medida, pues el agua de poro de la arcilla es de calidad deficiente. Se dispone de datos de calidad del agua que corroboran este hecho. Los parámetros de los que hay información son: calcio, magnesio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, alcalinidad, fierro, manganeso, potencial rédox, cuenta estándar, nitritos, nitratos, floruros, arsénico, cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, plomo, y selenio. En la figura 2.4.9 se esquematiza la distribución de sólidos disueltos totales en el acuífero principal a fines de 1986.[72] Los valores son bajos a lo largo de los lados suroccidental, meridional y suroriental

FIGURA 2.4.7

SUBSIDENCIA DEL TERRENO EN CHALCO (1984-1989)

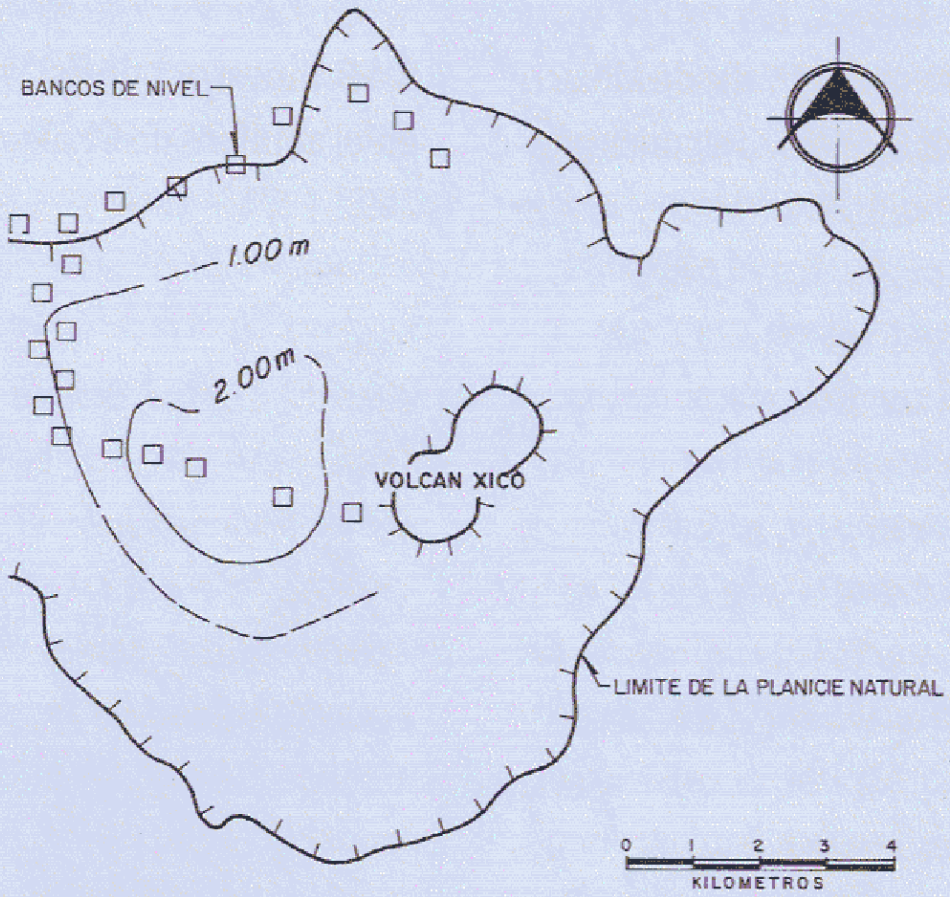


FIGURA 2.4.8

COMPARACIÓN DEL HUNDIMIENTO EN CHALCO Y EL CENTRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

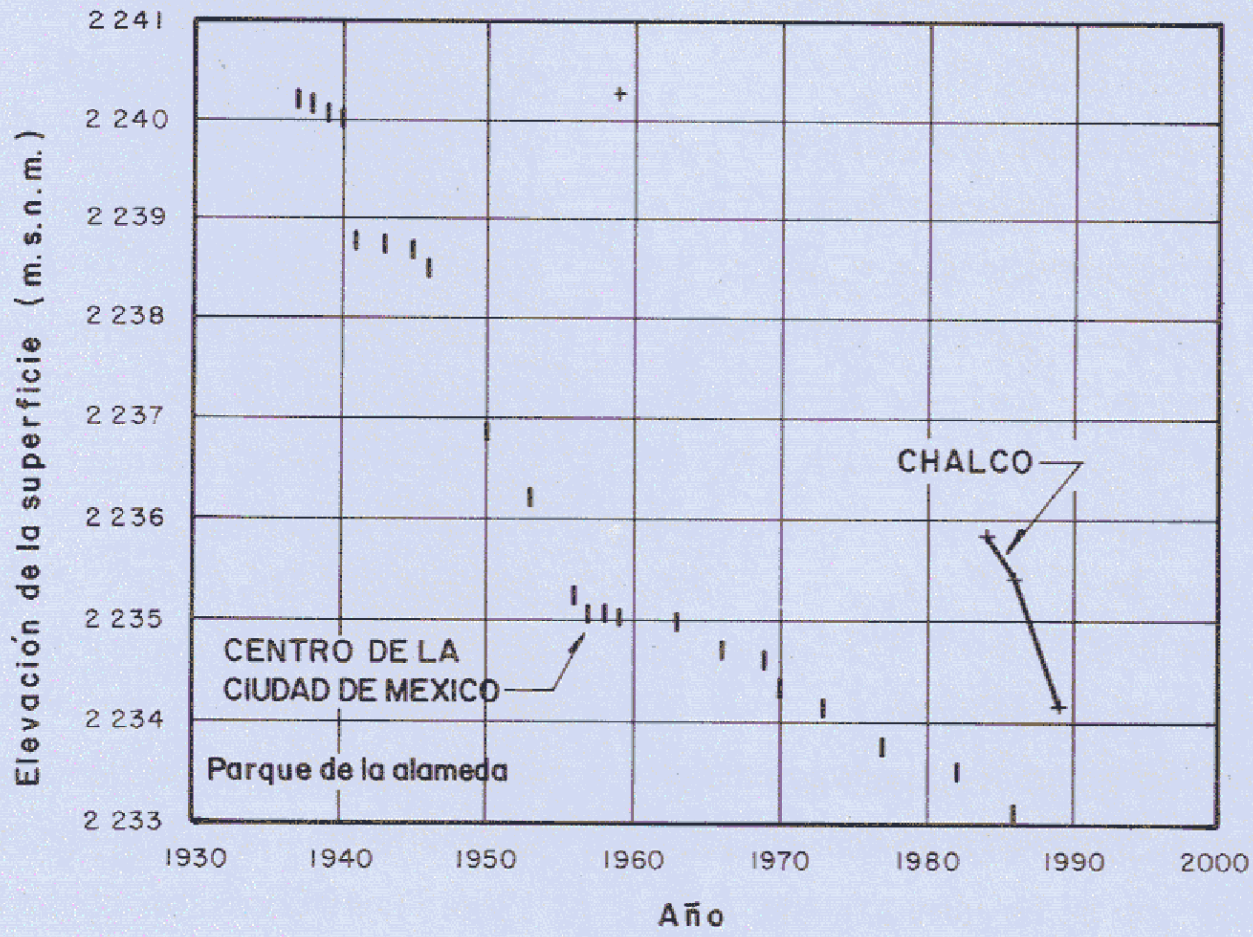
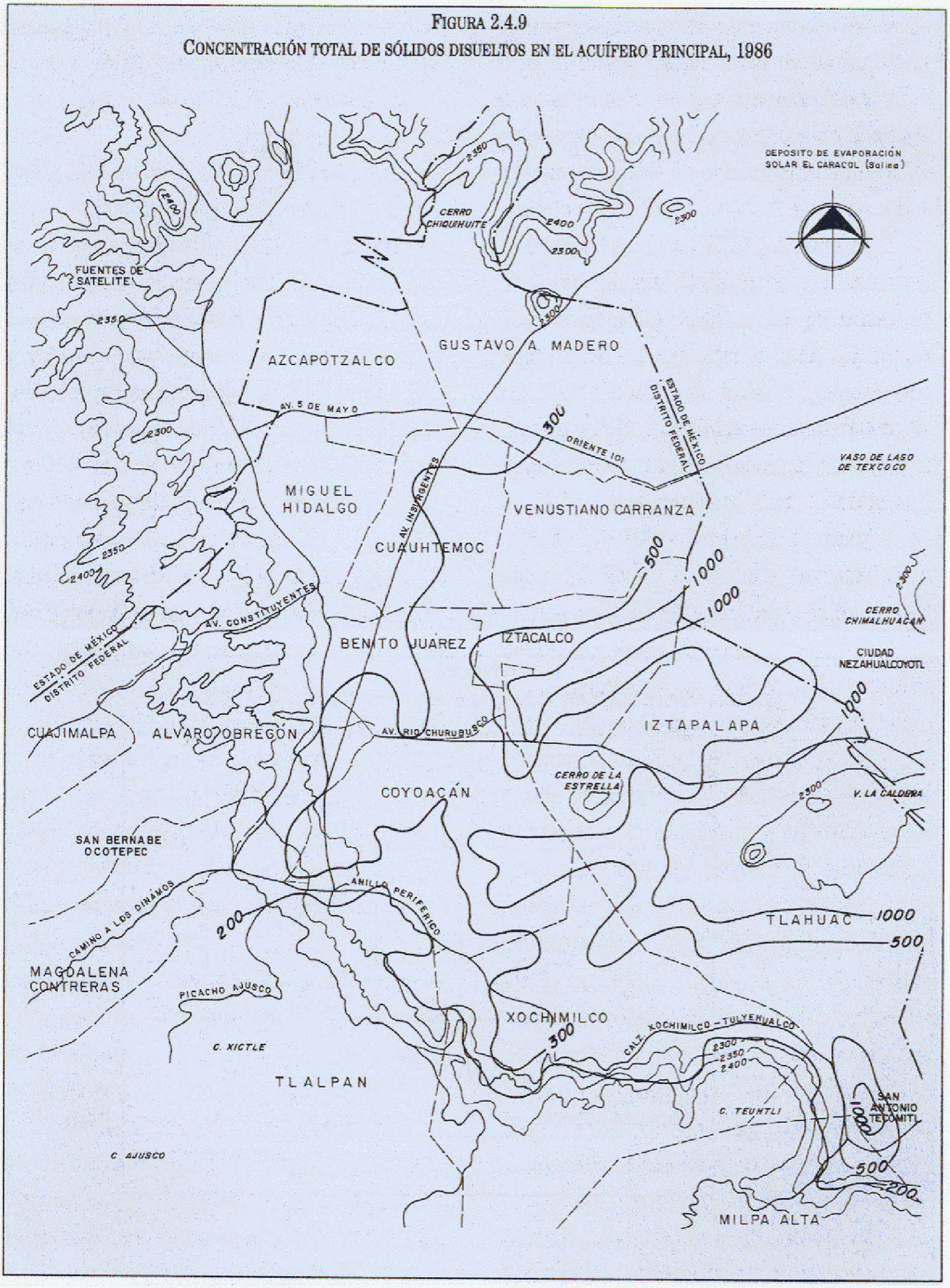


FIGURA 2.4.9

CONCENTRACIÓN TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL, 1986



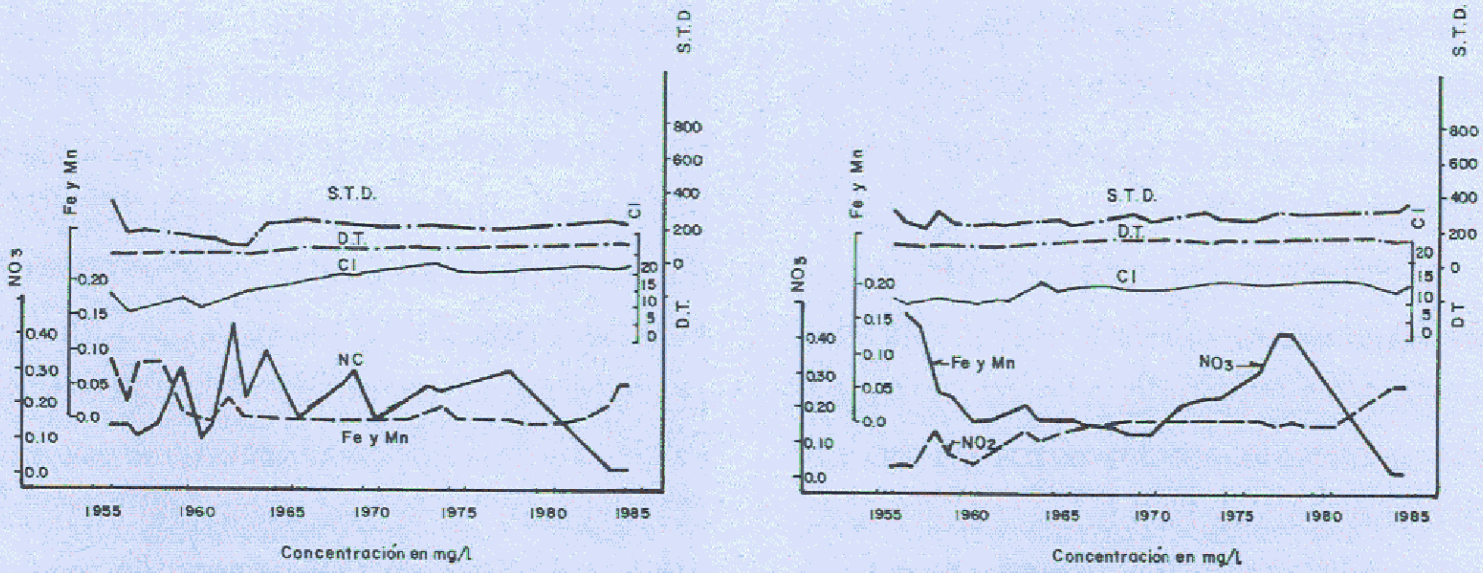
del valle, cerca de las montañas, que son las áreas principales de recarga. Hacia la parte central del valle, cerca de la colonia Agrícola Oriental y alrededor del cerro de la Estrella y de otras colinas volcánicas pequeñas, en algunas localidades los sólidos disueltos totales rebasan 1,000 mg/l. Los otrora manantiales termales (hoy pozos) del Peñón de los Baños están mineralizados; es probable que en esta región los altos valores estén relacionados con descarga natural de agua mineralizada. La distribución de calcio, sulfatos, fierro (+) y magnesio también muestra concentraciones ligeramente elevadas en esta región.

El cambio de calidad del agua subterránea observado en el centro de la ciudad, que ha estado sometido a bombeo intensivo durante muchos años, es preocupante. En otras localidades los cambios son leves o imperceptibles (Fig. 2.4.10).

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación también ha aumentado porque en la mayor parte del área del acuífero el gradiente hidráulico, que originalmente era ascendente, se ha invertido, siendo ahora descendente. Esto propicia el transporte de sustancias hacia el acuífero, desde el exterior.

Además, en etapas avanzadas de consolidación se desarrollan fracturas en la arcilla; esto se ha observado en las arcillas de la ZMVM. Tales fracturas constituyen una amenaza para la calidad del agua del acuífero, pues pueden actuar como conductos que facilitan la migración de contaminantes, desde

FIGURA 2.4.10
CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL AGUA



zonas superficiales hacia el acuífero. En el futuro este problema puede tornarse muy serio y se le investiga en la actualidad.[74]

2.4.3. Diagnóstico

Antes de iniciar la discusión que se presenta en esta sección, es oportuno hacer algunas aclaraciones. Como se vió en la sección 2.3, relativa a la descripción del acuífero, este estudio se ocupa con detalle solamente de la parte del acuífero ubicada en la porción sur de la cuenca de México –limitada al norte por la sierra de Guadalupe– que es la que ha sido más ampliamente estudiada y se conoce mejor. La discusión que sigue se refiere solamente a esa porción del acuífero, ya que solamente de ella fue posible obtener suficientes datos para realizar su balance, aunque fuera en forma aproximada.

El valor de la extracción total proveniente de los acuíferos de la cuenca –43 m^3/s– que se presentó en la tabla 2.4.1, incluye gastos provenientes de acuíferos ubicados fuera de la porción sur del acuífero. En realidad, de ellos solamente 27.9 m^3/s se originan en esa parte del estudio.[34]

El comportamiento de un acuífero sometido a explotación, cambia grandemente cuando está sobreexplotado; es decir, cuando el gasto producido por los pozos es superior a la recarga. En el caso de los acuíferos de la ZMVM, los valores de la recarga habitualmente aceptados,[34] es bastante menor al gasto de los pozos, que como se acaba de señalar es de 27.9 m^3/s, por lo que seguramente existe sobreexplotación del agua subterránea. Debido al rápido crecimiento de la demanda, y al alto costo de las fuentes alternas, es previsible que la sobreexplotación continúe indefinidamente en el futuro, a pesar de los esfuerzos que las autoridades responsables han venido realizando para detenerla.

Hay muchas situaciones en las que el gasto disponible para uso no debe tomarse como igual a la recarga efectiva. La mayor parte de los sistemas subterráneos responden con gran lentitud a las perturbaciones externas como la extracción, por lo que en muchos casos, su explotación sólo sería factible por largos periodos. Algunos de los ejemplos mejor conocidos de tales situaciones son las altiplanicies (High Plains) de Texas y Nuevo México.

Sin embargo, en la ZMVM un factor sumamente limitante es el hundimiento del suelo, concomitante a la sobreexplotación y que causa grandes daños a las obras civiles. Tomando esto en cuenta y en vista de que no parece factible detener la sobreexplotación, un elemento de información muy importante –indispensable para decidir en forma racional los límites a que se puede llevar la sobreexplotación– es la cuantificación –en términos económicos, sociales y ecológicos– de los daños causados por la sobreexplotación de las aguas subterráneas. Aunque la ingeniería mexicana de cimentaciones ha estudiado ampliamente los problemas causados por el subsuelo arcilloso de la ciudad de México,[75-77] sin embargo, aparen-

temente no existen evaluaciones que cuantifiquen con cierta precisión las pérdidas causadas directamente por el hundimiento inducido por el bombeo de las aguas subterráneas.

Para diagnosticar el funcionamiento de los sistemas hidrológicos subterráneos, es práctica común calcular el *balance del agua subterránea*. En forma muy agregada, la ecuación de balance puede escribirse así:

$$\Delta V = E - S \quad (2.4.1)$$

donde

E = Entradas, S = Salidas y

ΔV = Cambio en el almacenamiento del acuífero

En general, las entradas incluyen, además de la recarga proveniente de la precipitación pluvial, la que penetra a la región de estudio por flujo horizontal a través de la frontera. Tiene ventajas, cuando esto es posible, tomar la región de estudio de manera que no haya flujo horizontal a través de la frontera. Una forma de lograrlo consiste en extender la región de estudio hasta sus límites naturales. En el caso de la ZMVM, esto se hizo en la referencia.[34]

En el análisis que se presenta a continuación, para el acuífero de la ZMVM, las salidas se igualan a la extracción total por bombeo y las entradas a la recarga efectiva, que es la que efectivamente llega al acuífero. Como la ecuación (2.4.1) se aplicará exclusivamente al acuífero principal, actualmente en explotación sin incluir al acuitardo –formado por los estratos arcillosos superficiales–, la recarga efectiva estará integrada por dos partes: el aporte del acuitardo y la recarga proveniente de otras fuentes –principalmente de la precipitación pluvial.

La recarga de la parte del acuífero aquí discutida ha sido estimada en alrededor de 16 m^3/s –en la referencia,[34] se usa el valor 15.6 m^3/s. La utilización de una recarga cercana a los 16 m^3/s, permite establecer un balance que es consistente con los demás parámetros que intervienen. Es pertinente mencionar, además, que las autoridades de la ZMVM utilizan también esta cifra para fines de planeación.

La tabla 2.4.5, presenta un resumen de los valores de los parámetros que se obtuvieron en la referencia,[34] los cuales satisfacen la ecuación (2.4.1). En general en las zonas cubiertas por los estratos arcillosos, el acuífero funciona como semiconfinado –constituyendo las arcillas el acuitardo que confina parcialmente al acuífero. Sin embargo, debido a la intensa explotación del acuífero, existen en la actualidad regiones en las que el nivel del agua en el acuífero principal está por debajo de la cara inferior de los estratos arcillosos y ahí el acuífero funciona como libre. Donde eso sucede, el coeficiente de almacenamiento del acuífero principal es sensiblemente igual a su porosidad (S_y) –el aporte debido a la elasticidad del acuífero de la ciudad de México, es mucho menor que el que proviene del drenado de sus poros: S es del orden de 10^{-4}, mientras que los valores de S_y se encuentran entre el 5×10^{-2} y 15×10^{-2}.

El aporte de la arcilla de 4.7 m^3/s, fue calculado en la referencia[34]. El aporte del acuífero principal (ΔV=7.6 m^3/s), se obtiene al aplicar la ecuación (2.4.1) con los valores anteriores. El área libre del acuífero principal (2,865.6 km^2) resulta de restar al área total, el área de la zona cubierta por arcillas que no funciona como libre. La porosidad media de 8.36% se obtiene al imponer la condición de que el volumen abatido multiplicado por la porosidad sea igual a ΔV.

Una pregunta fundamental, en relación con el acuífero es cuál es su futuro. En particular, por cuánto tiempo será posible su explotación al ritmo presente. Los resultados del balance, junto con algunos cálculos adicionales permitem arrojar alguna luz sobre este importante tema. Sin embargo, no se dispone de información suficiente para dar respuestas definitivas.

De todas maneras, se presenta a continuación una estimación bastante directa del volumen de agua almacenado en el acuífero de la ciudad de México; este cálculo, además de ser sencillo, tiene la ventaja de que no utiliza los valores de porosidad –respecto a los cuales la información de que se dispuso no es suficientemente segura– sino que se basa en el comportamiento observado del acuífero. Un resumen de la misma se presenta en la tabla 2.4.6 –los promedios anuales están basados en el periodos 1989-1993.

TABLA 2.4.5
BALANCE DEL ACUÍFERO DE LA ZMVM

Periodo 1991-1993

Área total del acuífero
3,448 km^2

Área cubierta por arcilla
832 km^2

Área libre de la arcilla
30%=249.6 km^2

Extracción total del acuífero
27.9 m^3/s= 879.85x$10^3 m^3$/año

Recarga
15.6 m^3/s=492.0x$10^3 m^3$/año

Aporte de la arcilla
4.7 m^3/s= 148.22x$10^6 m^3$/año

Aporte del acuífero principal
7.6 m^3/s=239.647x10^6 m^3/año

Área libre del acuífero
2,865.6 km^2

Abatimiento medio
1 m/año

Volumen abatido (área libre)

2,865.6 x $10^6 m^3$/año

Porosidad media
8.36%

TABLA 2.4.6

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN ALMACENADO EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL

Volumen del acuífero: $2,149.4 \times 10^9 m^3$

Volumen saturado (V_s): $1,189.3 \times 10^9 m^3$

Condiciones actuales:

$V_{AA} = 3.45 \times 10^9 m^3$/año (actual)

$V_{TA}/D_{AA} = V_S/V_{AA} = 344.6$

Condiciones sin aporte del acuitardo

$\hat{V}_{AA} = 5.59 \times 10^9 m^3$/año

$V_{TA}/\hat{D}_{AA} = V_S/\hat{V}_{AA} = 212.9$

El cálculo se realizó en dos condiciones de funcionamiento: las actuales y las que existirían si no hubiera aporte del acuitardo. Se utiliza la notación siguiente:

V_{TA} = Volumen total almacenado en el Acuífero

D_{AA} = Déficit anual del acuífero

$\hat{D}_{AA}$ = Déficit anual del acuífero, cuando no se toma en cuenta el aporte del acuitardo

V_{AA} = Volumen abatido anualmente (condiciones actuales)

$\hat{V}_{AA}$ = Volumen abatido anualmente (si no hubiera aporte del acuitardo)

La razón por la que es importante realizar también el cálculo para el caso en que no hay aporte del acuitardo, es que se prevé que éste disminuirá en el futuro; inclusive a largo plazo, tal disminución puede llegar a ser muy drástica. Aunque la evolución del aporte del acuitardo sólo puede predecirse con cierta precisión, utilizando modelos computacionales, el cálculo que aquí se presenta, eliminándolo, proporciona una cota inferior para la relación V_{TA}/D_{AA}.

Para las condiciones actuales de funcionamiento se obtiene que el volumen total almacenado en el acuífero principal es de 344.6 veces el déficit volumétrico anual. Para las condiciones que existirían si no hubiera aporte del acuitardo, se obtiene que el volumen total almacenado es de 212.9 veces el déficit volumétrico anual correspondiente.

Estos resultados *no* significan que en las condiciones actuales de funcionamiento el acuífero duraría 344.6 años, ni que de no haber aporte del acuitardo dicha duración sería de 212.9 años. Por el contrario, seguramente la operación del acuífero podrá sostenerse por un periodo mucho menor, por varias razones. Entre ellas, el volumen almacenado en el acuífero principal debe ser bastante menos grande, debido a que en los cálculos anteriores se supuso al acuífero principal homogéneo en la dirección vertical; aunque se trata esencialmente de las mismas formaciones geológicas, sin embargo, su consolidación aumenta con la profunidad y consecuentemente disminuye su porosidad. También, la economía de las condiciones de bombeo se deteriorarán a medida que el nivel freático se profundice y pueden surgir problemas técnicos imprevistos que impedirán continuarlo. Finalmente, es muy importante señalar que, al menos en algunas zonas, se

han detectado problemas de calidad con las aguas profundas del acuífero.

Para dar una información más precisa respecto a la duración de la explotación del acuífero, es necesario llevar a cabo estudios orientados específicamente a tal fin, que incluyan modelos computacionales. Aunque se han realizado un buen número de proyectos que abordan esta cuestión, en general los mismos han hecho pronósticos del comportamiento del acuífero a plazos relativamente cortos –generalmente de 20 años.

2.5. Reúso y reciclamiento

Generalmente los conceptos reúso de agua y reciclamiento de aguas residuales se aceptan como sinónimos y para referirse a la práctica de restitución de aguas residuales municipales o industriales tratadas, para algún uso benéfico ulterior. Por agua residual se entiende: la de abastecimiento a una comunidad o a una planta industrial, después de que su calidad ha sido alterada en forma indeseable, como resultado de su uso. Con frecuencia se hace distinción entre reúso y reciclamiento de agua residual; el último alude a la captación y retorno de ésta para uso en el mismo proceso que la generó, por lo común con poco o ningún tratamiento, tal como en un sistema cerrado de refrigeración industrial. Más a menudo el reciclamiento involucra sólo una planta industrial o un usuario. Por otra parte, reúso de agua es una expresión general concerniente a la práctica de restitución de aguas residuales municipales o industriales tratadas para cualquiera de varios usos benéficos: riego agrícola, enfriamiento industrial, etcétera.

En 1984, varias autoridades mexicanas a quienes compete el agua desarrollaron un programa nacional para mejorar su consumo: el "Programa de Uso Eficiente del Agua". Primordialmente el programa se formuló para: a) reducir la pérdida de agua en los sistemas de distribución; b) mejorar la medición, la facturación y el cobro por consumo, y c) desarrollar actividades de reúso.

Durante el periodo 1990-1992, en la ZMVM el programa se concentró en las actividades siguientes: 1) protección de las zonas de recarga natural del acuífero; 2) recarga de éste con agua de lluvia y restitución de aguas residuales municipales, y 3) uso de agua restituida en los sectores industrial y de servicios.

Un desarrollo importante, producto de este programa, fueron las nuevas regulaciones de descarga de aguas residuales establecidas por el DF: *Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje en el Distrito Federal*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1990. Entre sus previsiones se fijan requisitos para controlar cualitativamente las descargas en el sistema cloacal y cualesquiera otras condiciones que puedan dañar a éste. Previene el control de sustancias tóxicas y peligrosas en la fuente de generación –primordialmente plantas industriales– antes de descargarlas a un sistema de albañal municipal; es decir, es un

programa de pretratamiento. Si no se controlan, tales substancias podrían traspasar o afectar el funcionamiento de las plantas tratadoras, o crear condiciones explosivas o peligro de incendio. En la planeación de cualquier esquema de restitución y reúso de aguas de desecho es particularmente importante atender la necesidad de, *in situ*, contar con un programa efectivo de pretratamiento de aguas residuales industriales.

Actualmente sólo alrededor de 10% del agua residual generada en la ZMVM se somete a tratamiento, y por tanto el 90% está disponible para reúso. El DDF tiene la intención de mejorar sus plantas tratadoras actuales, para incrementar la eficiencia y desarrollar una red óptima de tubería para distribución de agua residual restituida.

El Estado de México instituyó un programa específicamente destinado a incrementar el reúso de agua residual procedente de sus municipios. Este programa incluye el desarrollo y la ejecución de estudios de factibilidad para: a) construcción de sistemas adicionales de tratamiento y de una red de distribución de agua tratada para reúso; b) promoción de proyectos de reúso de agua dentro de los sectores público y privado; c) rehabilitación de las plantas de tratamiento de aguas de desecho; d) preparación de manuales de operación y mantenimiento y otros documentos para mejorar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento y reúso de agua de esta índole, y e) cuantificación del agua potable que actualmente se está usando para propósitos varios y que potencialmente sería sustituible por la restituida. Dentro de este programa, en cada una de las cinco zonas del área de servicio del Estado de México se han identificado actividades potenciales en las cuales el reúso es admisible (véase la sección 2 de este capítulo). Por ejemplo, dentro de la zona VC, si el flujo del Emisor Poniente estuviera tratado, podría sustituir al agua potable que actualmente se usa para riego agrícola. Similarmente, existe la factibilidad de que las plantas industriales de la zona NZT usen agua cloacal tratada proveniente de los interceptores Central y Poniente-Central, que ahora son portadores de agua residual no tratada. El Gran Canal, que drena la zona EC, podría satisfacer las necesidades agrícolas e industriales con agua residual restituida; dentro de la zona CH los usos potenciales de agua de esta índole incluyen recarga del acuífero, irrigación de áreas verdes y agrícola, e industriales. Para el año 2000, el Estado de México pretende tener cuatro nuevas plantas tratadoras de aguas de desecho, con capacidad total de 8.6 m^3/s.[78]

2.5.1. Reúso industrial

Las autoridades responsables del suministro del agua a la ZMVM, estiman que en la actualidad cierta cantidad de establecimientos industriales efectúan reciclamiento y/o reúso de ella. En efecto, se ha evaluado que la manufacturera y otras industrias utilizan 2.4 m^3/s, incluida el agua residual tratada que el Distrito Federal vende a instalaciones in-

dustriales y comerciales.[47] Mucha del agua reciclada se usa para enfriamiento, primordialmente porque no hay requisitos de calidad que cumplir. Por ejemplo, en el área de servicio del Estado de México existen dos generadoras termoeléctricas operadas por la Comisión Federal de Electricidad: la Termoeléctrica del Valle de México y la de San Cristóbal. Ambas están ubicadas en Ecatepec, y tienen plantas de tratamiento de aguas residuales para restitución de agua usada destinada a reciclamiento y/o reúso, presumiblemente con propósitos de enfriamiento.

Muchas ramas industriales, como las de celulosa y papel, química, textil, petróleo, y del carbón, tienen el potencial para efectuar el reciclamiento o el reúso de agua. Sin embargo, normalmente dentro de un sector industrial este potencial se considera caso por caso: por cada planta o instalación individual, o tal vez por todo un complejo. Frecuentemente, en determinada rama industrial las operaciones o los procesos de producción o fabriles, o su secuencia o modo operacional difieren de una planta a otra; esta diferencia puede impactar el consumo de agua y el potencial para su reciclamiento o reúso. Así, cada planta individual o complejo industrial debe evaluar sus propias operaciones considerando la posibilidad de reciclamiento o reúso de agua, tomando en cuenta cualesquiera limitaciones técnicas y económicas.

Una instalación industrial dada puede tener su propia fuente de agua o usar la provista por un sistema de abastecimiento público. Colectivamente, la industria puede captar y reusar/reciclar mucha de su agua usada, con o sin tratamiento; como resultado, muchas instalaciones industriales han tenido buen éxito en reducir sus necesidades de agua nueva. Por ejemplo, al consumo de agua para enfriamiento industrial, inclusive la usada en la generación de energía termoeléctrica, se le puede atribuir de 50 a más de 80% del consumo total de agua de una planta industrial.[79] Con fines de conservación, muchas industrias reciclan su agua de enfriamiento mediante el empleo de un sistema refrigerante recirculatorio en el que entre un uso y otro el agua se enfría en una torre o en una cisterna, o por una operación aspersora que libere calor hacia la atmósfera.

Para mejorar la administración del agua y así reducir la demanda de agua nueva o virgen, de alguna manera debería estimularse a los industriales de la ZMVM para incrementar el reciclamiento y/o el reúso. Actualmente, 17% del agua potable suministrada a las áreas de servicio del DF y del Estado de México se usa en la industria (Tabla 2.2.1). Puesto que muchos establecimientos industriales de la ZMVM se ubican en el área de servicio del Estado de México, principalmente en las zonas de Ecatepec, Naucalpan, Tlalnepantla y Chalco, es concebible que dondequiera que cierta cantidad de industriales puedan cooperar o colaborar sería factible desarrollar un programa integrado de reúso de agua industrial. Por ejemplo, la ya usada en una industria podría ser de una

calidad que resultara aceptable para reúso por una o más ramas industriales, sin o con mínimo tratamiento. Si se incrementara la práctica de reciclamiento y/o reúso de agua industrial, en la misma medida se ahorraría agua subterránea, que actualmente se extrae de pozos industriales particulares.

Un análisis de las necesidades industriales de agua dentro del Distrito Federal mostró que 25% del consumo total de la potable se podría reemplazar por agua residual restituida. Se ha estimado que, del agua potable que en la actualidad se consume, 1.85 m^3/s se podrían sustituir por agua residual restituida, con poco o ningún tratamiento, considerando sólo usos industriales como enfriamiento y lavado. La sustitución de agua potable por agua residual tratada en otros usos, tales como en los procesos industriales mismos, puede necesitar que el agua residual reciba tratamientos más amplios, debido a los diferentes requerimientos de calidad asociados con las diferentes industrias.

Como un ejemplo de lo que es posible, en 1989 un grupo de veintiseis compañías del área de Vallejo inició un programa para reducir sus necesidades de agua potable;[80] organizaron una nueva firma no lucrativa: Aguas Industriales de Vallejo, para rehabilitar una planta anticuada de tratamiento de aguas residuales. Cada compañía participante contribuyó con financiamiento de manera proporcional a sus necesidades de agua. La empresa opera merced a una concesión gubernamental por diez años. El costo estimado del agua suministrada es el 75% del correspondiente al agua potable.

2.5.2. Aguas de desecho: características y tratamiento

El agua residual, que incluye la domiciliaria, comercial e industrial usada por una comunidad, es la fuente de agua reusable más vasta y más ampliamente disponible; en este sentido, cuando se le trata representa una fuente potencial significativa de agua restituida para reúso, con una variedad de propósitos útiles. Recuperación de aguas residuales es una expresión frecuentemente usada para referirse al tratamiento o procesamiento de aguas negras con el fin de hacerlas reusables; a menudo incluye el sistema de distribución para transportarlas a su punto de reúso, y tal vez aun su uso real. Sus características y el tratamiento que les corresponda, son determinantes extremadamente importantes de su posible reúso, cualquiera que sea el propósito. Los constituyentes principales que deben considerarse, se pueden clasificar así: sólidos totales y suspendidos, materia orgánica biodegradable y refractaria (no biodegradable), sustancias tóxicas, nutrientes, productos químicos inorgánicos disueltos, y patógenos.

La naturaleza de los sólidos totales y suspendidos puede ser orgánica o inorgánica. La mayoría de las sustancias orgánicas son carbohidratos, proteínas, o lípidos (grasas animales, aceites y grasa mineral), que en su totalidad se les considera biodegra-

TABLA 2.5.1

AGENTES INFECCIOSOS REPRESENTATIVOS POTENCIALMENTE PRESENTES EN AGUAS MUNICIPALES RESIDUALES

Agentes	*Enfermedad/Síntoma*
Bacterias	
Campylobacter fetus (*ssp. jejuni*)	Diarrea, vómito
Escherichia coli	Gastroenteritis (diarrea)
Salmonella	
S. typhi	Fiebre tifoidea
S. parathyphi	Fiebre paratifoidea (incluye diarrea)
otras salmonelas	Envenenamiento de alimentos, y otras salmonelosis
Shigella sp.	Shigelosis (desintería baciliar, incluye diarrea)
Vibrio	
V. cholerae	
Vibrio	
V. cholerae	Cólera (diarrea)
otros vibrios	Diarrea
Yersinia enterocolítica	Diarrea, condiciones varias
Y. pseudotuberculosis	
Virus	
Enterovirus	
Virus de la polio	Poliomielitis, parálisis, meningitis, fiebre
Ecovirus	Diarrea, fiebre, meningitis y otras
Virus de *Coxsackie* (A y B)	Meningitis, enfermedades respiratorias, fiebre y otras
Nuevos enterovirus	Encefalitis, meningitis, conjuntivitis y otras
Nuevo enterovirus	Hepatitis infecciosa
Virus de la hepatitis A	Gastroenteritis (diarrea, vómito y otras)
Nuevos enterovirus	
Rotavirus, agente de Norwalk y otros virus	

dables. Además pueden estar presentes cantidades menores de muchos compuestos orgánicos sintéticos diferentes. La fuente de éstos puede ser una instalación industrial que los produce, o provenir de usos domésticos o industriales. Es posible que algunos sean biodegradables y que otros no lo sean (refractarios) o que la biodegradación les afecte muy lentamente. Ejemplos de compuestos orgánicos sintéticos son los surfactantes (agentes de acción superficial, como los detergentes), solventes y pesticidas. Se sabe o sospecha que algunos de estos compuestos son tóxicos para el género humano; por ejemplo carcinógenos, mutágenos, teratógenos, o severamente tóxicos. En la categoría de sustancias tóxicas se incluyen también los metales pesados, que las aguas

TABLA 2.5.1 (CONT.)

AGENTES INFECCIOSOS REPRESENTATIVOS POTENCIALMENTE PRESENTES EN AGUAS MUNICIPALES RESIDUALES

Agentes	*Enfermedad/Síntoma*
Protozoarios	
Cryptosponidium	Diarrea
Balantidium coli	Diarrea, disentería, ulceración del colon
Entamoeba histolytica	Ulceración del colon, disentería amibiana, absceso hepático
Giardia lamblia	Diarrea, mala absorción
Helmintos	
Ancylostoma duodenales Necator americanus	Anquilostomas (anemia)
Ascaris lumbricoides (ascáridos)	Ascariasis (disturbios respiratoris, digestivos o abdominales, obstrucción intestinal)
Enterobius vermicularis (oxiuros)	Enterobiasis (prurito anal)
Strongyloids stercoralis (lombrices)	Strongiloidiasis (a menudo asintomática, dermatitis, disturbios pulmonares o abdominales)
Trichuris trichuria (triquiuros)	Triquiuriasis (frecuentemente asintomática, hemaotoprosis, diarrea)
Diphyllobothrium latum (solitaria del pez)	Difilobotriasis (con frecuencia asintomática, anemia, diarrea, obstrucción)
Taenia saginata (solitaria vacuna)	Teniasis (igual a la anterior, más cisticercosis, disturbios oculares, cardíacos y del sistema nervioso central)
Schistosoma S. iaponicum	Esquistosomiasis, bilharziasis (obstrucción, hematuria, tumores en la vejiga)
S. mansoni	(Síntomas similares a la disentería, cirrosis hepática)

residuales pueden contener. Potencialmente, una fuente significativa de productos tóxicos es el agua de desecho industrial que se vierte a los sistemas cloacales municipales. Actualmente, en los EUA se requiere que, previamente a su descarga en un sistema de drenaje, en la planta industrial se haga un pretratamiento de sus aguas de desecho para remover cualquier tipo de sustancias tóxicas.

Entre los nutrientes requeridos por todos los organismos vivientes, los más críticos tal vez sean el nitrógeno y el fósforo. Las aguas municipales residuales contienen cantidades significativas de ambos: el nitrógeno como constituyente del amoniaco o en compuestos

orgánicos, y el fósforo en sales como ortofosfatos, polifosfatos o fosfatos orgánicos. En este ámbito, los iones inorgánicos varían mucho, desde especies químicas relacionadas con la alcalinidad hasta una variedad de aniones y cationes; su presencia y concentración reflejan las características químicas del agua suministrada y las adiciones aportadas por diferentes fuentes: domésticas, comerciales, industriales, etcétera.

Las aguas residuales pueden contener una variedad de organismos patógenos o de agentes infecciosos, que incluyen bacterias, virus, protozoarios y helmintos. A causa de que normalmente su fuente son las descargas con excremento humano, con frecuencia se les refiere como patógenos entéricos, o simplemente agentes infecciosos. La tabla 2.5.1 es una lista representativa de estas facies,[79] basadas en lo observado en todo el mundo. Su ocurrencia y densidad relativa, en las de procedencia doméstica, dependen de diversos factores complejos; por lo tanto, en general es imposible anticipar con seguridad las características, con respecto a agentes infecciosos, de un agua residual en particular. En efecto, es de esperar que haya variaciones internacionales, comunitarias, diarias, y tal vez horarias. Variables importantes que influyen en la ocurrencia y en la cuantía de agentes infecciosos en este *habitat* comprenden las características de las fuentes contribuyentes, el estado general de salud de la población aportadora, la prevalencia de una enfermedad o la existencia de portadores de enfermedades en la población, y la capacidad de supervivencia de los agentes infecciosos fuera de su huésped en condiciones ambientales adversas. La tabla 2.5.2 contiene un rango de valores de densidad de algunos de los microorganismos frecuentemente encontrados en tal ámbito.

TABLA 2.5.2

TIPOS Y RANGOS REPRESENTATIVOS DE DENSIDAD DE MICROORGANISMOS EN AGUAS RESIDUALES BRUTAS

Organismos	*Densidad y cantidad/ml*
Coliformes totales	10^5-10^8
Coliformes fecales	10^4-10^5
Estreptococos fecales	10^3-10^4
Enterococos	10^2-10^3
Shigella	Presente[a]
Salmonella	10^0-10^2
Pseudomonas aeroginosa	10^1-10^2
Clostridium perfringens	10^1-10^3
Micobacterium tuberculosis	Presente[a]
Quistes de protozuarios	10^1-10^3
Quistes de Giardia	10^1-10^2
Quistes de Cryptosporidium	10^1-10^2
Huevos de helmintos	10^2-10^1
Virus entéricos	10^1-10^2

[a] Los resultados de estas pruebas son reportados usualmente positivos o negativos en lugar de ser cuantificados.

La tabla 2.5.3 contiene información relativa a la composición de aguas municipales de desecho; en ella se incluyen los constituyentes físicos, químicos y biológicos más sig-

TABLA 2.5.3
COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA MUNICIPAL RESIDUAL EN BRUTO
(NO TRATADA)

Contaminantes	*Unidad*	*Concentración*		
		Débil	*Mediana*	*Fuerte*
Sólidos, totales (ST)	mg/L	350	720	1 200
Disueltos, totales (STD)	mg/L	250	500	850
Compuestos	mg/L	145	300	525
Volátiles	mg/L	105	200	325
Sólidos suspendidos (SS)	mg/L	100	220	350
Compuestos	mg/L	20	55	75
Volátiles	mg/L	80	165	275
Sólidos asentables	mg/L	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/L; 5-días, 20° C (DBO_5, 20° C)	mg/L	110	220	400
Carbón orgánico total (COT)	mg/L	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	500	1 000
Nitrógeno total como N	mg/L	20	40	85
Orgánico	mg/L	8	15	35
Amoniaco libre	mg/L	12	25	50
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0

nificativos. Los datos de concentraciones y las designaciones baja, media y alta se deben considerar sólo como guías. Se ha de reconocer que, como ya se mencionó, los componentes y su concentración varían de un país a otro y de una comunidad a otra, así como de un día de la semana a otro, etcétera.

El grado de tratamiento depende de su composición o de los constituyentes presentes y de la calidad requerida del efluente, en la que a su vez influye el medio donde se usará el agua restituida. Comúnmente el tipo, o el grado, se denominan primario, secundario, o avanzado/terciario.

Generalmente se acepta que, previamente a su liberación en el ambiente, todas las aguas residuales municipales deben recibir tratamiento secundario. Se puede esperar que

TABLA 2.5.3 (CONT.)

COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA MUNICIPAL RESIDUAL EN BRUTO

(NO TRATADA)

Contaminantes	*Unidad*	*Concentración*		
		Débil	*Mediana*	*Fuerte*
Fósforo total como P	mg/L	4	8	15
Orgánico	mg/L	1	3	5
Inorgánico	mg/L	3	5	10
Cloruros	mg/L	30	50	100
Sulfatos	mg/L	20	30	50
Alcalinidad como $CaCO_3$	mg/L	50	100	200
Grasa mineral	mg/L	50	100	150
Coliformes-totales	no/100 mL	10^6-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9
Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	µg/L	<100	100-400	>400

éste remueva del agua residual influente, el 85% o más de la materia orgánica y de los sólidos suspendidos. La materia orgánica remanente en el efluente, después del tratamiento secundario, consiste en compuestos orgánicos biodegradables solubles y coloidales, ya presentes en el agua residual original, más productos intermedios generados durante la degradación biológica de compuestos orgánicos, y constituyentes celulares microbianos.[81] La composición de los sólidos suspendidos es principalmente orgánica: productos biológicos originados durante el tratamiento secundario, y quizás otros sólidos que escaparon a éste y a la separación. El efluente puede también contener materia orgánica no biodegradable o refractaria. A causa de que este proceso no desaloja efectivamente los varios compuestos que contienen nitrógeno y fósforo, ni los metales pesados y tampoco por completo los agentes infecciosos, por ejemplo bacterias y virus patógenos, en el efluente se pueden encontrar cantidades significativas de estos constituyentes. Debido a la presencia de agentes infecciosos, es recomendable desinfectar un efluente secundario antes de vertirlo a un cuerpo de agua o al ambiente, según las circunstancias de su disposición final. Normalmente si el reúso tiene propósitos generales se requiere tratamiento secundario y desinfección.

TABLA 2.5.4

OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS PARA REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRINCIPALES CONTENIDOS EN AGUAS MUNICIPALES RESIDUALES

Contaminantes	*Operación y procesos unitarios, o sistema de tratamiento*
Sólidos suspendidos	Tamización y desmenuzamiento
	Sedimentación
	Flotación
	Filtración
	Coagulación/Sedimentación
	Aplicación térrea
Materia ogánica biodegradable	Lodo activado
	Filtración por escurrimiento
	Contactores biológicos rotatorios
	Lagunas de areación
	Lagunas de oxidación
	Filtración intermitente con arena
	Aplicación térrea
	Físico/químico
Agentes infecciosos	Clorinación
	Ozonización
	Aplicación térrea
Nutrientes	
Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación por crecimiento suspendido
	Nitrificación y desnitrificación con película fija
	Separación de amoniaco
	Intercambio iónico
	Cloración en punto de ruptura
	Aplicación térrea

TABLA 2.5.4 (CONT.)
OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS PARA REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRINCIPALES CONTENIDOS EN AGUAS MUNICIPALES RESIDUALES

Contaminantes	*Operación y Proceso unitarios, o sistema de tratamiento*
Fósforo	Coagulación/sedimentación con sales metálicas
	Coagulación/sedimentación con cal
	Remoción de fósforo bioquímico/químico
	Aplicación térrea
Materia orgánica refractaria	Absorción con carbón activado
	Ozonación terciaria
	Aplicación térrea
Metales pesados	Precipitación química
	Intercambio iónico
	Aplicación térrea
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio iónico
	Ósmosis inversa
	Electrodiálisis

Por otra parte, el tratamiento secundario no puede producir un efluente de calidad aceptable que satisfaga los requisitos para ciertas aplicaciones de reúso; para tales fines, a continuación es posible realizar el tratamiento avanzado/terciario. Éste incluye procesos para remover sólidos suspendidos y substancias disueltas orgánicas o inorgánicas. Determinado por las características del agua bruta residual, del efluente del tratamiento secundario, y de la calidad final deseada, el proceso terciario puede incluir tratamiento químico, como: coagulación/floculación, filtración, adsorción mediante carbón activado, aereación, intercambio iónico, ósmosis inversa, térreo, etcétera.

En la tabla 2.5.4 se enlistan las operaciones unitarias y los procesos principales disponibles, y frecuentemente empleados en el tratamiento de aguas residuales municipales para la remoción de cada uno de los contaminantes presentes.[81] En la tabla 2.5.5 se enuncia la eficiencia de remoción generalmente observada en operaciones unitarias y procesos varios, con respecto a contaminantes específicos.[82] Los que deban incluirse en

un sistema de tratamiento particular, dependen primordialmente de la calidad deseada del efluente, que a la vez está determinada por los requisitos de la aplicación particular de reúso de que se trate.

2.5.3. Restitución y reúso de aguas municipales residuales

La tabla 2.5.6 presenta las posibles aplicaciones de reúso de aguas residuales restituidas, y las implicaciones principales de cada una.[81] De los varios efectos que deben preverse, el más común es la transmisión potencial de enfermedades intestinales por agentes infecciosos (patógenos). Sin embargo, con la condición de que se realice el grado apropiado de tratamiento, no hay evidencia epidemiológica fidedigna de que cualquiera de las aplicaciones ahí enlistadas haya causado algún brote severo de enfermedades infecciosas.[79] No obstante, a causa de que las técnicas epidemiológicas actuales pueden carecer de suficiente sensibilidad para detectar la transmisión de enfermedades de bajo nivel, la propagación potencial de padecimientos infecciosos por este medio permanece justamente como una preocupación de salud pública. Tal preocupación debe reflejarse desde las etapas tempranas de la planeación de cualquier esquema de restitución y reúso de aguas de desecho, y luego evaluarse constantemente durante el desarrollo y la ejecución del esquema.

Riego agrícola y de áreas verdes: este uso está bien establecido, particularmente en regiones áridas y áreas sujetas a sequías periódicas (Tabla 2.5.6). Además del aprovechamiento de aguas municipales residuales restituidas, en el riego agrícola se han usado volúmenes de otra procedencia, como las del procesamiento de alimentos, celulosa y papel, y efluentes de las industrias de la curtiduría y pecuaria.[79]

Una porción del efluente tratado en 11 de las 13 plantas de tratamiento de aguas municipales de desecho operadas por el DDF, se usa para irrigación de áreas verdes urbanas: parques, jardines, campos deportivos, etc. (Tabla 2.2.9 de la sección 2, de este capítulo).

Todas estas 11 plantas efectúan tratamiento secundario y desinfección, y dos realizan el terciario. En el área de servicio del Estado de México hay 14 plantas tratadoras de aguas residuales; sin embargo, para riego de áreas verdes se está usando el efluente tratado en sólo siete (Tabla 2.2.10 de la sección 2, de este capítulo).

Recientemente, las autoridades a quienes incumbe el agua en ambas entidades federativas expresaron su preocupación por la cantidad de agua potable que actualmente se usa para riego agrícola; se reconoce que la restituida podría cumplir igual de bien este propósito, y a la vez reducir la demanda de la potable. En la actualidad, en las áreas agrícolas de la ZMVM se está usando agua de desecho no tratada. Las mayores están en las inmediaciones de las áreas de servicio del Estado de México y de la porción suroriental del Distrito Federal.

TABLA 2.5.5

EFICIENCIA GENERAL DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ESPECÍFICOS POR OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS VARIOS

Unidad de proceso u operación

Constituyente	Tratamiento primario	Lodo activado (LA)	Nitricación	Desnitrificación	Filtración por escurrimiento	Contactor biológico rotatorio	Coag. Floc. Sed.	Filtración ulterior a LA	Adsorción con carbón	Remoción de amoniaco	Intercambio iónico selectivo	Cloración en punto de ruptura	Ósmosis inversa	Flujo por tierra	Irrigación	Infiltración-percolación	Cloración	Ozono
DBO	X	+	+	O	+	+	+	X	+		X		+	+	+	+		O
DQO	X	+	+	O	+		+	X	X	O	X		+	+	+	+		+
Sól. tot. susp.	+	+	+	O	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+		
N del NH_3	O	+	+	O		+	O	X	X	+	+	+	+	+	+	+		
N de NO_3				+				X	O					X				
Fósforo	O	X	+	+			+	+	+				+	+	+	+		
Alcalinidad		X					X	+								X		
Aceite y grasas minerales	+	+	+				X		X					+	+	+		
Coliformes totales		+	+		O		+		+			+		+	+	+	+	+
Sólidos Disueltos tot.													+					
Arsénico	X	X	X				X	+	O									
Bario		X	O				X	O										
Cadmio	X	+	+		O	X	+	X	O							O		
Cromio	X	+	+		O	+	+	X	X									
Cobre	X	+	+		+	+	+	O	X							+		
Fluoruros							X		O							X		
Hierro	X	+	+		X	+	+	+	+	+								
Plomo	+	+	+		X	+	+	O	X							X		

TABLA 2.5.5 (CONT.)

Constituyente	Unidad de proceso u operación																	
	Tratamiento primario	Lodo activado (LA)	Nitricación	Desnitrificación	Filtración por escurrimiento	Contactor biológico rotatorio	Coag. Floc. Sed.	Filtración ulterior a LA	Adsorción con carbón	Remoción de amoniaco	Intercambio iónico selectivo	Cloración en punto de ruptura	Ósmosis inversa	Flujo por tierra	Irrigación	Infiltración-percolación	Cloración	Ozono
Manganeso	0	X	X		0		X	+	X				+					
Mercurio	0	0	0		0	+	0	X	0									
Selenio	0	0	0				0	+	0									
Plata	+	+	+		X		+		X									
Cinc	X	X	+		+	+	+		+							+		
Color	0	X	X		0		+	X	+				+	+	+	+		+
Agentes espumantes	X	+	+		+		X		+				+	+	+	+		0
Turbidez	X	+	+	0	X		+	+	+				+	+	+	+		
Carbón orgánico total	X	+	+	0	X		+	X	+	0	0		+	+	+	+		+

Símbolos: 0 = 25% remoción de concentración del influente; X = 25.50%; + = > 50%; Los espacios en blanco denotan carencia de datos, resultados inconcluyentes o un incremento.

En el "Proyecto Texcoco" se planeó un vasto esquema de restitución y reúso de aguas cloacales.[63] Con base en la información existente y en experiencia previa, se propusieron dos programas de reúso de gran escala que involucran la cuenca de Texcoco, en el Estado de México; uno relativo a riego agrícola, y el otro referente a recarga artificial de agua subterránea. Para el primer caso habría que construir un sistema lagunar recirculatorio para tratamiento de aguas residuales, con capacidad de 8 m^3/s. El agua restituida mediante este sistema se destinaría al riego agrícola, en sustitución de la potable usada normalmente. Se reconoció que el alto nivel de nutrientes contenido en el efluente del sistema de tratamiento sería benéfico para la producción agrícola.

El riego agrícola y urbano con agua restituida tiene algunas ventajas. La primera es una acción efectiva de ahorro de agua. No hay motivo racional para requerir agua virgen u otra de calidad superior para irrigación agrícola, o agua potable para riego de parques y jardines. Además, comparada con otras fuentes alternas para riego agrícola, fre-

TABLA 2.5.6
APLICACIÓN DE AGUAS MUNICIPALES DE DESECHO E IMPLICACIONES

Aplicaciones de reuso	*Implicaciones*
Riego agrícola	Si no se maneja adecuadamente, polución de agua superficial y subterránea
Cultivos	
Viveros	Comercialización de cosechas y aceptación pública
Riego de áreas verdes	
Parques y jardines	Efecto de la calidad del agua, particularmente sales en suelos y cosechas
Patios escolares	
Camellones	En salud pública, referente a patógenos bacterias, virus y parásitos
Campos de golf	
Panteones	Control del área de uso, inclusive la zona intermedia
Ranchos	
Residencial	Puede resultar costosa para el usuario
Reciclamiento y reuso industriales	Constituyentes del agua restituida en nexos con incrustaciones, corrosión, desarrollo biológico e impureza
Refrigeración	
Calderas	
Procesos	En salud pública, particularmente transmisión de aerosoles patógenos en agua para refrigeración
Construcción pesada	
Usos urbanos no potables	En salud pública, patógenos transmitidos por aerosoles
Protección contra incendios	
Acondicionamiento de aire	Incrustaciones, corrosión, desarrollo biológico, e impureza
Evacuación de retretes	
	Conexiones cruzadas

cuentemente la restituida resulta más económica.[79] Asimismo, normalmente ésta representa una fuente constante y confiable no sólo de agua, sino también una valiosa fuente de nutrientes. Para su crecimiento sano, los cultivos y otros tipos de vegetación necesitan una cantidad significativa de nitrógeno y fósforo, y cantidades menores de potasio, cinc, hierro, boro, etc. El agua restituida contiene estos elementos, y por lo tanto puede remplazar, o al menos reducir, el consumo de fertilizantes comerciales; produce así un beneficio económico. Sin embargo, se ha de reconocer que en algunos casos los nutrientes contenidos en esta fuente pueden causar problemas, como cuando exceden las necesidades del crecimiento apropiado de la planta.[81] Por ejemplo, durante los

TABLA 2.5.6 (CONT.)
APLICACIÓN DE AGUAS MUNICIPALES DE DESECHO E IMPLICACIONES

Aplicaciones de reuso	*Implicaciones*
Recarga de agua subterránea	Compuestos químicos orgánicos y sus efectos
Relleno de agua subterránea	tóxicos. Sólidos disueltos totales, nitratos y
Control de intrusión salina	patógenos
Control de subsidencias	
Usos recreacionales/ambientales	En la salud, bacterias y virus
Embalses, lagos y estanques	Eutroficación debida a N y P
Ampliación de lagos	Toxicidad para la vida acuática
Aumento de caudal de corrientes	
Acuacultura	
Producción de nieve	
Reuso potable	Productos químicos orgánicos traza y sus
Mezcla en depósitos de provisión	efectos toxicológicos
Abasto de tubo a tubo	

últimos meses de una temporada de crecimiento, la disponibilidad de gran cantidad de nitrógeno puede causar crecimiento vegetal excesivo, demora de madurez o, de alguna otra manera, reducción de la calidad de un cultivo.

En sí, la aplicación de agua municipal residual en el terreno es un modo efectivo de tratamiento; empero, más a menudo, antes de que se emplee para irrigar, se requiere un procesamiento previo. Según que la aplicación en el terreno se haga con fines de tratamiento o que se destine para riego, el planteamiento del proyecto del sistema respectivo es diferente. En el caso de planeación, diseño y administración de un sistema de irrigación agrícola o urbano, el grado de procesamiento preaplicatorio es una consideración importante.[79] Este tratamiento es necesario para evitar cualquier condición adversa de salud pública y molestias durante su transporte, almacenamiento y aplicación, así como para prevenir daños al suelo, a los cultivos y/o al agua subterránea.

Los mayores riesgos de salud pública del agua residual restituida son los agentes infecciosos y la posible propagación de enfermedades entre la población humana, tanto los participantes en la operación de la irrigación como el público en general. Aunque en los EUA no hay una norma nacional referente a la calidad del agua restituida que se pretende

usar para riego, cierta cantidad de estados han establecido reglamentos basados en el grado de pretratamiento que se ha de aplicar o en la calidad del efluente tratado.[79,81] Comúnmente estos reglamentos reflejan el grado esperado de exposición humana; es decir, si el agua restituida se va a usar en riego agrícola o en áreas verdes urbanas y, en el primer caso, el tipo de cultivo, por ejemplo para alimento humano o para forraje. La tabla 2.5.7 es un sumario de los "Criterios de restitución de aguas residuales" aplicables en irrigación en el estado de California.[81,83] Nótese que en el caso de producción agrícola se requieren diferentes grados de tratamiento del agua, lo cual depende de si el producto se consume crudo o procesado, y del método de riego. Otros estados tienen requisitos similares relacionados con la salud. Por ejemplo, si se va a aplicar riego por aspersión a cultivos alimentarios, con respecto a presencia viral, el de Arizona demanda que el agua no debe exceder 1 PFU por 40 litros.[81] En Florida se exige que no haya coliformes fecales detectables por 100 ml de agua restituida. Este requerimiento se logra mediante filtración terciaria y desinfección; en particular, 1.0 mg/l de cloro residual total después de 30 minutos de contacto, en el flujo diario promedio.

El Distrito Federal estableció un criterio de calidad para el agua restituida usada en riego agrícola, con base en la cantidad de coliformes fecales, el cual depende del uso al que se destinen los cultivos irrigados.[84] Para cosechas destinadas a consumo humano o utilizadas en alimentación de animales, el MPN de tales coliformes no debe exceder de 1,000/100 ml. Si previamente al consumo humano se han de cocinar, este límite es de 10,000 MPN/100 ml. También el Estado de México aceptó y aplicó estas cifras. Por otra parte, en 1989, independientemente del tipo o del uso del cultivo, en reglamentos ecológicos para riego agrícola se estableció un nivel máximo de 1,000 MPN/100 ml de coliformes fecales.[85] En el caso de riego de áreas verdes urbanas, la norma se fijó en 1,000 MPN/100 ml.[84]

La calidad del agua restituida también es importante con respecto al rendimiento de los cultivos y las propiedades del suelo. La salinidad –la cantidad y la índole de las sales– puede crear una variedad de problemas. Es posible que la salinidad afecte el crecimiento de las plantas de tres maneras: 1) el total de sales disueltas en el agua del suelo puede causar un efecto osmótico; 2) ciertos iones constituyentes de las sales pueden tener la capacidad de ejercer una toxicidad específica; y 3) es factible que una salinidad baja con alta concentración de sodio cause dispersión de las partículas de suelo.[81] Se han propuesto pautas para la calidad del agua utilizada en riego con base en su efecto en el rendimiento de los cultivos y modificación de las propiedades del suelo.[81,86]

Además del riego de áreas verdes, hay cierta cantidad de otros usos urbanos potenciales del agua restituida; es decir, reciclada por la industria o reusada (Tabla 2.5.6). Otros

TABLA 2.5.7

CRITERIOS ACERCA DE AGUA RESTITUIDA PARA IRRIGACIÓN EN EL ESTADO DE CALIFORNIA

Uso del agua restituida	*Requisitos de tratamiento mínimo*			
	Tratamiento primario[a]	*Tratamiento secundario y desinfección*	*Tratamiento secundario: coagulación filtración*[b] *y desinfección*	*Coliformes MPN/100 ml promedio (muestreo diario)*
Riego agrícola				
Cultivos forrajeros	X			No requerido
Fibras	X			No requerido
Cultivo para simientes	X			No requerido
Productos para ingestión en crudo; riego con agua superficial		X		2.2
Productos para ingestión en crudo; riego por aspersión			X	2.2
Productos para procesarse; riego con agua superficial	X			No requerido
Productos para procesarse; riego por aspersión		X		23
Riego de áreas verdes				
Campos de golf, panteones y carreteras	X			23
parques, campos deportivos y patios escolares			X	2.2

[a]Efluentes que contengan no más de 0.5 ml/h de sólidos asentables
[b]Efluentes que contengan no más de 2 unidades de turbidez

usos urbanos podrí an incluir protección contra incendios, acondicionamiento de aire, evacuación de retretes, lavado de calles y automóviles, control de polvo, etc. En la ciudad de México, esta agua se está empleando para lavar carros particulares y vehículos de transporte público. Este concepto de abastecer un área urbana o una comunidad con agua no potable restituida, ha devenido en una manera aceptada de satisfacer la demanda de agua en regiones que sufren de provisión inadecuada de agua potable. La práctica de reúso urbano no potable puede adoptar la modalidad de suministrarse a usuarios individuales: una planta —o tal vez un complejo— industrial; o a una gran cantidad de con-

sumidores, mediante un sistema separado de distribución comparable al de la potable: uno dual. El nivel de tratamiento que se requiere para los otros usos urbanos de agua no potable, es el mismo que el necesario para el riego de parques, campos deportivos y patios escolares (Tabla 2.5.7).

Por otra parte, al proyectar sistemas de tratamiento de aguas residuales que involucren aplicación térrea, ya sean de régimen lento, de infiltración rápida o de flujo por superficie, primero es necesario definir plenamente los objetivos y luego avocarse a los requerimientos y a la selección del sitio, determinación de las características del cultivo, tratamiento requerido de preaplicación, método de distribución, tasa de aplicación, etc. El tratamiento preaplicatorio puede variar de primario a avanzado. En caso de usar infiltración rápida como método de aplicación térrea, se ha reportado que el único tratamiento necesario es la filtración producida por la percolación del agua: a través del suelo, en la zona vadosa y a cierta distancia del acuífero.[81] Con el agua extraída de tal sistema, es factible irrigar diversos cultivos alimentarios. Además, se debe reconocer que, con frecuencia, una parte del agua usada en tales sistemas, así como la que se utiliza en riego agrícola o de áreas verdes, llega inadvertidamente a los acuíferos, y así se convierte en recarga de los mismos.

Recarga artificial de agua subterránea: en todo el mundo el agua del subsuelo es un recurso valioso para satisfacer la necesidad de agua; en la ZMVM, 80% del suministro público proviene de estas fuentes. Sin embargo, la extracción excesiva y continuada a una tasa mayor que la de recarga natural puede causar declinación del nivel freático o, para propósitos prácticos y a largo plazo, la extinción del recurso. Debido a la sobrexplotación de los acuíferos del Valle de México, se estima que en los últimos 100 años ha habido 7.5 m de hundimiento; en algunas áreas de la ZMVM éste ha sido tan cuantioso como 40 cm/año (véase la sección 2.4, en este capítulo).

Un medio efectivo de complementar los procesos naturales de reposición del agua extraída a los acuíferos, es la recarga artificial (Tabla 2.5.6), cuya aplicación es útil cuando la extracción excede a la recarga. Por otra parte, la recarga artificial con agua residual restituida es una manera conveniente de aprovechar al agua residual restituida; se puede efectuar por cualquiera de estos dos métodos: anegamiento superficial o inyección directa en el acuífero subterráneo. En el primer método, el agua restituida se aplica en la superficie del terreno, y por infiltración/percolación a través del suelo se dirige hacia el acuífero.

En el caso de recarga por inyección directa, el agua restituida se bombea directamente a la zona saturada, comúnmente a través de pozos en un acuífero confinado.[87] A menudo este método se usa cuando el acuífero es profundo y/o donde, por condiciones hidrogeológicas y topográficas o disponibili-

dad limitada de terreno, el anegamiento es impracticable o demasiado costoso.

Mediante cualquiera de ambos métodos, es deseable localizar el sitio de recarga lo más distante de los pozos de extracción como sea posible. A mayor distancia entre las dos operaciones, mayor el tiempo de residencia y de mezcla del agua recargada con la natural,[87] como resultado, la restituida pierde su identidad. Con cualquiera de estos dos procedimientos, es extremadamente importante que el sitio de la operación de recarga se seleccione muy cuidadosamente para evitar la contaminación del acuífero.

El azolve del equipo usado al aplicar estos métodos puede ser un problema para el mantenimiento. En el caso de anegamiento se puede remediar simplemente mediante rastras de discos, escrepas u otros métodos; en el de pozos de inyección es más difícil, y a menudo más costoso y dilatado.[87] La causa más frecuente es la acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos, o por crecimiento microbiano. Inclusive una concentración de 1 mg/l de sólidos suspendidos en el agua restituída puede obstruir los pozos de inyección.

Aunque para anegamiento, en algunos casos dependientes del lugar, los tratamientos primario y secundario, más la filtración en medio granular y la desinfección, pueden ser suficientes, cuando el agua extraída se va a utilizar en usos no potables; sin embargo, con frecuencia para inyección directa el nivel de tratamiento requerido es superior. Los mayores problemas al usar agua restituida para recarga de agua subterránea son los agentes infecciosos y contaminantes tóxicos inorgánicos y orgánicos, y sus efectos nocivos para la salud. En el caso de constituyentes químicos tóxicos, que generalmente están presentes en cantidades traza en aguas residuales municipales antes de ser tratadas, ha de hacerse el mayor esfuerzo para eliminarlos mediante el control de su fuente. Es de advertir que, aun siguiendo el tratamiento más avanzado de preaplicación, en el agua restituida pueden estar presentes cantidades traza de contaminantes orgánicos tóxicos. Así, su remoción final está sujeta a una conjunción de procesos en el ambiente del subsuelo: biodegradación por microorganismos, oxidación y reducción químicas, absorción e intercambio iónicos, precipitación química, volatilización, etc. Mientras que los contaminantes en partículas, incluidos los microorganismos, se puedenremover mediante filtración a medida que el agua restituída pasa a través de la matriz del suelo, la acción física de filtración no elimina los contaminantes inorgánicos u orgánicos disueltos, excepto si se efectúa su precipitación. La remoción de constituyentes inorgánicos solubles, inclusive cantidades traza de metales tóxicos, se realiza primordialmente por precipitación en el subsuelo, intercambio iónico, adsorción, y quelación y formación de complejos.[81] Los procesos principales de separación de contaminantes orgánicos disueltos son la biodegradación microbiana y la adsorción. La primera tiene la facultad de

transmutar en inocuos los contaminantes orgánicos tóxicos o, posiblemente, de convertirlos en compuestos intermedios de toxicidad igual o mayor. En gran parte, la tasa y el grado de biodegradación son funciones tanto de la naturaleza de las sustancias orgánicas como de la presencia de aceptantes de electrones, como oxígeno disuelto, nitratos y sulfatos.[81]

Las variables importantes que afectan el destino de los agentes infecciosos en el ambiente del subsuelo comprenden la taxonomía de los diferentes microorganismos y sus respectivas características de sobrevivencia y retención en las condiciones de la matriz del suelo y las climáticas, por ejemplo temperatura y lluvia.[81,88] Tanto la sobrevivencia como la retención de microorganismos en la matriz del suelo están determinadas por las propiedades físicas y químicas del suelo, como capacidad higrofórica (retención de humedad), pH, y materia orgánica. En general, los quistes de protozoarios y las bacterias se pueden remover físicamente por filtración, como la aportada por el subsuelo, en tanto que la exclusión de los virus se hace principalmente por adsorción. Generalmente la inactivación y la extinción naturales ocurren más rápidamente con el incremento de temperatura. La percolación de agua de lluvia a través de la zona vadosa, según su pH, puede remover virus previamente adsorbidos, a los que luego les es factible introducirse en el agua subterránea.

No obstante que en los EUA no hay reglamentos acerca de recarga artificial de agua subterránea, se han publicado pautas mínimas.[87] En particular algunos estados han desarrollado guías y/o recarga basadas en cada caso. En la tabla 2.5.8 se enlistan los factores considerados para el desarrollo de pautas para recarga por anegamiento o por inyección directa.

Por lo que se refiere al Valle de México, el interés por la recarga artificial tiene antecedentes al menos desde 1943. En ese año se inició una obra de anegamiento usando la modalidad de modificación de canales de corriente. Ésta consistía en dos canales para el río Magdalena, localizado en la porción meridional del área de servicio del Distrito Federal. Las tasas máximas de infiltración logradas en cada uno de los canales fueron de 14 y 33 m^3/s. Aproximadamente en 1960 se suspendió esta obra por problemas de inundaciones. Un poco después, en el área del Ajusco, también en la parte sur, se inició una segunda obra empleando la misma técnica. El único resultado reportado fue que en algunos manantiales cercanos hubo incremento de flujo.

Alrededor de 1953, en las zonas occidental y central del área de servicio del DF se desarrolló un proyecto de recarga artificial mediante pozos de infiltración. En la occidental se registraron tasas de infiltración de 0.1 a 0.3 m^3/s; aparentemente poco después de iniciado el proyecto se cerraron los 42 pozos de la zona central, por problemas operacionales. En 1970 se crearon aproximadamente 56 pozos en la zona meridional del Distrito

TABLA 2.5.8

FACTORES PARA DESARROLLAR PAUTAS DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

	Anegamiento superficial	*Inyección directa*
Tratamiento	Control de fuentes de productos químicos tóxicos Sedimentación primaria y tratamiento biológico secundario Filtración terciaria granular del medio (posiblemente adsorción con carbón activado para remoción de constituyentes ogánicos) Desinfección	Control de fuentes de productos químicos tóxicos Sedimentación primaria y tratamiento biólogico secundario Coagulación química, clarificación y filtración granular del medio Adsorción con carbón activado Remoción de constituyentes orgánicos volátiles Ósmosis inversa u otros procesos membranáceos Desinfección
Profundidad al agua subterránea	Percolación a través de una zona insaturada de suelo Inalterado De 10 a 50 pies, según la tasa de percolación de los suelos	No Aplicable (inyección directa a acuíferos subterráneos)
Tiempo de retención en el terreno	De 6 a 12 meses, según el tipo de tratamiento	12 meses
Porcentaje máximo de agua restituida	20 a 50% anual en pozos de extracción, según la remoción de constituyentes orgánicos	20% anual, en pozos de extracción
Distancia horizontal	500 a 1,000 pies, según el pretratamiento	1,000 a 2,000 pies

Federal para el desfogue de aguas torrenciales durante la temporada lluviosa; éstos fueron capaces de desalojar hasta 35 m^3/s, que se supuso finalmente llegaron al acuífero. Así, esta experiencia, aunque desarrollada con otros propósitos, es importante desde el punto de vista de la recarga artificial del acuífero de la ZMVM.

En la misma región se emprendió otra obra para recarga artificial. Constaba de un sistema de zanjas, cada una de 0.5 m de profundidad, 2.0 m de longitud y 0.5 m de anchura. Su espaciamiento era equidistante a lo largo de las pendientes de los cerros de la Magdalena Contreras; se intentaba captar aguas torrenciales, con la consecuente infiltración natural en el suelo adyacente.

Como se mencionó previamente, el "Proyecto Texcoco" incluyó un programa de recarga artificial.[63] Se debía construir una planta de tratamiento con capacidad de flujo de 10 m^3/s, consistente en unidades secundaria y terciaria. El tratamiento secundario se haría por medio de lodo activado para reducir la concentración de contaminantes comunes (DBO, sólidos suspendidos, etc.); el terciario incluiría remoción de: a) detergentes, por el método de fraccionamiento de espumas; b) fósforo, metales pesados, etc., por el proceso de coagulación-floculación con alumbre, cal y polímeros; c) materia en partículas, mediante sedimentación e inmediata filtración dual de medios; y d) compuestos orgánicos disueltos, por adsorción de carbón activado; asimismo, desinfección con cloro. Se propuso usar el efluente final para recarga artificial por estanques de infiltración o mediante pozos de inyección. Aparentemente, este proyecto se continuó sólo en forma fragmentaria.

Tal vez el estudio más significativo de recarga artificial desarrollado y en ejecución por el DF es el que comprende dos pozos para inyección directa de agua restituida al acuífero. Mediante una planta a escala piloto se proyectó usar el efluente de dos plantas de tratamiento terciario de aguas de desecho; es decir que se aplican: eliminación de espumas, filtración y adsorción con carbón activado. Uno de tales pozos, el Sta. Catarina 6, se ubica en la parte suroriental del área de servicio del DF y utiliza el efluente de la planta tratadora de aguas residuales denominada Cerro de la Estrella. El agua restituida se inyecta en el acuífero a una tasa de hasta 0.05 m^3/s. Tres pozos estratégicamente localizados sirven para monitorear la calidad del agua del acuífero y los niveles piezométricos. El segundo pozo de inyección, designado SL-15, se encuentra en Xochimilco, en la porción meridional del DF, en la planta de tratamiento de aguas cloacales de San Luis Tlaxialtemalco. La operación de este pozo y la de sus otros tres pozos monitores conexos es similar a la del Sta. Catarina, excepto que la tasa de inyección del SL-15 es de 0.06 m^3/s.

Considerando la importancia extrema, para el abastecimiento de agua potable en la ZMVM, del acuífero del Valle de México como fuente primaria de agua, la continua declina-

ción de su nivel freático y el considerable hundimiento del terreno que continúa afectando al área metropolitana, la instauración de un programa de recarga artificial de agua subterránea tiene alto valor estratégico. Esto tendrá el efecto de complementar los procesos naturales de recarga, y como resultado paliará esos fenómenos nocivos.

Embalses recreativos: también es factible reusar el agua restituida en estanques recreativos y en una variedad de otros propósitos ambientales (Tabla 2.5.6). Un embalse se puede definir como un cuerpo acuático construido artificialmente, por ejemplo lagos y estanques. Estas obras, provistas de agua restituida, son usables para actividades en las que no se está en contacto con el agua, como náuticas y de pesca, o para natación, o simplemente para mejorar la estética de la periferia de áreas urbanas. Como en los otros casos, el uso al que se pretendan destinar los estanques determina el nivel de tratamiento requerido por el agua restituida. Si el contacto del público es limitado, como para navegación y pesca, se recomiendan tratamiento secundario y desinfección (valor medio de coliformes: 2.2 por 100 ml).[81] Si se va a permitir el nado, se requiere un nivel más alto de procesamiento: el secundario más filtración granular del medio y desinfección. En general, a mayor potencial de contacto humano corresponde un nivel más elevado de tratamiento. En el caso del DF, si no se espera contacto humano, la norma por cumplir para el reúso recreativo del agua restituida relativa a coliformes fecales es de 5,000 MPN/100 ml; si se prevé tal contacto, aquélla se reduce a 1,000 MPN/100 ml.[84] Independientemente de cuál sea la posibilidad de contacto, como pauta general se ha recomendado la cifra de 200 MPN/100 ml.

A causa de la concentración de nitrógeno y fósforo en el agua municipal de desecho, los embalses receptores de agua restituida se vuelven eutróficos. Una consecuencia importante y frecuente de la eutroficación es un gran crecimiento de algas; a menos que se le controle mediante la remoción de nutrientes, dichos estanques pueden tornarse desagradables a la vista y fétidos.

Actualmente, en varios embalses recreativos del DF se está agregando agua restituida. Para este propósito se está usando una porción del efluente procesado en ocho de las 13 plantas de tratamiento de agua residual en su jurisdicción. Además, el DF emprendió un proyecto ambicioso, que tiene implicaciones ecológicas significativas pues recurre al uso de agua restituida. Se trata de una serie de canales ubicados en la porción meridional de la ZMVM: la zona de canales del lago de Xochimilco. Por este medio se ha mejorado la calidad del agua en los 200 km de extensión de los mismos, y así se ha recuperado un ecosistema importante.

Reúso potable directo e indirecto: como recurso renovable, una porción determinada de agua se puede reusar muchas veces. Por ejemplo, la que una vez fue de desecho eventualmente se puede reutilizar como potable.

En este sentido, frecuentemente recipientes superficiales como ríos y lagos sirven como receptores de aguas municipales e industriales restituidas, y a la vez fungen como suministro de agua potable. Tomando como ejemplo el río Ohio, de los EUA, las descargas de aguas residuales tratadas de la ciudad de Pittsburgh, Pensilvania, vertidas en esa corriente fluvial, al llegar a Cincinnati, Ohio, se convierten en un pequeño porcentaje de su flujo, esta población a su vez usa este río como fuente primaria de agua para su abasto público. Similarmente, en áreas donde no se dispone de un sistema de drenaje, los propietarios de los predios y otras personas deben recurrir al uso de sistemas individuales de tratamiento del agua de desecho, como fosas sépticas. En este caso hay percolación del efluente hacia el terreno el cual se incorpora potencialmente al agua subterránea disponible, que a su vez se puede usar como si fuera potable. En todo el mundo, el reúso indirecto para este propósito ha sido –y continúa siendo– un procedimiento común. Adicionalmente, es factible que el reúso indirecto se realice mediante obras de ingeniería; tal es el caso de la recarga artificial de acuíferos.

Empleando instalaciones experimentales, en los EUA y en otras partes del mundo se ha investigado la restitución de aguas municipales de desecho para posible reúso potable directo: "de tubería a tubería" (Tabla 2.5.6). Aunque esta logística ha demostrado el potencial pretendido, sólo una instalación formal se ha puesto en operación en la que el agua restituida se ha vertido directamente para complementar la fuente existente de suministro de agua.[89] Esta planta de reúso potable, de 4,500 m^3/día, ubicada en Windhoek, capital de África Suroccidental/Namibia, empezó a operar en 1969, luego de una investigación intensiva en una planta piloto. Durante los más de diez años que la planta de restitución estuvo en operación continua se modificó y pogradó. A partir de un constante monitoreo biológico, químico, físico y toxicológico del efluente final tratado, se determinó que el agua restituida, o producto, era de calidad excelente. Estudios epidemiológicos mostraron también que no hubo efectos adversos en la salud humana. Debido al desarrollo de fuentes acuáticas alternas, en 1987 la planta comenzó a operar sólo intermitentemente. Aunque demostró la factibilidad del reúso potable directo, el efecto a largo plazo en la salud humana continúa siendo una interrogante, y por tanto un caso no resuelto. Todavía está por determinarse el efecto potencial en la salud, por la acción vitalicia de varios componentes químicos cuya existencia en el agua restituida es factible. Otro asunto pendiente e importante al respecto, es la posible presencia de cantidades traza desconocidas de compuestos orgánicos en el agua de desecho no tratada que hayan desafiado los análisis y que la tecnología actual no haya sido capaz de eliminar. Por estas razones y quizás otras, por ejemplo el rechazo del público, el reúso potable directo

del agua restituida se ha de plantear con precaución, y probablemente como consecuencia se le ha de considerar la opción menos deseable para resolver el problema de deficiencia de agua.

En 1982, el Distrito Federal desarrolló un plan maestro para tratamiento y reúso de aguas residuales.[90] Parte de sus objetivos era: 1) optimizar el uso de las fuentes hídricas existentes, y 2) incrementar el reúso de agua restituida, incluyendo recarga directa del acuífero y reúso –de tubería a tubería– potable. De acuerdo con este plan, en 1983 se construyeron dos plantas tratadoras piloto. Una se asignó a estudiar la potabilización del agua de un acuífero contaminado y no explotado; la otra se destinó al estudio del tratamiento avanzado de efluentes secundarios. Con base en los resultados obtenidos en estas plantas experimentales, se decidió construir una nueva instalación tratadora, con capacidad total de 0.30 m^3/s. El proyecto consistía en dos plantas paralelas e independientes para procesar efluentes secundarios. Una incluía ósmosis inversa, y la otra se proyectó para estudiar procesos físicos y químicos. Dependiendo de los resultados operacionales, el propósito del diseño era –con cambios mínimos– estar en capacidad de convertir completamente la instalación a tratamiento de agua subterránea, o al avanzado para la residual. En la actualidad, el agua restituida se está destinando a usos que no requieren potabilidad. Sin embargo, la meta establecida del proyecto era mezclar el agua restituida con la subterránea tratada y vertirla directamente en el sistema de distribución; es decir, la *potabilización de agua residual*, o reúso potable directo.[90]

Pautas para reúso de agua municipal de desecho. Ha habido algunos pocos casos en los que se aplica el reúso de aguas residuales inadecuadamente o sin tratar, provocando con ello problemas de salud.[91,92] Por esta razón, el objetivo primordial de tales pautas es proteger la salud pública; especialmente controlar los agentes infecciosos.

Al establecerlas, se recomienda que se aborden tanto el grado de tratamiento como la calidad del agua restituida, por las razones siguientes:[87]

> "Puede ser que los criterios de calidad del agua que incluyen el uso de parámetros sustitutos no caractericen adecuadamente la del agua restituida...
> Una combinación de requisitos conocidos de tratamiento, con otros de calidad, evita la necesidad de monitorear en el agua producida ciertos constituyentes; por ejemplo, algunos componentes químicos o microorganismos patógenos...
> Se elimina el costoso, laborioso y –en algunos casos– cuestionable monitoreo de organismos patógenos, como los virus, sin comprometer la protección de la salud; y...
> Se aumenta la confiabilidad en el tratamiento."

Referencias

1. Marsal, R.J., *El hundimiento de la ciudad de México*, El Colegio Nacional, 1974, 1992.
2. Herrera, I., J. Alberro, R. Graue y J.J. Hanel, "Development of artificial reservoirs by inducing land subsidence", en *Land Subsidence Symposium*, núm. 121, IAHS-AISH, 1977, pp. 39-45.
3. Herrera, I., J. Alberro, J.L. León y B. Chen, "Análisis de asentamientos para la construcción de los lagos del Plan Texcoco", UNAM, Instituto de Ingeniería, núm. 340, 1974.
4. Herrera, I. y J. Alberro, "Construcción de lagos por bombeo", en *Memorias del IV Congreso Nacional de Hidráulica, II*, Acapulco, 1976.
5. SHCP, *El hundimiento de la ciudad de Méxixo. Proyecto Texcoco*, volumen Nabor Carrillo, México, 1969.
6. Carrillo, N., "Influence of artesian wells on the sinking of Mexico City", Proc. del 11th International Conference on Soil Mechanics, Holanda, 1948.
7. Kumate, J. y M. Mazari (eds.), *Problemas de la cuenca de México*, El Colegio Nacional, México, 1990, p. 403.
8. Mazari, M. y J. Alberro, "Hundimiento de la ciudad de México", en *Problemas de la cuenca de México*, Kumate, J. y M. Mazari (eds.), El Colegio Nacional, México, 1990, pp. 83-114.
9. Marsal, R.J., F. Hiriart y R. Sandoval, *Hundimiento de la ciudad de México, observaciones y estudios analíticos*, Ediciones ICA, Serie B, núm. 3, 1952.
10. Zeevaert, L., "Pore pressure measurements to investigate the main source of surface subsidence in Mexico City", Proc. de la III International Conference on Soil Mechanics, Zurich, 1953.
11. *Boletines de Mecánica de Suelos*, Comisión Hidrológica de la cuenca del Valle de México, SRH, 1953-1969.
12. *Boletines de Mecánica de Suelos*, Comisión de Aguas del Valle de México, 1970-1974.
13. Hiriart, F. y R. J. Marsal, "El hundimiento de la ciudad de México", en *El hundimiento de la ciudad de México Proyecto Texcoco*, vol. Nabor Carrillo, SHCP, México, 1969, pp. 109-147.
14. Marsal, R.J. y M. Mazari, *El subsuelo de la ciudad de México*, 2 vols., UNAM, Instituto de Ingeniería, México, 1959.
15. Marsal, R.J. y R. Graue, "El subsuelo del lago de Texcoco", en vol. Nabor Carrillo, *El hundimiento de la Ciudad de México. Proyecto Texcoco*, SHCP, México, 1969, pp. 167-203.
16. Juárez-Badillo, E., "Mechanical Caracterization of Mexico City Clay", del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 1982, pp. 65-69.
17. Juárez-Badillo, E., "Constitutive Relationships for Soils", del Symposium on

Recient Development in the Analisis of Soil Behaviour and the Aplication of Geotechnical Structures, University of New South Wales, Australia, 1975, pp. 231-257.

18. Herrera, I., J.L. León y R. Fernández del Olmo, "Preconsolidation and its Rheological Implications", Proc. de la IX Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, núm. 1, Tokio, 1977, pp. 127-130.
19. Herrera, I., "El concepto de preconsolidación de los suelos", en *Ingeniería*, 46(1), 1976, pp. 53-60.
20. Herrera, I., "Ecuaciones constitutivas de los suelos", UNAM, Instituto de Ingeniería, 1976, p. 370.
21. Roscoe, K.H. y J.B. Burland, "On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay", en *Engineering Plasticity*, Heyman y Leckie (eds), Cambridge University Press, 1968, pp. 535-609.
22. Herrera, I., y G.E. Figueroa, "A correspondence principle for the theory of leaky aquifers", en *Water Resources Research*, 5(4), 1969, pp. 900-904.
23. Herrera, I., "Theory of mutiple leaky aquifers", en *Water Resources Research*, 6 (1), 1970, pp. 185-193.
24. Bredehoeft J. D., Pinder, G. F., "Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems: A Quasi Three-Dimensional Model", en *Water Resources Research*, 3(6), 1970, pp. 883-888.
25. Herrera, I. y Rodarte, L., "Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers and applications", Parte 1: "The nature of approximate theories", en *Water Resources Research*, 9(4), 1973, pp. 995-1005.
26. Herrera, I., "Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers and applications", Parte 2: "Error analysis of approximate theories", en *Water Resources Research*, 10(4), 1974, pp. 811-820. UNAM, Instituto de Ingeniería, E-6, 1973.
27. Herrera, I. y Yates, R., "Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers", Parte 3: "A numerical method of unlimited applicability", en *Water Resources Research*, 13(4), 1977, pp. 725-732.
28. Herrera, I., "A review of the integrodifferential equations approach to leaky aquifer mechanics"; "Advances in Ground water Hydrology", Proc. del III AWRA Symposium, Chicago, 1976, pp. 29-47 (ponencia invitada).
29. Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J. P., "Subrutinas y perfeccionamientos del programa para la simulación de acuíferos múltiples", Departamento del Distrito Federal, Contrato 0-33-1-275, IIMAS-UNAM, 1982.
30. Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J. P., "Estudio de hundimiento y balance de los acuíferos subterráneos a la ciudad de México", Departamento del Distrito Federal, Contrato 0-33-1-275, IIMAS-UNAM, 1982.

31. Criuckshank, V.C., I. Herrera, R. Yates., J.P. Hennart., D. Balarezo y R. Magaña, *Modelos de predicción del hundimiento del subsuelo del Valle de México*, proyecto 9138, UNAM, Instituto de Ingeniería, México, 1979.
32. "El Sistema acuífero de la cuenca de México", volumen especial, Ismael Herrera (ed.), en *Geofísica Internacional*, 28 (2), Unión Geofísica Mexicana, 1989, pp. 133-449.
33. Herrera, I., R. Martínez G. y G. Hernández, "Contribución para la Administración científica del agua subterránea de la cuenca de México", "El sistema acuífero de la cuenca de México", volumen especial, Ismael Herrera (ed.), en *Geofísica Internacional*, 28 (2), Unión Geofísica Mexicana, 1989, pp. 297-234.
34. Herrera, I., Medina, R., Carrillo, J. y Vázquez, E., "Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras", DDF -DGCOH, Contrato No. 3-33-1-0689, UNAM, Instituto de Geofísica, 1994.
35. Domínguez R., Cruickshank C., Fuentes O., Domínguez E. y García A., *Manual de Hidrología urbana*, Departamento del Distrito Federal (DDF), México, p. 350, 1982.
36. Cruickshank C., "Modelos matemáticos para el acuífero del Valle de México", en *El sistema hidráulico del Distrito Federal.* (Cap. 6), DDF, Secretaría General de Obras y Servicios, DGCOH, México, p. 23, 1982.
37. Rivera-Bustos, A., "Modèle hydrologique quasi-tridimensionnel non-linaire pour simuler la subsidence dans les systèmes aquifers multicouches: cas de Mexico", tesis de doctorado, École Nationale Superieure des Mines de Paris, 1990.
38. Newmark, N.W. y E. Rosenblueth, "Fundamentals of earthquake engineering", Prentice-Hall, Inc., 1971.
39. Herrera, I. y E.Rosenblueth, Response spectra on stratified soil", Proc. del III World Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelandia, 1965, pp. 44-56.
40. Herrera, I., E. Rosenblueth y O. Rascon, "Earthquake spectrum prediction for the Valley of Mexico", Proc. del III World Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelandia, 1965, pp. 61-74.
41. Hernández-Moedano, 1967.
42. DDF (DGCOH), "Memorias del drenaje profundo", México, 1974.
43. Pérez Cruz, G., "Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México", tesis de maestría, México, UNAM, 1988.
44. Vázquez E. y Jaimes R., "Geología de la cuenca de México", en El Sistema Acuífero de la Cuenca de México, volumen especial, Ismael Herrera (ed.), en *Geofísica Internacional*, 28(2), Unión Geofísica Mexicana, 1989, pp. 133-190.
45. Mooser, F. y C. Molina, "Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de Méxi-

co", en *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra*, 3(1), México, 1993, pp. 68-84.

46. *Compendio DGCOH, 1992*, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1992.
47. Alanís L., Ortiz M. y Pérez E., "Abastecimiento de agua potable en el Valle de México", Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México, Water Supply, Section 7, documento preliminar, Vistahermosa, 1993.
48. Área Metropolitana de la ciudad de México-Síntesis de Resultados-X Censo General de Población y Vivienda 1990, México, INEGI, 1991.
49. Enrique Pérez S., comunicación personal, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México, 1993.
50. Tchobanoglous, G. y Schroeder, E. D., *Water Quality*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1985.
51. *El Sistema Hidráulico del Distrito Federal. Un servicio público en transición*, DDF, Secretaría General de Obras y Servicios, DGCOH, México, 1982.
52. *Plan maestro de agua potable, alcantarillado y saneamiento del Estado de México 1994-2000*, t. 2, Gobierno del Estado de México, mayo, 1993.
53. *Estrategia metropolitana para el sistema hidráulico del Valle de México*, Departamento del Distrito Federal y Gobierno del Estado de México, 1989.
54. Arturo Correa C., comunicación personal, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1993.
55. Cuauhtémoc Carreño, comunicación personal, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México, 1993.
56. Daniel Arcos, comunicación personal, Comisión Nacional del Agua, 1993.
57. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, "Actualización de balances hidráulicos de la cuenca del Valle de México", Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1981.
58. Murillo R., "Sobreexplotación del acuífero de la cuenca del Valle de México: efectos y alternativas", en *El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 1990, pp. 109-119.
59. Miguel A. Cortés y Julia Rivera, comunicación personal, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1993.
60. Mazari M. y Mackay M. D., "Potential Groundwater Contamination by Organic Compounds in the Mexico City Metropolitan Area", en *Env. Sci. Technol.*, 27(5), 1993.
61. DDF, *Interceptores profundos y el emi-*

sor central. Un nuevo sistema para el Distrito Federal, Dirección General de Obras Públicas, 1969.

62. *Plan maestro de agua potable, alcantarillado y saneamiento del Estado de México, 1994-2000*, t. 4, Gobierno del Estado de México, mayo, 1993.
63. Cruickshank G., "Experiencias para incrementar la disponibilidad de agua en el Valle de México". Trabajos presentados en la 1a. reunión plenaria sobre el proyecto "Estudio de acuífero de la ciudad de México", Academia de la Investigación Científica, Academia Nacional de Ingeniería, U.S. National Research Council, México, 1992.
64. *Manual-Guidelines for Water Reuse*, U.S. Environmental Protection Agency y U.S. Agency for International Development, Washington, EPA/625/R-92/004, 1992, pp. 247.
65. Flores López, R., *Informe geológico final del estudio sísmico de reflexión de la ciudad de México*, México, Pemex, 1987.
66. Cortés, A., Durazo J., y Farvolden N., "Studies of Isotopic Hydrologhy of the Basin of Mexico and vecinity; annotated bibliography and interpretation", en *Journal of Hydrology*, 1994 (en prensa).
67. Rudolph, D. L., I. Herrera y R. Yates, "Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near México City. El sistema acuífero de la cuenca de México", Ismael Herrera (ed.), en *Geofísica Internacional*, 28(2), Unión Geofísica Mexicana, 1989, pp. 363-408.
68. Orozco y Berra, *Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México*, Imprenta de A. Boix, México, 1864, p. 185.
69. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, "Hidrología del Valle de México", 1964.
70. Lesser-Illades, J. M. Sánchez-Díaz, F. y González-Posadas, D., "Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México", en *Ingeniería Hidráulica en México*, I(5), México, 1990, pp. 52-60.
71. Lesser-Illades, J. M. Sánchez-Díaz F. y González-Posadas, D. "Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México", en *Ingeniería Hidráulica en México*, septiembre-diciembre, 1986, pp. 64-77.
72. Haro, X. y D. Arcos, comunicación personal, Comisión Nacional del Agua, 1993.
73. Ortega, A., Cherry, J. A. y Rudolph, D.L., "Large-scale aquitard consolidation near Mexico City", en *Ground Water*, 31(5), 1993, pp. 708-718.
74. Rudolph, D. L., "Studies of groundwater flow and solute transportation in a clay aquitard near Mexico City", tesis de doctorado, Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Ontario, 1989.
75. Jaime, P. A., "Problemática de la ingeniería de cimentaciones en el Valle de México. I. Aspectos generales y condiciones del Suelo", en *Problemas de la Cuenca de México*, Kumate J. y M. Mazari

(eds.), El Colegio Nacional, México, 1990, pp. 115-145.

76. Mendoza M. L., "Problemática de la ingeniería de cimentaciones en el Valle de México. II. Comportamiento de cimentaciones", en *Problemas de la Cuenca de México*, Kumate J. y M. Mazari (eds.) El Colegio Nacional, México, 1990, pp. 147-177.
77. Romo P. M., "Problemática de la ingeniería de cimentaciones en el Valle de México. III. Aspectos sísmicos", en *Problemas de la Cuenca de México*, Kumate J. y M. Mazari (eds.), El Colegio Nacional, México, 1990, pp. 215-245.
78. *Plan maestro de agua potable, alcantarillado y saneamiento del Estado de México 1994-2000*, t. 1, Gobierno del Estado de México, mayo, 1993.
79. *Task Force on Water Reuse*, Water Poll. Cont. Fed., Manual of Practice SM-3, 2a. ed., 1989, pp. 243.
80. World Bank, *Development and the Environment, World Development Report 1992*, Oxford University Press, Nueva York, 1992.
81. Tchobanoglous, G. y Burton, F. T. (rev.), *Wastewater Engineering; Treatment, Disposal and Reuse*, Metcalf and Eddy Inc., Nueva York, 1991, pp. 1334.
82. *Water Reuse and Recycling. Evaluation of Treatment Technology,* Office of Water Research and Technology, U.S. Department of the Interior Washington, D.C. (preparado por Culp/Wesner/Culp, Ed Dorado Hilk, CA), vol. 2, OWRT/RU-79/2, 1979, pp. 341.
83. *Wastewater Reclamation Criteria,* State of California Administrative Code, Title 22, Division 4, Environmental Health, Department of Health Service, Berkeley, 1978.
84. Correa, Arturo, comunicación personal, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1993.
85. *Gaceta Ecológica*, "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua", CE-CCA-001/89, 1990.
86. *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater-A*, Guidance Manual, Pettygrove, G. S. y Asano, T. (eds.), Lewis Publishers, Inc. Chelsea, 1985, pp. 396.
87. *Manual Guidelines for Water Reuse*, U.S. Environmental Protection Agency y U.S. Agency for International Development, EPA/625/R-92/004, 1992, pp. 247.
88. *Artificial Recharge of Groundwater*, Asano, T. (ed.), Butterworth Publishers, Boston, 1985, pp. 767.
89. Odendaal, P. E. y Hattingh, W. H., *Status of Potable Reuse Research in South Africa*, Procs. del IV Water Reuse Symposium, publicado por American Water Works Association, Denver, 1987, pp. 1339-1348.
90. Espino, E., Vázquez, M. y Flores, F., *Pilot Studies of Wastewater Potabilization in México City*, Procs. del IV Water Reuse

Symposium Denver, 1987, pp. 693-703.
91. Feachem, R. G. *et al.*, *Sanitation and Disease: Health Aspects of Excreta and Wastewater Management*, publicado por el World Bank, Washington, John Wiley & Sons, Nueva York, 1983.
92. Shuval, H. I. *et al.*, "Wastewater Irrigation in Developing Countries-Health Effects and Technical Solutions", en *Technical Paper*, núm. 51, World Bank, Washington, 1986.

CAPÍTULO 3
CALIDAD Y SALUD PÚBLICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Los 15 millones de habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) dependen en su mayor parte del agua que proviene del acuífero local. Los problemas inherentes a la altitud de la ciudad, que dificulta la transferencia de agua de otras cuencas, en su mayor parte de menor altitud, se perciben con claridad frente al desafío que implica proteger la calidad de este recurso y hacer un uso y reúso eficiente de él. Se reconoce que, ante la magnitud de los problemas por resolver, es indispensable ponderar cada uno de ellos para establecer prioridades de acción.

De lo expuesto se desprende el enfoque que se ha seguido en la estructuración de este capítulo, el cual resalta la importancia de la prevención de riesgos desde dos perspectivas: la relativa al deterioro de la calidad del agua del acuífero de la ZMVM y la concerniente a la afectación de la salud de los habitantes de esta gran metrópoli por la exposición a contaminantes presentes en el agua para consumo humano.

Por lo anterior, y retomando algunos temas referidos previamente, en este capítulo se han integrado tres secciones que tratan de la vulnerabilidad: del acuífero, del sistema de distribución de agua potable y de la salud de la población de la ZMVM, con el objetivo de destacar aquellos elementos críticos sobre los que se requiera intervenir para prevenir riesgos.

La calidad del agua para consumo se define desde la perspectiva de los factores que en ella inciden de manera negativa, así como de los efectos potenciales adversos que su deterioro puede implicar para la salud de los consumidores, tomando como modelo las enfermedades infecciosas intestinales, sumamente frecuentes en México, que afectan a la población infantil. En lo que se refiere a la exposición de sustancias tóxicas y al desarro-

llo de padecimientos crónicos, sólo se menciona el procedimiento que se sigue para su estudio.

Se ponen de relieve los procesos y actividades que pueden propiciar la contaminación del acuífero y del agua suministrada a través de los sistemas de abastecimiento público. Por el contrario, sólo se hace referencia colateral a las fuentes externas que aportan agua a la ZMVM, o al empleo del agua residual que se genera en ella para el riego de zonas agrícolas dentro y fuera del valle de México, con el fin de hacer notar la interdependencia de los recursos hídricos de entidades vecinas.

También se plantea el hecho de que en los años recientes se han establecido políticas, disposiciones legales y programas de acción intersectorial, destinados a atender los problemas más apremiantes que se describen, para ilustrar las diferentes situaciones relativas al deterioro de la calidad del agua, con el propósito de ubicar dichos problemas en perspectiva y determinar cómo han evolucionado.

Por tratarse de un documento binacional, México-Estados Unidos, se ha procurado incorporar referencias de observaciones relativas a este último país que permitan identificar problemas similares y la manera como éstos son abordados. También se destacan ejemplos de colaboración con universidades estadounidenses y canadienses que han participado en estudios relacionados con el acuífero de la ZMVM.

Como corolario, se realiza un análisis de perspectivas de acción e investigación, para superar o conocer más a fondo los problemas identificados y proponer soluciones.

3.2. Vulnerabilidad del acuífero

Para fines de este análisis, se entiende la "vulnerabilidad del acuífero" como una variable espacial que permite distinguir las zonas del valle de México donde hay un mayor riesgo potencial de infiltración de contaminantes, desde la superficie hasta el acuífero actualmente en explotación, por lo cual se consideran a continuación diversos elementos básicos para definir bajo esos términos las características de la ZMVM.

3.2.1. El escenario

Como ya ha sido señalado en capítulos anteriores, hasta principios del siglo XVII, la cuenca de México incluía vastas depresiones topográficas que comprendían tres sistemas de lagos naturales someros que a su vez definen 3 subcuencas interconectadas, situadas a niveles ligeramente diferentes:

- Una septentrional: lagos Zumpango-Xaltocan
- Una central: lagos México-Texcoco
- Una meridional: lagos Chalco-Xochimilco.

El lago más bajo, el de Texcoco, actuaba como terminal, pues recibía excedentes de

agua de los otros sistemas. Se identificó un marcado contraste de salinidad entre el lago central (Texcoco) y los lagos meridionales de agua dulce, y el de Zumpango al norte [Niederberger, 1987]. Estos lagos ocupaban una superficie de aproximadamente 1,500 km^2.

Actualmente, el área lacustre activa de la cuenca no rebasa los 50 km^2 y comprende remanentes de los lagos de Texcoco, Zumpango, Xochimilco y Chalco.

La ZMVM ocupa actualmente 1,300 km^2 y abarca parte de las subcuencas citadas, en las que se puede distinguir una zonificación, desde el punto de vista geotécnico, que comprende tres zonas: a) lacustre, b) montañosa y c) de transición [Marsal y Mazari, 1969].

Zona lacustre. Los depósitos arcillosos de la zona lacustre se caracterizan por su alta porosidad y extremadamente alta compresibilidad. Estos depósitos constan de dos formaciones: superior e inferior, y alcanzan los 30 m y 70 m de espesor, respectivamente [Lesser, 1991a], aunque pueden alcanzar hasta los 400 m, como en Chalco; están divididos por una capa dura compuesta predominantemente por limos y arenas. A la capa de arcilla se le considera un acuitardo, ya que es considerablemente menos permeable que la capa dura o los sedimentos subyacentes [Marsal y Mazari, 1969]. Con elevaciones en el intervalo de 2,230 a 2,250 msnm y un área de 1,431 km^2, es la zona original de descarga del sistema de flujo subterráneo con nivel freático de somero a superficial. Los gradientes piezométricos ascendentes eran dominantes hasta el decenio de 1940. Actualmente, el nivel freático en arcillas permanece somero y parcialmente colgado del nivel estático acuífero. En su mayoría los gradientes en arcillas son descendentes, [Marsal y Mazari, 1969; Ortega y Farvolden, 1989; Durazo y Farvolden, 1989].

Zona montañosa. Producto de la actividad volcánica, con basaltos fracturados, ceniza volcánica y depósitos fluviales y glaciales. Con elevaciones superiores a los 2,250 msnm, comprende dos volcanes que exceden 5,000 msnm y ocupa un área de 4,667 km^2. En ella el agua de precipitación fluye hacia la parte central del valle, como flujos superficiales y subterráneos. Se identifica una diversidad de sistemas locales de flujo muy dinámicos en las cuencas de las montañas pequeñas.

Zona de transición. Se encuentra entre la zona lacustre y la zona montañosa. En estas áreas los depósitos lacustres alternan con paleo-suelos profundos de origen aluvial, que reflejan el movimiento del sistema lacustre antiguo. En las áreas cercanas a la Sierra Nevada, la zona de transición está conformada por interdigitaciones de basaltos. Se considera que, por lo general, la zona de transición presenta una permeabilidad relativamente alta en comparación con las arcillas lacustres, por lo cual existen condiciones propicias para la infiltración de agua y contaminantes y

consecuentemente para la circulación hacia la zona lacustre.

El acuífero en explotación en el valle de México se compone de sedimentos aluviales y volcanoclásticos cuyo grosor varía de 100 a 500 m. El acuífero es una unidad heterogénea de limo, arena y grava, en su mayor parte cubierta directamente por las arcillas lacustres [Marsal y Mazari, 1969]. El basamento del contenedor sedimentario está constituido por calizas marinas sepultadas a una profundidad correlacionable, en proyección, con el nivel del mar [Mooser y Molina, 1993].

3.2.2. Factores que afectan al acuífero

El sistema de flujo regional

El estado del relieve actual de la cuenca se generó por procesos volcánicos y tectónicos que obstruyeron el drenaje hacia el exterior y crearon una cuenca cerrada (Fig. 3.2.1). El sistema de flujo de las aguas subterráneas tuvo un régimen original de recarga en las montañas circunvecinas y zonas de transición internas, y descarga en los bordes y en el interior de las planicies lacustres [SARH-CAVM, 1988; Ortega y Farvolden, 1989; Durazo y Farvolden, 1989].

Los pozos profundos de alto caudal se han perforado en la zona lacustre y a partir de la década de 1960, principalmente en la de transición. La extracción total dentro de la cuenca en 1989 se estima entre 45 y 55 m^3/s [Sahab-Haddad, 1989; DDF, 1991; Lesser, 1990]. Los pozos de suministro de agua potable son aproximadamente 1,200 (incluyen tanto los de las delegaciones del DF como los de los municipios conurbados del Estado de México) [DDF, 1991].

Alteraciones naturales de la calidad del agua subterránea

Se ha dedicado particular atención a la concentración de sólidos disueltos en el acuífero, como lo muestran los censos realizados por la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) en los años 1969, 1977, 1982 y 1983, así como los monitoreos regulares efectuados por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Departamento del Distrito Federal (DDF) y la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México (CEAS) en los municipios conurbados.

Mineralización del agua. En lo que se refiere a este punto, a este respecto, algunos estudios químicos e isotópicos han diferenciado dos tipos de agua: la del acuífero y la intersticial contenida en el acuitardo lacustre [SARH-CAVM, 1988]:

Recientemente se ha estudiado el agua intersticial de los acuitardos de Texcoco [Rudolph *et al.* 1991; Mazari, 1992; Pitre 1993].

Por medio de métodos geofísicos, el agua del acuitardo lacustre resulta ser más mineralizada que la del acuífero [Rodríguez, 1987]. En Chalco, estudios geoeléctricos han mostrado que el paquete arcilloso contiene agua con mineralización mayor o igual a 1,100 mg/l, mientras que el acuífero granular presenta 200-300 mg/l [Rodríguez y González, 1989].

FIGURA 3.2.1

SISTEMA LACUSTRE

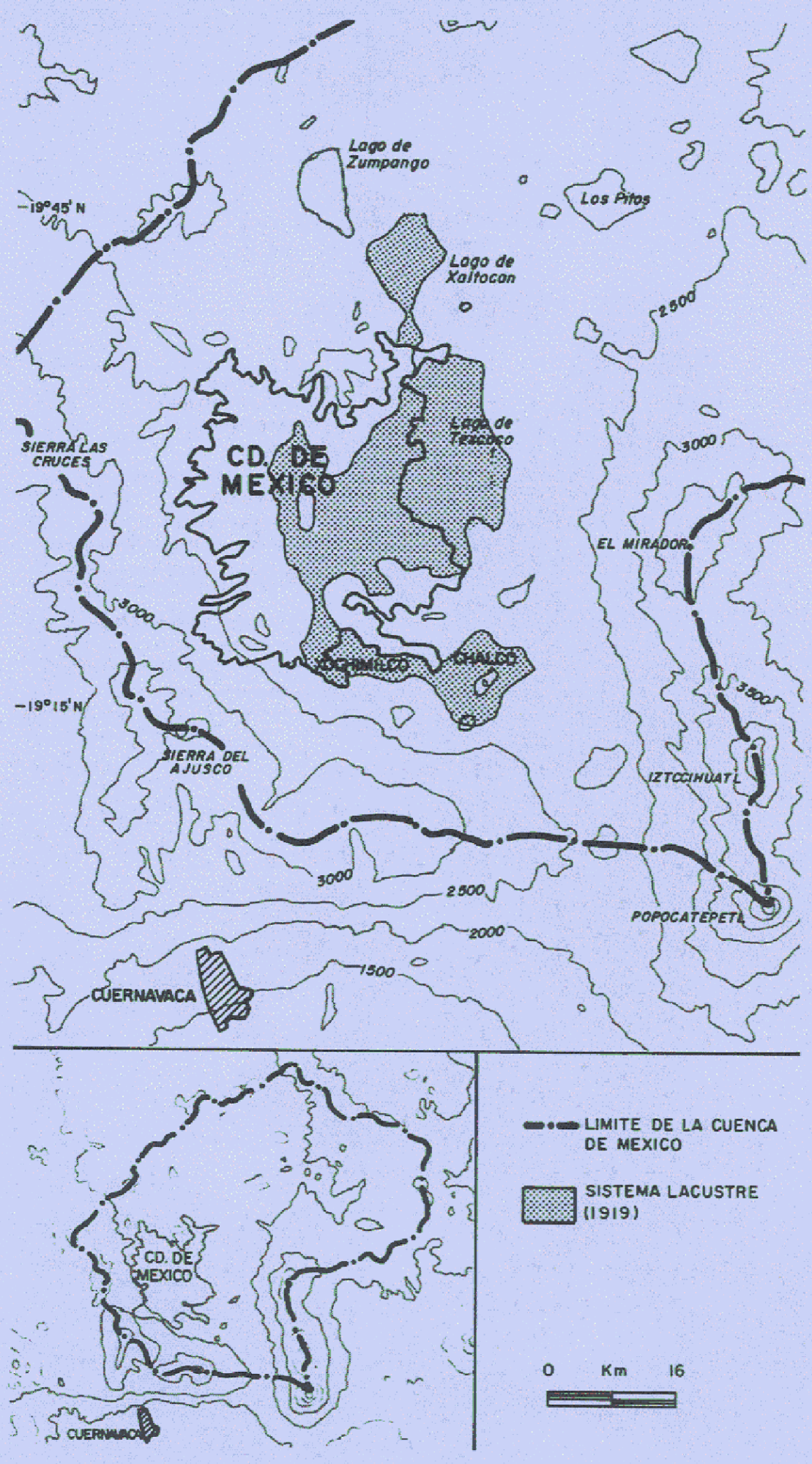
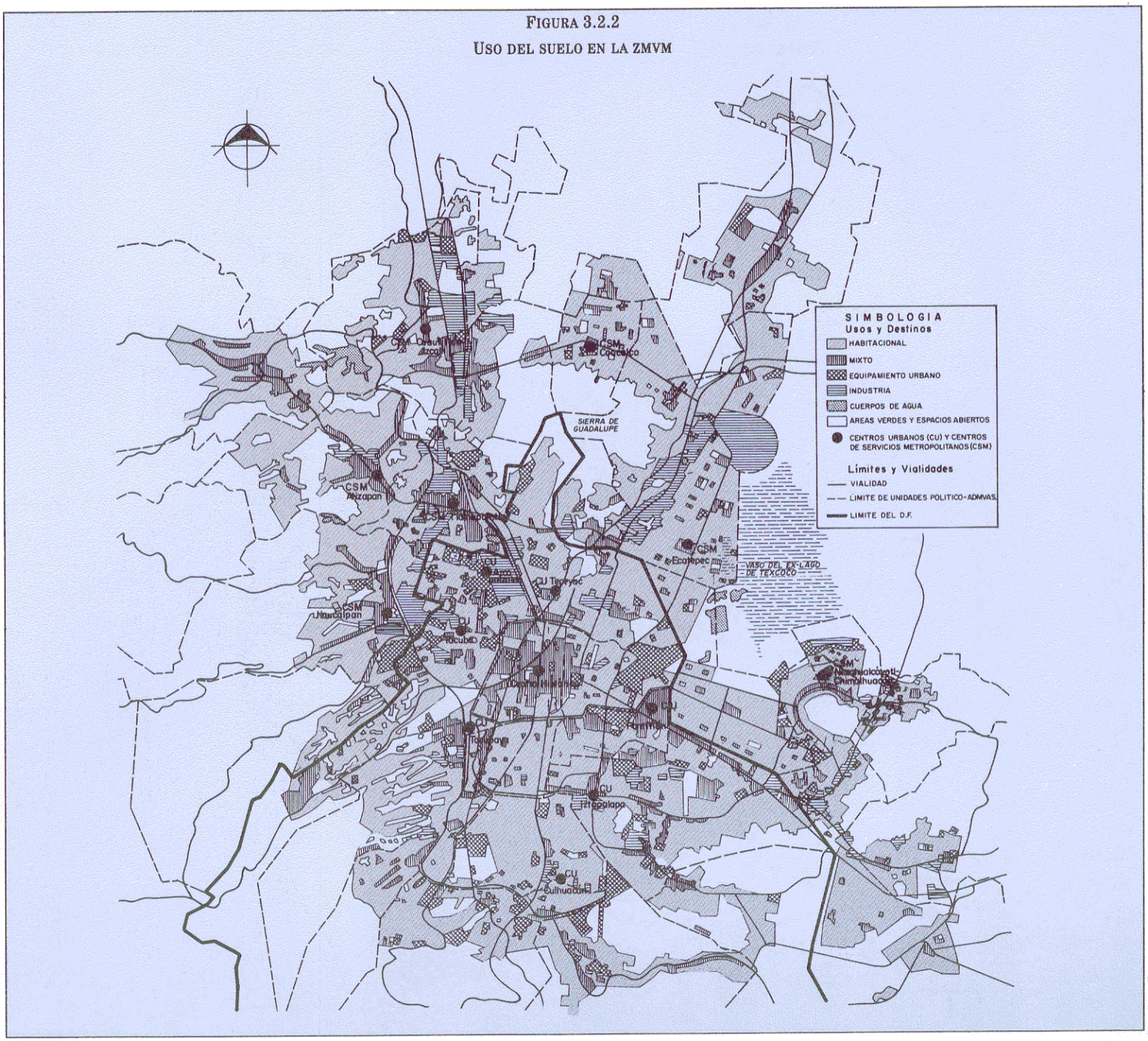


FIGURA 3.2.2

USO DEL SUELO EN LA ZMVM



Se desconocen estudios que reporten el grado de mineralización del agua de los estratos más profundos de la zona de extracción.

Zonificación de la calidad del agua del acuífero. El agua de calidad variable proveniente del acuífero ha existido de manera natural en diversas zonas y en distintos estratos. El análisis regional [SARH-CAVM, 1988] de las concentraciones del cloruro en el agua del acuífero durante el periodo 1969-1983, puso en evidencia situaciones variadas, tanto de incremento y disminución como de estabilidad: el fenómeno tiene características zonales y es más notable en la parte occidental de la zona de transición. Esto lo induce el bombeo y se atribuye a la redistribución de cuerpos de agua de mineralización original distinta. Se plantea la posibilidad de una intrusión generalizada de las aguas salinas de los domos piezométricos de la zona del lago de Texcoco hacia las zonas de acuíferos vecinos.

De acuerdo con Lesser *et al.* [1990], durante los últimos 20 años, en la zona lacustre del DF la mineralización del agua se ha mantenido estable, con excepción de algunos pozos en ciertas zonas. Hacia los centros de las planicies lacustres se documentan zonas de aguas procedentes del acuífero cuyas concentraciones de cloruros son superiores a 250 mg/l). Tal característica es notable bajo el Lago de Texcoco (donde se registran concentraciones salinas de más de 30,000 mg/l) y, en menor grado, bajo los antiguos lagos septentrionales (Fig. 3.2.2).

Iones como nitritos y nitratos siguen patrones complejos [Lesser *et al.*, 1990; SARH-CAVM, 1988] y suele ser frecuente que rebasen la norma de potabilidad: 1 de cada 7 muestras en nitratos de acuerdo con los censos efectuados por la CNA en 1969 y 1977 [SARH-CAVM, 1988].

Según lo expuesto, los procesos que están afectando o pueden afectar a la calidad del agua de pozos de suministro a escala local, zonal y regional en el valle de México, se relacionan con factores tanto naturales como inducidos.

Fuentes naturales de alteración de la calidad del agua

La composición litológica y mineralógica de las formaciones geológicas permeables por las cuales circula el agua subterránea propicia la incorporación de algunos elementos que alteran la calidad natural del agua. Su concentración puede variar debido principalmente a dos causas: a) incrementos en la extracción; b) ubicación de nuevos pozos, a mayor o menor profundidad.

En la cuenca de México se han detectado compuestos de azufre (sulfatos y ácido sulfhídrico), hierro, manganeso y sólidos totales disueltos, cuya presencia se asocia a procesos naturales. Sólo en algunas áreas su concentración rebasa las normas de calidad del agua. Generalmente no se reporta su contenido en las relaciones de elemen-

tos contaminantes debido a que sus concentraciones son menores que la norma para agua potable.

Compuestos de azufre

El origen de la mayoría de los compuestos de azufre en las aguas subterráneas del valle no se ha podido determinar con claridad. Aun así su presencia se asocia a flujos de agua que circula a través de rocas volcánicas cuaternarias. Su posición estratigráfica se ha descrito previamente. La distribución de las mismas comprende un buen porcentaje del valle.

Se han reportado sulfatos en pozos de la zona lacustre de Chalco, en sus porciones meridional y septentrional; en la zona central, sólo en el pozo # 3 de la batería Sta. Catarina, se han encontrado contenidos importantes. Aunque la norma establecida para sulfatos es de 250mg/l y se reportan afectaciones a la salud por consumos superiores a los 750 mg/l, el contenido de ácido sulfhídrico (H_2S) limita el uso de esos flujos. Se han clausurado pozos de la línea Tecomitl por llegar a tener olor y coloración amarillenta. En el área de Ciudad Nezahualcóyotl se han encontrado contenidos de ácido sulfhídrico de 0.8 mg/l en los pozos Jacarandas, Chimalhuacán y Las Palmas (CEAS). En los tres casos su presencia se asocia a flujos por rocas volcánicas relacionadas con la Sierra Nevada y la Sierra de Sta. Catarina. No se descartan contribuciones a los contenidos de compuestos de azufre por procesos de descomposición de materia orgánica en las partes someras de los depósitos lacustres.

Hierro y manganeso

Se ha detectado su presencia, principalmente en la zona oriental de la ciudad de México, en los pozos de la colonia Agrícola Oriental con valores de 0.8 mg/l de hierro (Fe) y 2.0 mg/l de manganeso. En la zona de Atizapán de Zaragoza, en el pozo Las Alamedas, se tienen valores de 2.5 mg/l de hierro y de 0.15 mg/l para manganeso (Mn). En el pozo ciudad Azteca, municipio de Ecatepec, se tienen valores de 0.5 mg/l de Fe (CEAS). Aunque las cifras correspondientes a otros pozos son menores a la norma, 0.3 mg/l para Fe y 0.15 mg/l para Mn, la evolución de las concentraciones podría indicar algunas tendencias que habría que considerar en la planeación de la extracción en las áreas señaladas. El fierro se asocia a rocas de origen volcánico en las márgenes de la cuenca. Como se indicó anteriormente, el acuífero actualmente en explotación es de origen volcánico (piroclastos, cenizas y/o lapilli), por lo cual la circulación del agua por estos materiales puede incrementar el contenido de hierro del agua subterránea [Herrera *et al.*, 1994].

Mineralización (Sólidos totales disueltos)

El sistema lacustre de la cuenca de México dio lugar al paquete arcilloso de composición variable por la alternancia de limos, arcillas, arenas y gravas. Los procesos sedimentarios

provocaron el aumento de la salinidad del agua de retención de este material granular.

Desde la década de 1980 se tiende a perforar pozos profundos (más de 400 m) para evitar la extracción de aguas de las arcillas y así disminuir los fenómenos de hundimiento y minimizar también el aporte de agua salina de las mismas. En los dépositos lacustres se tienen valores que fluctúan entre 1,000 mg/l en la parte septentrional de la subcuenca de Chalco, a más de 30,000 mg/l en las salmueras de Sosa Texcoco, al norte del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, cuya composición salina la definen el cloruro de sodio y el carbonato de sodio. Estas salmueras se han estudiado más desde el punto de vista de su explotación comercial –que se inició desde 1938 [Rudolph *et al.*, 1989]– que de su comunicación hidráulica con formaciones de agua dulce.

3.2.3. Caracterización de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas constituye un concepto técnico complejo (véase por ejemplo NWWA, 1985) que depende de factores generales, aún no evaluados convenientemente, como: flujo del agua subterránea y atenuación del medio. Al respecto, cabe destacar algunos de los estudios sobre el valle efectuados recientemente: SARH-CAVM [1988], Bellia *et al.* [1992], González Morán [1992], Mazari y Mackay [1993], Rudolph *et al.* [1991], Mazari [1992], Pitre [1993] y Ortega *et al.* [1993].

Vulnerabilidad de la zona lacustre

Ciertas obras civiles existentes en el valle, como los sistemas de drenaje, algunos ramales de pozos de suministro, llenado de lagos, zonas de riego, túneles, etc. (Fig. 3.2.2), se realizaron con base en la suposición de que las arcillas eran prácticamente impermeables y de gran espesor.

Estudios recientes de mecánica de suelos e hidrogeológicos han detectado fracturas y grietas en las formaciones arcillosas de las localidades siguientes: el lago de Texcoco, río Churubusco y la subcuenca de Chalco-Xochimilco [Hiriart y Marsal, 1969; Rudolph *et al.*, 1991; Mazari, 1992; Ortega *et al.*, 1993; Pitre, 1993]. También se han detectado grietas en el borde centro-oriental de la zona lacustre [Lugo-Hubp, 1991].

Actualmente se estudian los factores generadores de las fracturas en la cuenca –desecación, desagüe por despresurización, tectonismo, etc. [Alberro, 1993].

Estas observaciones son consistentes con la importancia de las fracturas para el transporte de solutos encontrada en estudios realizados en depósitos arcillosos en Estados Unidos y Canadá [Williams y Farvolden, 1967; Grisak y Cherry, 1975; Keller *et al.*, 1986; Pankow *et al.*, 1986; D'Astous *et al.*, 1989]. Encontrándose que el transporte de contaminantes a través de dichos medios puede causar alteraciones significativas en la calidad del agua subterránea subyacente, dependiendo de varios factores entre los que podemos mencionar: a) los gradientes hidráu-

licos de las arcillas; b) la extensión e interconexión de fracturas; c) el tamaño y las propiedades del acuífero mismo; d) la localización de los pozos de extracción y, desde luego, e) la localización, tipos y cantidades de contaminantes producto de la actividad humana [Mazari, 1992].

Entre los factores que han provocado la penetración de las arcillas lacustres, con el consecuente riesgo de contaminación del agua subterránea, se encuentran los pozos que desde hace más de 40 años se perforaron en el acuífero subyacente, sin ningún procedimiento de sellado de paredes para evitar infiltraciones, como se estipula en la actualidad. De ahí que, si un pozo en esas condiciones se abandona (sin ningún sistema de protección) y se encuentra muy cerca del suelo, puede actuar como un conducto directo de agua y contaminantes hacia el acuífero. Tal es lo que ha ocurrido en sitios como el "Valle del Silicón" en California, Estados Unidos, donde se han identificado pozos abandonados como integrantes de circuitos de migración de contaminantes a través de los acuitardos [EPA, 1987] y en Ciudad Juárez, Chihuahua, en donde se detectó la contaminación de pozos con bacterias fecales y amonio, principalmente [Cech y Essmann, 1992].

Cabe señalar que durante la década de 1960 se desarrollaron campos de pozos profundos para agua potable asentados dentro del terreno federal aledaño a los cauces de aguas residuales. La razón de ello fue que los programas de monitoreo realizados previamente no advertían sobre la degradación de las aguas de los pozos en esas zonas. Recientemente, y dado el uso y los posibles efectos de las aguas residuales, se han iniciado estudios referentes a fenómenos de contaminación del acuífero en las zonas agrícolas dentro del valle, las cuales se irrigan intensivamente con aguas residuales crudas. Relativo al año 1980, el aporte de la recarga por riego en toda la cuenca se ha estimado en 2.1 m^3/s [SARH-SP, 1983].

Es evidente que en muchas áreas donde los depósitos arcillosos se habían considerado como una protección, de los acuíferos subyacentes, existen problemas, por lo que puede ser que la función de estas formaciones como protección efectiva resulte falsa [Cherry, 1989].

La razón de someter a duda la hipótesis de la impermeabilidad de las arcillas de la zona lacustre del valle de México y de investigar más detenidamente esta cuestión, se sustenta en la importancia primordial de proteger los recursos principales que abastecen –y deberán continuar haciéndolo– de agua potable a la ZMVM.

Vulnerabilidad de la zona montañosa

La zona montañosa es una zona preferencial de recarga del acuífero; por esta razón el derrame de contaminantes líquidos en esta zona –aguas negras, residuos industriales, fugas de sustancias tóxicas en accidentes, así como lixiviados generados en la degradación de desechos sólidos– puede repercutir de

modo significativo en la calidad del agua del acuífero. Es oportuno advertir que dichos contaminantes pueden fluir y afectar, también, el subsuelo de la zona de transición y el de la zona lacustre, aunado a esto la urbanización de la zona montañosa ha ocasionado la disminución de la capacidad de recarga [Cortés *et al.*, 1989].

Vulnerabilidad de la zona de transición

A causa de su alta permeabilidad, esta zona tiene la capacidad de aceptar y transportar no sólo agua, sino también las sustancias que se asocian a la recarga. No se dispone de información hidrogeológica específica y aún falta mucho por entender de esta zona que es la de mayor importancia desde el punto de vista de potencial de contaminación de los recursos de agua subterránea en el valle de México, ya que, si bien en la zona montañosa la recarga es mayor, en la zona de transición concurren más actividades contaminantes.

En efecto, más de la tercera parte del ZMVM se encuentra construida fuera de la zona lacustre (véase plano base en el capítulo 1), y es particularmente preocupante que gran parte de las casas habitación que eliminan su drenaje por medio de fosas sépticas se encuentren en delegaciones del DF localizadas en las zonas de transición y de recarga, [SPP-INEGI, 1991] (ver Tabla 2.2.7).

3.2.4. Fuentes de contaminación

Existe una amplia gama de actividades humanas que generan cargas contaminantes. En lo que respecta al valle de México, dichas cargas contaminantes pueden agruparse en dos grandes rubros, las provenientes de actividades:

a) urbanas,
b) industriales

Actividades urbanas

Las actividades domésticas representan fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas, principalmente por la alta concentración de materia orgánica que contienen sus descargas y por la existencia de fosas sépticas en zonas vulnerables.

Otras fuentes potenciales están presentes en los sitios de depósito de residuos sólidos. Ello obedece a que éstos permanecen en el lugar donde se depositan durante periodos relativamente largos, y pueden llegar a ser los focos de contaminación de aguas superficiales y subterráneas por la generación de lixiviados, cuya composición química y bacteriológica les confiere un carácter contaminante.

Residuos sólidos municipales. Hoy en día, en los países industrializados la acumulación de residuos sólidos domésticos e industriales constituye un problema relevante. El aumento de la población, aunado al proceso de urbanización y a la creciente demanda de bienes de consumo, determina cambios en la composición e incrementos en la cantidad y volumen de los desechos producidos.

Por lo general en México, al igual que en otros países, la manera tradicional de disposición final de residuos sólidos consiste en tiraderos a cielo abierto; algunas veces, después de la selección y separación manual, la basura se compacta y se cubre con arcilla. Finalmente, más del 70% de los residuos sólidos quedan sin reutilizarse. Aunque se han instalado más de tres rellenos sanitarios en la ZMVM, ninguno cumple con todas las especificaciones requeridas. En Estados Unidos, a su vez, de 100,000 depósitos de desechos sólidos, probablemente no más del 10% se pueden clasificar como rellenos sanitarios [Everett, 1984].

Desde la época prehispánica el manejo de la basura era importante, algunas crónicas realzan la limpieza de la ciudad indígena, que contaba con 300,000 habitantes [Viscaíno, 1986].

La llegada de los españoles y la destrucción de la ciudad lacustre, determinaron un asentamiento no-lacustre de estilo europeo, lo que rompió la organización y, con el transcurso del tiempo, ocasionó que la nueva ciudad de México se convirtiera en una urbe sucia. En el siglo XVII se estableció un sistema de recolección de basura. En 1938 se intentó establecer la primera planta industrializadora de basura; dos años más tarde se instalaron tres plantas, que fueron clausuradas en 1943.

En el año 1950 en la ciudad de México se producían diariamente alrededor de 370 g de basura *per capita*. Se estima que, en 1993, en el DF se generaron cerca de 11,000 ton/día de basura, de las cuales cada habitante es responsable de producir alrededor de 1,000 g diariamente; de éstos, 700 g corresponden a basura domiciliaria. Si se considera el total de la ZMVM, el volumen asciende a 18,000 ton/día, y se calcula que en el año 2,000 se producirán 27,000 ton/día, de las cuales 48% corresponderán al DF y 52% a los municipios conurbados [SEDESOL-INE, 1993].

De 1950 a la fecha, el volumen de basura se ha incrementado considerablemente, y también se ha modificado su composición, pues en lo concerniente a desechos no degradables pasó de 5% a 40.5%. De 1950 a 1993, el volumen de generación *per capita* aumentó en 90% y la proporción de residuos no biodegradables se incrementó en 48% [Viscaíno, 1986; SEDESOL-INE, 1993].

En la década de 1970, el servicio de limpia contaba con 8,000 trabajadores, 600 vehículos recolectores y 120 barredoras mecánicas, que limpiaban 5,000 km de calles al día, a los que se sumaban más de 4,000 barrenderos y recolectores para atender a una población que generaba 7,000 toneladas de basura. Para aumentar su capacidad ante el problema de los desechos sin recolectar y sin disponer de una manera ambientalmente idónea, el gobierno del DF ha conformado un complejo equipamiento e infraestructura para el manejo integral de los residuos sólidos, con 25,000 trabajadores, 253 barredoras, 2,000 vehículos recolectores, 13 estaciones de transferencia, tres sitios de disposición

final, una instalación de recuperación y composteo, y una planta de incineración [SEDESOL-INE, 1993].

Asimismo, se ha atendido de modo prioritario a la ubicación adecuada de los residuos, por lo cual en los últimos años se han clausurado siete tiraderos a cielo abierto. Destacan el de Santa Cruz Meyehualco, con una superficie de 150 ha, donde durante 50 años se depositaron la mayor parte de los residuos generados en el DF, y el tiradero de Santa Fe (Alameda Poniente), con extensión de 50 ha, que operó aproximadamente 40 años. Sobre ambos se han acondicionado áreas verdes. A fin de sustituirlos se construyeron tres grandes rellenos para disponer de cerca del 94% de los residuos sólidos: Santa Catarina, Prados de la Montaña y Bordo Poniente. Actualmente los dos primeros se encuentran en fase de clausura [SEDESOL-INE, *op cit.*].

Cada proceso de clausura se ha acompañado de programas de regeneración y restauración urbana y ambiental; por ello la ciudad ha creado aproximadamente 300 ha de áreas verdes y parques recreativos (Tabla 3.2.1). Cabe señalar que los desechos depositados en estos sitios no se removieron y que dichos tiraderos no se construyeron siguiendo los requerimientos actuales para confinamientos controlados, por lo cual no están revestidos ni cuentan con sistemas de recolección de lixiviados, aunque están dotados con infraestructura para el venteo y el monitoreo de biogas. Por esta razón continúan siendo fuentes potenciales de contaminación.

En 1992 se inició un programa para incorporar a los municipios conurbados del Estado de México a este programa integral de manejo de residuos sólidos, de modo que se reduzcan los riesgos por contaminación de suelo, agua y aire. Las metas generales de este programa incluyen la clausura de 13 tiraderos a cielo abierto, la construcción de 250 ha de áreas verdes en sitios clausurados y siete rellenos sanitarios metropolitanos.

Simultáneamente se instrumentan nuevos sistemas de separación, reciclamiento, composteo e industrialización de residuos. A pesar de ser un programa reciente, prácticamente se tienen clausurados tres de los 13 tiraderos a cielo abierto existentes en tres de los municipios conurbados más importantes, con una superficie total aproximada de 100 ha.

Características de los sitios de depósito de basura, Santa Fe (inactivo) y Prados de la Montaña (activo). Ubicados en zona montañosa hacia la parte centrooccidental de la ZMVM. Están asentados sobre arenas y tepetates permeables. La profundidad del acuífero en la zona varía de 100 a más de 200 m; esto plantea la posibilidad de que gran parte de los contaminantes se puedan retener o transformar antes de alcanzar el nivel estático. En un estudio sobre manantiales en la cuenca de México, se presentan los análisis químicos e isotópicos en puntos localizados en la sierra de las Cruces, siendo uno de éstos el manantial de Santa Fe, el cual se

ubica a unos 400 m topográficamente abajo del tiradero de Santa Fe; los resultados químicos denotan que la calidad del agua es aceptable para consumo humano [Cortés *et al.*, 1989].

Bordo Poniente (activo). Este sitio de disposición final, que consta de 889 ha, está ubicado al oriente de la ciudad de México, en el antiguo lago de Texcoco, con una ligera pendiente en dirección oeste. Está dividido en cuatro áreas (etapas) de la siguiente manera: I de 70 ha; II de 75 ha; III de 104 ha; y IV de 640 ha. La primera y segunda se encuentran ya clausuradas, la tercera está actualmente en operación, y la cuarta, en proyecto con una posible extensión de 400 ha.

El sitio se encuentra en la zona geotécnica Lago Virgen, caracterizada por la presencia de una capa superficial de 1.5 m de espesor, bajo la cual se encuentra la serie arcillosa superior, y de un espesor aproximado de 35 m; le subyace la primera capa dura, con espesor entre 2 y 3 m. Bajo ésta se encuentra la serie arcillosa inferior con 15 m de espesor aproximado. Estas características geológicas garantizan que posibles lixiviados no arribarán al acuífero en explotación.

Santa Cruz Meyehualco (inactivo). Localizado probablemente en la zona lacustre de la porción centro-oriental de la ZMVM. Se le habilitó como parque y se colocaron respiraderos para biogas. Se asienta en derrames

TABLA 3.2.1

SITIOS PRINCIPALES DONDE SE DISPONEN LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN EL DISTRITO FEDERAL (1992)

Activos:	*Superficie (ha)*	*Zona*
Santa Catarina Yecahuízotl	30	Transición
Prados de la Montaña	30	Montañosa
Bordo Poniente (I,II,III,IV)	249	Lacustre
Inactivos:		
Santa Cruz Meyehualco	150	Lacustre
Santa Fe (Alameda Poniente)	50	Montañosa
San Lorenzo Tezonco (I,II)	10	Transición
Milpa Alta	?	Montañosa
Tláhuac	1.2	Lacustre
Tlalpan	2.2	Transición
Vaso de Texcoco	45	Lacustre

basálticos de alta permeabilidad, intercalados con rellenos aluviales de permeabilidad media y arcillas. La profundidad del nivel estático varía de 20 a 50 m. El agua fluye del ex-basurero hacia los pozos de la colonia Agrícola Oriental, y puede transportar parte de los lixiviados del mismo [DDF-DGCOH, 1992].

San Lorenzo Tezonco (inactivo). Ubicado en zona de transición en la falda de un volcán. Está cubierto por capas de material plástico para detener la infiltración de lluvia, aunque su deterioro es visible. Cubre una extensión de 10 ha, con espesores variables hasta de 20 m. El biogas se elimina por medio de respiraderos. El subsuelo está constituido por material granular bastante permeable y piroclastos de alta permeabilidad interdigitados con derrames basálticos también de alta permeabilidad. El nivel freático se encuentra entre los 20 y 50 m de profundidad.

Santa Catarina (activo). Inicialmente tiradero a cielo abierto, manejado actualmente como relleno sanitario, está ubicado en el municipio de Chalco, en zona de transición, al oriente de la ZMVM. Cubre una superficie de más de 30 ha, de las cuales aproximadamente 15 se encuentran sobre la ladera del volcán La Caldera, que se eleva directamente del piso del antiguo lago de Chalco. Este volcán está formado por material piroclástico, lo que le confiere un amplio intervalo de permeabilidad.

La vulnerabilidad del acuífero de la subcuenca de Chalco se incrementa notablemente, especialmente hacia las márgenes de ésta, en donde se presenta la intercalación de sedimentos de grano fino y material volcánico. El basurero está en proceso de clausura.

Drenaje y descargas de aguas residuales. El 26% de la población de la ZMVM no cuenta con drenaje [SPP-INEGI, 1991a], (Tabla 2.2.7). Las zonas carentes de ese servicio eliminan sus aguas residuales localmente en arroyos, fosas sépticas y letrinas. Estos asentamientos humanos, casi todos situados en la zona de transición, representan una fuente potencial de contaminación del acuífero por organismos patógenos y otros contaminantes presentes en los desechos domésticos.

El drenaje de la ZMVM es un sistema combinado, que transporta tanto aguas residuales como pluviales a través de una red primaria de 1,212 km de longitud y una red secundaria de 12,326 km (Gran Canal del Desagüe, Canal Nacional), ríos superficiales (río de los Remedios), ríos entubados (Viaducto Piedad, río Consulado, río Churubusco, río San Joaquín), colectores semiprofundos, presas, lagunas y 93 km de drenaje profundo [DDF, 1975; DDF-DGCOH, 1982 y 1990] (Fig. 2.2.6).

No es posible actualmente determinar de manera precisa el volumen de aguas residuales que se vierten sin tratamiento al sistema de drenaje de la ZMVM; aun así se estima que en la ZMVM se generan 40 m^3/s de aguas negras [Quadri de la Torre, 1989]. Sin embargo, de acuerdo con el DDF se estima que más del 90% de los desechos líquidos industriales gene-

rados en la ZMVM se vierten al sistema de drenaje, no existiendo una descripción detallada de los desechos [DDF-DGCOH, 1992]. Puesto que en la ZMVM se encuentran asentadas aproximadamente 30,000 industrias, es muy probable que estos desechos contengan sustancias químicas peligrosas de toda índole.

Las condiciones de los sistemas de tubería del drenaje no son óptimas, ya sea por instalación incorrecta o bien por deterioro o ruptura debido a actividades de construcción, hundimiento o terremotos. En el sistema de distribución de agua potable se calcula de un 10% a un 20% aproximadamente de pérdidas [DDF, 1989]. Aun cuando no se informa de pérdidas en el sistema de drenaje, es de suponer que dicho problema existe.

Las redes antiguas de alcantarillado se construyeron a menor profundidad que los nuevos sistemas de drenaje. Por lo tanto, con respecto a las nuevas secciones del sistema de drenaje, los viejos sistemas representan un riesgo menor de contaminación del sistema acuífero. También se debe considerar que con el crecimiento de la ciudad el sistema de drenaje se ha expandido hacia las zonas de transición y de montañas.

Algunas vías de desfogue, como el Gran Canal de Desagüe, o el río de los Remedios, son canales no revestidos. Durante varios decenios, este último se ha utilizado para verter residuos líquidos de origen doméstico e industrial de la parte septentrional de la ZMVM.

Estos canales son fuentes potenciales de contaminación del agua y del acuífero. De importancia particular resulta la porción donde los canales atraviesan la zona de transición [Mazari, 1992]. El potencial de contaminación subterránea originada en los canales también está presente en la zona lacustre, pues existen gradientes hidráulicos descendentes [Pitre, 1993].

En la zona central de la ZMVM, el drenaje profundo está construido principalmente de arcillas, aunque sus ramificaciones profundas se han excavado en el acuífero; a su salida de la cuenca hacia el norte, los colectores que lo conforman cruzan la zona de transición. El subsistema de drenaje profundo se construyó para evitar inundaciones; sin embargo, la necesidad de reparaciones anuales, durante el estiaje, sugiere la posibilidad de infiltración del agua transportada hacia el área subyacente a los colectores del drenaje profundo, pero no se ha evaluado el volumen drenado del mismo.

Del Gran Canal se derivan aguas residuales para regar 5,500 ha en las inmediaciones de Chiconautla y del emisor poniente 5 m^3/s, para las áreas de Guadalupe y Zumpango. El caudal restante de las aguas residuales fluye eventualmente hacia la presa Endhó. Fuera de la cuenca, parte del agua se utiliza para la irrigación del Distrito de Riego 03 en el Estado de Hidalgo, creado en 1954. En esta área se riegan 80,000 ha con aguas negras. Finalmente las aguas fluyen hacia el Golfo de México a través del sistema fluvial Tula-Moctezuma-Pánuco. Para aprovechar estas aguas, se encuentra en operación

el proyecto hidroeléctrico Zimapán, en los límites del municipio del mismo nombre, en los Estados de Hidalgo y Querétaro.

Actividades industriales

Industrias y establecimientos de servicios. En la ZMVM se encuentran registradas 30,124 empresas industriales [SPP-INEGI, 1991a). El 72.4% de ellas se ubican en el DF y el 27.6% restante en el Estado de México.

En el DF las delegaciones más industrializadas son la Cuauhtémoc (con el 21% de las industrias de la entidad), Iztapalapa (13.8%), Gustavo A. Madero (12.1%) y Azcapotzalco. En el área conurbada del Estado de México la industria se concentra en los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Ecatepec, Nezahualcóyotl, Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, La Paz y Texcoco.

En cuanto a su tamaño, las empresas de la ZMVM se clasifican como se indica en la tabla 3.2.2. Casi todos los tipos de industria se encuentran en la ZMVM (Tabla 3.2.3); muchas de estas industrias generan residuos que se consideran tóxicos y peligrosos según la Norma Oficial Mexicana, NOM-CRP-001/ECOL-93.

Se considera que a partir del inventario de las industrias ubicadas en la ZMVM y de su capacidad nominal de producción, el volumen anual de residuos se podría estimar con base en la generación de residuos de industrias similares en otros países, lo cual resulta indispensable para orientar una gestión ambientalmente adecuada [Ortiz-Monasterio, *et al.*, 1987]. La distribución de la industria en la ZMVM aparece ilustrada en la figura 3.2.2.

En particular, la industria electrónica utiliza grandes cantidades de solventes orgánicos sintéticos halogenados. Esto debe tenerse en cuenta a la luz de los problemas identificados en Estados Unidos acerca de fugas y/o derrames de dichas sustancias (DNAPLs: fase líquida no acuosa más densa que el agua, con baja solubilidad), su infiltración hacia la zona saturada y su lenta disolución en el agua subterránea, pues en ocasiones contaminan miles de millones de litros de agua [Mackay y Smith, 1993].

También pueden ocurrir descargas y/o fugas de DNAPLs, a partir de establecimientos de lavado en seco (que en México utilizan percloroetileno), y de instalaciones que involucran lavado y desengrasado de metales (como fábricas de carros de ferrocarril, de autopartes, etc.). Adicionalmente, algunas pueden descargar cantidades significativas de hidrocarburos derivados del petróleo (LNAPLs: fase líquida no acuosa más ligera que el agua), como son aeropuertos y gasolinerías [Mackay y Cherry, 1989].

Aunado a lo anterior existen múltiples fuentes potenciales de contaminación por sustancias inorgánicas, como los metales pesados, algunas de las cuales han sido objeto de investigaciones para evaluar su impacto, como se ilustra en los estudios referidos más adelante.

Refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos. Ha sido bien estudiado el potencial de emisión de cantidades significativas de productos derivados del petróleo a partir de refinerías, y ha constituido un problema común en Estados Unidos, en particular en lo que respecta a las refinerías antiguas con tanques y ductos subterráneos, desde los cuales ha habido infiltración o han ocurrido derrames [API, 1972].

Cabe señalar que estudios recientes sugieren que los compuestos del petróleo más móviles son susceptibles de degradarse durante la migración bajo la superficie, en especial si existe suficiente oxígeno disponible. Tales hallazgos permiten explicar por qué, aunque en Estados Unidos la contaminación de suelos y aguas subterráneas es un problema serio en las zonas aledañas a las fuentes de contaminación, rara vez los hidrocarburos del petróleo se encuentran en concentraciones significativas en los pozos de abastecimiento público [Mackay y Cherry, *op cit.*; Rifai *et al.*, 1988]. Sin embargo, en ese país han surgido casos en los cuales se han identificado plumas de contaminación por hidrocarburos de petróleo migrando en dirección de pozos de abastecimiento, lo cual plantea la necesidad de investigar más a fondo si esta manera de contaminación constituye un riesgo actual o futuro para las fuentes de agua subterránea.

El predio donde estaba ubicada la Refinería 18 de Marzo, la cual funcionó de 1948 a 1991, cesó sus operaciones de refinación con base en una decisión tendiente a abatir la contaminación del aire, constituye una fuente potencial de contaminación al acuífero en la zona de transición; su ubicación plantea la factibilidad de que las barreras subterráneas a la infiltración de contaminantes puedan ser discontinuas y relativamente ineficientes [Mazari y Mackay, 1993]. Los ductos empleados para transportar los productos derivados del petróleo en estado líquido o gaseoso hacia o a partir de la refinería constituyen también

TABLA 3.2.2
CLASIFICACIÓN DE LAS EMPRESAS INDUSTRIALES EN LA ZMVM SEGÚN SU TAMAÑO

Tamaño	*Cantidad de empresas*	*Porcentaje*
Microindustria	22,593	75
Pequeña industria	6,025	20
Industria mediana	904	3
Grandes industrias	604	2
TOTAL	30,126	100

una fuente potencial de contaminación, en particular donde atraviesan la zona de transición o en las áreas donde las arcillas lacustres están fracturadas.

Existen varias fuentes potenciales de contaminación por hidrocarburos en el subsuelo de la ciudad de México, entre las que destacan: gasolinerías, poliductos y estaciones de carga y descarga de combustible, predominando en estas últimas las centrales de autobuses y patios de ferrocarriles, además del gran número de industrias que consumen hidrocarburos y que representan fuentes potenciales de contaminación.

Respecto a las gasolinerías, se puede considerar que es el único problema que ha sido tratado y resuelto parcialmente en la ciudad de México. La corrosión de antiguos tanques de almacenamiento aunada al movimiento del terreno, tanto por hundimiento como por sismos, fueron, durante largo tiempo, la causa principal de las rupturas en las tuberías de interconexión y en los tanques. En algunos casos se identificaron plumas contaminantes que cubrían diámetros de 10 a 50 m alrededor del origen, en donde el hidrocarburo se encontraba prácticamente sin movimiento debido al tipo de terreno que consiste principalmente en arcillas lacustres de reducida permeabilidad. A partir de 1990, el DDF inició una campaña de monitoreo en todas las gasolinerías comprendidas en el DF, mediante perforaciones someras y la detección de hidrocarburos volátiles por cromatrografía. En los sitios en donde se detectaron fugas y pro-

TABLA 3.2.3

TIPOS PRINCIPALES DE INDUSTRIAS EN LA ZMVM

Automovilística y partes de automóviles

Cerámica

Química:

- Adhesivos
- Baterías
- Sustancias químicas
- Explosivos
- Combustibles
- Fertilizantes
- Vidrio
- Gases industriales
- Pinturas y tintas para imprenta
- Celulosa y papel
- Plaguicidas
- Petroquímicos
- Perfumes y cosméticos
- Productos farmacéuticos
- Fotografía y material fotográfico
- Plásticos
- Hule
- Productos químicos especiales
- Jabones y detergentes

Material para construcción

Tintorerías

Generación de electricidad

Equipo eléctrico

Electrónica

Alimentos, bebidas y tabaco

Maquinaria

Metales no ferrosos

Imprentas

Acero

Textil, del vestido y pieles

Madera y muebles

ducto líquido flotando sobre el nivel freático, se construyeron pozos de 1.5 m de diámetro por 3 m de profundidad, y se extrajo el producto existente por bombeo o de forma manual.

De las 242 gasolinerías ubicadas dentro del DF, en alrededor de la mitad se detectaron y repararon las fugas. Actualmente todas las gasolinerías están incluidas en un programa de monitoreo e inspección permanente. En un gran porcentaje de ellas se han reconstruido y cambiado tanques, con medidas que cumplen normas internacionales de seguridad. En el área restante de la zona metropolitana del valle de México no se conoce el avance logrado en la prospección y saneamiento de las zonas contaminadas por hidrocarburos [Lesser-DGCOH, 1991].

3.2.5. Estudios sobre migración de contaminantes y solutos naturales

Diversos autores han realizado estudios para tratar de entender las características hidrogeológicas fundamentales relacionadas con el transporte de compuestos, tanto inorgánicos como orgánicos, en sitios específicos del valle de México. Algunos de estos trabajos se enfocan a la interpretación de datos hidrológicos y al transporte de los solutos naturales en las arcillas lacustres; otros tratan del potencial de contaminación en el acuitardo lacustre. Ninguno de estos estudios ha llegado en detalle a las profundidades de las formaciones geológicas de las cuales se extrae el agua subterránea. En esta sección se presentan las principales conclusiones a las que los autores han llegado en sus investigaciones.

En un estudio ambiental realizado sobre la industria eléctrica-electrónica en la ZMVM como fuente potencial de contaminación, se localizaron los establecimientos respectivos, encontrándose que en el área se ubican cerca de 679 empresas de esta rama industrial; de ellas, 288 son fabricantes y 391 son distribuidores. El 64% de las fábricas están ubicadas en el área septentrional de la ciudad, algunas de ellas en la zona de transición [Islas, 1993].

Con el objetivo de analizar las implicaciones ambientales y de salud pública de sus actividades, la autora consideró cualitativamente el estado actual del uso y del manejo de sustancias químicas potencialmente tóxicas y el de disposición final de desechos industriales peligrosos.

Se determinó que esta industria utiliza compuestos orgánicos tóxicos: benceno, cloruro de metileno, cloruro de vinilo, diclorobenceno, 1,1-dicloroetileno, percloroetileno, tetracloruro de carbono, tolueno y xileno. Se observó en este sector industrial una tendencia a vertir sus desechos al sistema de drenaje sin tratamiento previo; lo que constituye así una fuente potencial de contaminación que puede generar problemas serios de salud pública y de salud ambiental, puesto que se trata de compuestos persistentes.

Lo anterior está relacionado con la falta de disponibilidad de confinamientos controlados o de plantas para el tratamiento y la

disposición final de residuos peligrosos, en particular en las zonas aledañas a la ZMVM.

Mazari [1992] realizó un estudio de campo sobre la distribución de compuestos orgánicos en el acuitardo lacustre de la subcuenca de Texcoco.

Considerando las características hidrogeológicas y la localización de las fuentes contaminantes en el valle, se identificaron rutas potenciales de contaminación. Para realizar un estudio de campo se seleccionó una ruta: la migración descendente de contaminantes de los canales de drenaje sin revestimiento que atraviesan la ZMVM.

Se tomaron muestras de material geológico del acuitardo arcilloso adyacente a los canales y de un área urbana. Se determinaron las características físicas del suelo superficial y de la arcilla. Se obtuvieron muestras de agua intersticial. Las muestras de agua se analizaron para dos clases de contaminantes orgánicos: 1) detergentes aniónicos y 2) compuestos volátiles orgánicos halogenados (1,1 dicloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno). Se analizó el agua superficial del canal para comparación cualitativa con el agua intersticial.

El estudio indica que los detergentes aniónicos y ciertos compuestos orgánicos volátiles han penetrado de manera descendente en el acuitardo arcilloso. Los resultados muestran la presencia de compuestos orgánicos en concentraciones de 0.6 a 7.7 μg/l de detergentes y de 0.1 a 23.5 μg/l de compuestos volátiles orgánicos. Las concentraciones de ambos tipos de compuestos fueron 10 veces mayores en el agua superficial que en la intersticial. Tanto las concentraciones de detergentes como de 1,1-dicloroetileno y tricloroetileno sobrepasan las normas mexicanas que se establecen en el acuerdo relativo a Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CAA-001/89) publicado en el Diario Oficial de la Federación.

Aun cuando tales concentraciones en el acuitardo son bajas y los compuestos han penetrado una distancia corta, los resultados son significativos, debido a que los compuestos han migrado una distancia mayor que la predecible para una formación arcillosa homogénea.

Pitre [1993] obtuvo evidencia de un comportamiento semejante de los compuestos inorgánicos en las mismas estaciones de muestreo. Esto sugiere que el movimiento de compuestos está dominado por el flujo a través de fracturas en el medio arcilloso. Si bien la concentración de contaminantes y las distancias de migración observadas en el sitio estudiado parecen no implicar un riesgo inmediato para el agua subterránea subyacente, las condiciones pueden llegar a un punto crítico a causa de que la tasa de migración de contaminantes se incrementa con el tiempo y puede volverse significativa.

En este estudio se concluye que, contrariamente a las suposiciones previas, el acuitardo no es completamente impermeable a la penetración de agua y contaminantes. La presencia de estos compuestos en el medio,

en concentraciones más altas que la norma, implica que puede existir un riesgo para la salud pública.

Gutiérrez-Ruiz y colaboradores [1986] y González-Morán y Rodríguez [1989] estudiaron la contaminación por cromo (Cr), en el norte de la ciudad de México. En esta última investigación se llevó a cabo un monitoreo geofísico en el entorno de un basurero industrial de desechos de cromo.

A fines de los años 1950, en el norte de la ZMVM (Tultitlán, Estado de México), empezó a operar una empresa procesadora de cromita, para obtener compuestos de cromo y sulfato de sodio. Su proceso industrial se llevaba a cabo a cielo abierto, sin control de emisiones de polvos ni de aguas residuales. Los desechos se acumularon en los patios de la empresa y se usaron como material de relleno en algunas calles de esa población.

Investigaciones realizadas por la Secretaría de Salubridad y Asistencia pusieron en evidencia efectos adversos en la salud de los trabajadores de la empresa con manifestaciones atribuibles al cromo, como: lesiones en la piel y perforación del tabique nasal [Neri *et al.*, 1980]. En 1982, tras la clausura definitiva de la planta, se optó por la construcción de un cementerio industrial que albergara el material residual producido durante 20 años por esta empresa.

Según Gutiérrez-Ruiz y colaboradores [1986], el 16.7% de los suelos muestreados estaban contaminados. De las muestras con cromo, el 15.8% contenían valores menores de 10 ppm, el 31.6%, entre 10 y 100 ppm el 31.6%, mayores de 100 y menores de 200 ppm y el resto de las concentraciones oscilaban entre 500 y 6,480 ppm.

Los estudios geoeléctricos realizados mostraron que la capa de baja resistividad asociada al proceso contaminante tiende a hacerse más profunda [González-Morán y Rodríguez, 1989]. La extracción de agua subterránea genera un cono de abatimiento y, consecuentemente, un patrón de la red de flujo subterránea, con dirección preferencial de este a oeste [Miranda-Hernández, 1987]. La distribución de los compuestos de cromo concuerda con los resultados obtenidos en el estudio de Gutiérrez-Ruiz *et al.* [1986].

Rudolph y colaboradores [1991] estudiaron el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos inorgánicos en arcillas de la zona donde está emplazada la empresa Sosa Texcoco, área perteneciente a la zona lacustre de la subcuenca de Texcoco.

Para este estudio se instaló una red de multipiezómetros en la formación arcillosa que subyace a un acuífero salino. A su vez, éste subyace a un acuitardo de sedimentos lacustres, estratos que en conjunto cubren el acuífero de agua dulce del cual se extrae agua para la ZMVM. Se analizaron algunos iones; entre otros, cloruro y sodio, además de oxígeno 18, deuterio y tritio, en agua intersticial extraída del acuitardo superficial; se determinó una gran variación de acuerdo a la profundidad. Las características de estas variaciones sugieren que el agua intersticial

salina es remplazada por agua de precipitación. La infiltración ha sido inducida por gradientes hidráulicos descendentes iniciados hace tres décadas, cuando, con fines comerciales, empezó el bombeo de agua salina en la capa dura.

Se utilizaron modelos numéricos unidimensionales para simular los perfiles geoquímicos en el acuitardo superficial, con el objetivo de representar el transporte de solutos tanto en el medio poroso fracturado como en el medio no fracturado. Con respecto a lo que se había supuesto, se infiere que hay mayor potencial de infiltración en sentido descendente, debido a las fracturas verticales de la arcilla de Texcoco, con la consecuente contaminación de los acuíferos subyacentes.

Pitre [1993] estudió el flujo y las transformaciones químicas en acuitardos arcillosos fracturados. La finalidad de este estudio fue entender los procesos de contaminación del acuífero a través de acuitardos arcillosos superficiales y su posible capacidad de atenuación geoquímica. Se instalaron tres estaciones multipiezométricas en la confluencia de dos canales de aguas negras que reciben desechos líquidos domésticos e industriales: el río de los Remedios y el Gran Canal del Desagüe.

En cada estación se instalaron 10 piezómetros a distintas profundidades, desde la superficie hasta 24 m. Asimismo se extrajeron núcleos de material geológico. En las estaciones se midió la presión hidrodinámica y la permeabilidad del acuitardo; en los núcleos se analizó el material geológico y su disposición; y se determinó la composición química e isotópica del agua, tanto de los piezómetros como de la extraída de los núcleos.

Se han documentado las características siguientes: a) el régimen de flujo de agua en el acuitardo es descendente; b) los coeficientes de permeabilidad son del orden de 10^{-9} m/s; c) la mineralización de las aguas negras superficiales es menor a la de aguas del acuitardo; d) en los primeros 6 m se observó agua de infiltración posterior a 1962, basándose en determinaciones de tritio utilizado como trazador; y e) se encontraron concentraciones bajas de metales pesados (Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Mn, Fe).

Los resultados hacen suponer que los acuitardos estudiados tienen cierta capacidad para retardar y/o transformar los metales pesados, los cuales se detectaron en muy bajas concentraciones y en estratos superficiales. Las características e intensidad de esta capacidad de retención están en proceso de investigación.

Ortega y colaboradores [1993] estudiaron la consolidación a gran escala del acuitardo arcilloso en la subcuenca de Chalco, bajo su extensa planicie lacustre. El acuitardo subyace a una gruesa secuencia de sedimentos piroclásticos–aluviales que forman un acuífero regional de alta productividad.

La planicie de Chalco fue un lago somero hasta la década de 1940, cuando fue dragado para uso agrícola y urbano. La información

histórica indica que, antes de la época en la que se usó como fuente de extracción de agua del acuífero semi-confinado, la planicie era una área de descarga de agua subterránea.

Debido a la explotación del acuífero, en zonas donde el acuitardo es delgado (<100 m), los gradientes hidráulicos se han invertido a todo lo ancho del área y las condiciones de recarga prevalecen actualmente.

A principios de la década de los sesenta cuando se inició la mayor extracción de agua más allá de la periferia del acuitardo, el bombeo intensivo de los acuíferos bajo el acuitardo provocó que la superficie del suelo se hundiera aproximadamente 3 m. Entre 1984 y 1989 ocurrió un hundimiento adicional de 2 m, por lo cual se formó un lago somero que se expandió gradualmente.

Si la tasa actual de extracción de agua subterránea de la planicie de Chalco se mantiene, es probable que en su parte media continúe el hundimiento total a una tasa de aproximadamente 0.4 m por año. Eventualmente puede acontecer un hundimiento total de decenas de metros en su parte más ancha. En gran parte del acuitardo el agua intersticial es salina; sin embargo, la liberación de sales y otros constituyentes químicos hacia el acuífero subyacente aún no ha afectado significativamente la calidad del agua del acuífero.

Se requiere de un mejor entendimiento del comportamiento del acuitardo bajo la influencia del bombeo del acuífero para planear el manejo del agua subterránea y el uso del suelo a largo plazo en la planicie de Chalco.

El carácter local de las diversas investigaciones llevadas a cabo en el acuitardo arcilloso no permite extrapolar los resultados a la zona lacustre; sin embargo, constituye el principio de los estudios que es posible realizar y uno más de los diversos enfoques que se han dado a problemas específicos en la ZMVM.

3.3. Evaluación y control de la calidad del agua

3.3.1. Factores que inciden sobre la calidad del agua para consumo humano

La calidad del agua de las fuentes de abastecimiento no es necesariamente la misma que la del agua que consumen los habitantes de la ZMVM. El agua de la que finalmente se dispone para el consumo personal sufre una evolución en su calidad desde la fuente hasta el consumidor, en la cual la infraestructura y la operación de los sistemas de potabilización y distribución desempeñan una función decisiva.

Desde el punto de vista de la protección a la salud pública, la calidad del agua que reviste un interés central es la correspondiente a la que consumen los habitantes de la ciudad actualmente y la que consumirán en el futuro.

A partir de las fuentes de abastecimiento (superficiales o subterráneas) y antes de ser consumida por la población, la calidad del agua pueden modificarse debidos a las causas siguientes:

1. Tratamiento en plantas potabilizadoras.
2. Desinfección en distintos puntos de la red de distribución.
3. Contaminación por conexiones cruzadas en la red.
4. Contaminación en depósitos domiciliarios (cisternas y tinacos) abiertos o sucios.
5. Contaminación por metales (plomo, cobre), causada por la corrosión de los sistemas de tubería de la red de distribución y domiciliaria.
6. Potabilización en los domicilios (hirviendo el agua y/o utilizando filtros u otros sistemas de purificación).
7. Degradación de la calidad del agua en los domicilios por manejo inadecuado y falta de higiene.

No se pretende hacer un análisis exhaustivo acerca del impacto que cada uno de estos factores tiene sobre la calidad del agua que consumen los habitantes de la ZMVM, sino describir algunos hechos que resaltan la vulnerabilidad de los sistemas de distribución y almacenamiento del agua y presentar los resultados de algunos estudios que, sin abarcar toda la ZMVM, proporcionan ejemplos de problemas de calidad del agua que pueden suscitarse en distintas zonas de la ciudad.

Tratamiento en plantas potabilizadoras

En un capítulo anterior se describen el volumen y el método de tratamiento al que se somete el agua suministrada para consumo humano en la ZMVM según la fuente de abastecimiento. Para fines de esta descripción sólo se resaltan factores que inciden en su calidad. Se ha descrito previamente que, de acuerdo con cifras de la DGCOH, toda el agua que ingresa al DF recibe tratamiento de desinfección. De este total (35.5 m^3/s) únicamente el 1.2% recibe tratamiento adicional al de desinfección, en las 4 plantas potabilizadoras con que cuenta la DGCOH, por provenir de otras cuencas.

Desinfección en la red de distribución

En la red de distribución existen 326 dispositivos de desinfección del agua potable que opera la DGCOH, la cual se realiza a base de cloración, principalmente mediante la aplicación de hipoclorito de sodio; en ocho sitios se aplica cloro gaseoso.

Para supervisar la calidad del agua de abastecimiento, el Laboratorio Central de la Calidad del Agua del DDF efectúa monitoreos en la red de distribución que abastece al 98% de la población del DF. La tabla 3.3.1 muestra la evolución de la calidad del agua en la red de distribución de agua potable del DF de 1982 a 1993, de acuerdo con el porcentaje de las muestras que cumplen las normas sanitarias en cuanto a cloro residual (0.2 mg/l) y bacteriología (máximo de dos organismos coliformes totales en 100 ml). Cabe resaltar que resultados aceptables a este nivel de análisis no excluyen la posibilidad de que estén presentes otros microorganismos, pero a la fecha el laboratorio central no ha detectado eviden-

cias de la existencia de estructuras parasitareas en el agua potable.

Actualmente no existen datos sistemáticos para evaluar la concentración de subproductos por la cloración en el agua tratada, algunos de los cuales (por ejemplo los trihalometanos), son considerados carcinogénicos. Sin embargo, la mayor parte (75 a 80%) del agua que se consume en la ciudad de México proviene del subsuelo, y en el agua subterránea existe un contenido menor de materia orgánica que en el agua superficial, por lo que es menos susceptible para generar trihalometanos al ser clorados. A pesar de lo anterior, este tema amerita mayor investigación, ya que no se conocen las concentraciones de precursores orgánicos en el agua de las fuentes de abastecimiento, las cuales pueden variar considerablemente en diferentes épocas del año, y a veces exigen aplicar dosis relativamente altas de cloro con el fin de mantener niveles de cloro residual para una desinfección eficiente en los 10,000 km de red secundaria. Además, la infiltración de agua no potable a la red de distribución puede ser una fuente importante de precursores orgánicos.

Contaminación por conexiones cruzadas

Conexión cruzada es la expresión que se utiliza para referirse a cualquier conexión directa entre un sistema de distribución de agua potable y cualquier sustancia o fluido no apto para consumo humano.

Las fugas en la red de agua potable representan un riesgo para la calidad del agua cuando ésta es transportada a través de un sistema de distribución subterráneo, como el de la ciudad de México. Bajo ciertas condiciones, el agua subterránea contaminada puede introducirse a la red a través de fracturas u orificios en la tubería que dan lugar a fugas bajo presión hidrostática normal, o también puede ser succionada por el efecto Venturi. En general, este tipo de contaminación se evita si la presión del sistema de distribución se mantiene constante.

Las conexiones cruzadas permanecen inactivas hasta que ocurre un contraflujo, es decir, cuando el agua de la red corre en sentido contrario, lo cual sucede con facilidad si se permite que la presión del agua dentro de la red de distribución decaiga por debajo de la presión atmosférica. Desafortunadamente, en muchas colonias de la ciudad de México el suministro de agua es intermitente, y la presión dentro de la red de distribución varía con frecuencia. Además, los sismos y la consolidación irregular del terreno han ocasionado fracturas tanto en la red de distribución como en el sistema de drenaje, por lo que la ciudad de México reúne condiciones que favorecen la contaminación de la red de agua potable por conexiones cruzadas.

Según la experiencia del Laboratorio Central de Calidad del Agua del DDF, en general, la calidad del agua se degrada más en colonias en las que su suministro se interrumpe con más frecuencia, a diferencia de las colonias donde el suministro es más continuo.

La tabla 3.3.2 muestra la cantidad de fugas que se han eliminado de las redes de distribución primaria y secundaria en cada delegación del DF durante los últimos seis años. Cabe señalar que estas cifras únicamente indican el límite inferior del número de fugas activas en un año determinado. Generalmente las fugas que se reparan son por las que escapa gran cantidad de agua, mientras que las más pequeñas pueden no ser detectadas durante muchos años, representando una fuente importante de fuga de agua potable y una posible contaminación biológica y química.

Es así que, si bien el agua para consumo humano no se extrae del acuífero superficial, la contaminación de éste mediante las conexiones cruzadas que se establecen entre el acuífero superficial y la red de distribución impacta la calidad del agua potable.

Contaminación en depósitos domiciliarios

La irregularidad del suministro de agua hace necesario el almacenamiento de agua en tinacos y cisternas que representan fuentes potenciales de contaminación adicional. En muchos casos estos contenedores se encuentran abiertos a la atmósfera y no se limpian con regularidad. Cuando el agua almacenada no se recicla constantemente, el cloro libre residual se disipa, y tales contenedores actúan como medios de cultivo de bacterias y de otros organismos nocivos.

Potabilización domiciliaria

Aún cuando la calidad bacteriológica del agua que se recibe en las tomas domiciliarias, no es extraño que en los hogares de la ciudad de México sea frecuente hervir el agua antes de su consumo. Las propias autoridades sanitarias recomiendan esta práctica por medio de anuncios de radio y televisión. En los hogares con mayor poder adquisitivo también es común encontrar filtros y/u otros sistemas de purificación.

Manejo del agua en los domicilios

A causa de que no todas las casas habitación de la ZMVM cuentan con agua corriente dentro de los domicilios, aunque la red de agua potable llega a la mayoría de los terrenos, con frecuencia es necesario usar cubetas para

TABLA 3.3.1

EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL DISTRITO FEDERAL

(porcentaje de muestras conforme a la norma)

Parámetro/año	*1982*	*1983*	*1984*	*1985*	*1986*	*1987*	*1988*	*1989*	*1990*	*1991*	*1992*	*1993*	*1994*
Cloro residual	79	79	74	70	89	86	85	88	92	94	94	96	91
Bacteriología	79	79	73	73	83	81	70	82	84	88	91	93	96

introducirla a las casas; por este motivo el manejo del agua en las colonias más pobres es un factor muy importante en la determinación de la calidad del agua que consumen los habitantes.

Aunque en capítulos anteriores ya ha sido referido, es importante resaltar la gran variabilidad en la disponibilidad de drenaje y agua entubada en las diferentes delegaciones y en los municipios conurbados de la ZMVM. Por ejemplo, el censo indica que, en 1990, el 99.5% de las viviendas de la Delegación Benito Juárez estaban conectadas al drenaje, y 99.7% disponían de agua entubada, mientras que en Chalco sólo el 23.7% contaban con algún tipo de drenaje, y 70% no tenían acceso a agua entubada. Por sí solas, tales condiciones contribuyen a que algunas zonas sean más vulnerables a los problemas de contaminación del agua para consumo humano.

3.3.2. Estudios sobre la contaminación del agua de consumo humano

Algunos estudios que se refieren a la contaminación del agua de consumo por organismos patógenos en la ZMVM han sido elegidos para ilustrar algunos de los tipos de problemas que se han identificado.

Rivera y colaboradores [1979] realizaron un primer estudio en la ciudad de México acerca de la contaminación protozoológica en el agua de los grifos de registro de casas-habitación, es decir, en la que llega entubada a las casas directamente del sistema de distribución y que aún no ha pasado por tinacos.

Para el estudio se obtuvieron muestras de agua de los registros de 25 casas seleccionadas al azar, en la región noroccidental del DF, la cual es una de las zonas más densamente pobladas de la ciudad de México.

Los resultados de esta investigación son una evidencia de que el agua para consumo humano que llega a algunos domicilios puede contener parásitos tanto en forma trófica como quística, así como protozoos indicadores de la descomposición de materia orgánica. Los protozoarios más comúnmente encontrados fueron flagelados, seguidos de amibas y ciliados.

Entre los organismos encontrados, *Naegleria sp. y Acanthamoeba sp.* pertenecen a géneros de cepas patógenas y por lo tanto son potencialmente peligrosos para la salud humana. También se encontraron otros organismos considerados como indicadores de contaminación orgánica y fecal del agua: *Euglena viridis, Colpidium colpoda, Sathrophilus agitatus, Bodo edax, B. saltans y Colpoda cucullus.*

Es interesante notar que algunas de las muestras examinadas no contenían ningún tipo de protozoarios, mientras que en otras se encontraron únicamente formas quísticas de flagelados, amibas, o ciliados. Esto sugiere que el agua suministrada por la red general se encontraba libre de contaminación por protozoarios y con un nivel de cloro residual suficiente para eliminar las formas libres de

estos protozoarios. La contaminación por protozoarios detectada en las muestras que resultaron positivas parece ser directamente atribuible a la introducción de agua no potable a la red vecina a los grifos muestreados, a través de conexiones cruzadas con fuentes de agua contaminada.

En otro estudio, Rivera y colaboradores [1993] describieron la presencia de amibas patógenas de los géneros *Acanthamoeba y Naegleria* en aguas de piscinas de centros recreativos del DF, con niveles de cloro residual de 0.5 a 1.5 mg/ml, lo que indica la poca eficiencia de la cloración y del mantenimiento de las piscinas. Aun cuando esta investigación no está aparentemente relacionada con el agua potable, se menciona debido a que para cierto núcleo de la población puede representar un foco de contaminación que se puede confundir con el agua de suministro.

Tomassini y López–Ochoterena analizaron en 1979 la calidad del agua de tinacos de asbesto y de lámina metálica de diversas casas–habitación de 13 colonias escogidas al azar en el DF. Detectaron protozoos indicadores de materia orgánica en descomposición,

TABLA 3.3.2

FUGAS DE AGUA POTABLE ELIMINADAS EN LAS REDES PRIMARIA Y SECUNDARIA DE AGUA POTABLE

Delegación	*1986*	*1987*	*1988*	*1989*	*1990*	*1991*
1. Álvaro Obregón	960	5,247	1,078	1,734	2,026	4,457
2. Atzcapotalco	271	402	1,291	950	1,397	1,244
3. Benito Juárez	709	1,445	1,008	793	1,362	2,784
4. Coyoacán	742	684	433	789	966	2,878
5. Cuajimalpa	16	24	18	95	94	336
6. Cuauhtémoc	1,250	1,661	643	797	1,000	2,589
7. Gustavo A. Madero	1,807	2,455	4,882	5,212	4,287	5,256
8. Iztacalco	669	1,915	322	440	435	1,258
9. Iztapalapa	1,584	1,845	1,253	5,294	5,546	9,931
10. Magdalena Contreras	110	2,325	86	95	145	463
11. Miguel Hidalgo	596	1,621	385	556	734	1,914
12. Milpa Alta	12	14	5	87	20	35
13. Tláhuac	55	1,873	79	137	130	416
14. Tlalpan	252	287	226	2,443	1,340	1,324
15. Venustiano Carranza	1,157	738	511	856	730	2,321
16. Xochimilco	107	1,211	132	279	222	543
TOTAL:	10,297	23,747	12,352	20,557	20,434	37,749

como los pertenecientes a los géneros *Colpoda, Vorticella, Podophyra* y *Aspidisca.* Asimismo, corroboraron la presencia de amibas con potencial patógeno para los humanos, de los géneros *Naegleria* y *Vahlkampfia.* La frecuencia de estos protozoos fue mayor en los tinacos descubiertos y sin lavado periódico. Postularon la hipótesis de que los microorganismos presentes en los tinacos pueden provenir tanto de la red de distribución de agua potable como de la atmósfera.

3.4. Vigilancia y certificación sanitaria de la calidad del agua

3.4.1. Regulación sanitaria

De acuerdo con el Artículo 118 de la Ley General de Salud, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 14 de junio de 1991, a la Secretaría de Salud (SSA) corresponde elaborar las normas a que deberá sujetarse el tratamiento del agua, así como asesorar en materia de ingeniería sanitaria El Artículo 119 de la ley citada precisa la función de dicha Secretaría de vigilar y certificar la calidad sanitaria del agua para uso y consumo humano.

El Reglamento en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, publicado en el DDF el 18 de enero de 1988, en sus artículos 209–224 y 227 contiene disposiciones relacio-nadas con los parámetros para normar la calidad del agua potable, para la desinfección de sistemas de abastecimiento, así como requisitos sanitarios de construcciones e instalaciones, equipos de los sistemas de abastecimiento, al igual que procedimientos para la certificación de sistemas de abastecimiento y disposiciones para suspender o condicionar el suministro.

En su Título Tercero, relativo al agua y al hielo para uso y consumo humanos y para refrigeración, el reglamento citado incorpora disposiciones relativas a la potabilidad del agua.

En su Artículo 209, define al agua potable como toda aquella agua cuya ingestión no cause efectos nocivos para la salud y se encuentre libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas, y cumpla además, con los requisitos que se señalan en el Artículo 210 referidos a continuación:

1. La cantidad de organismos coliformes totales deberá ser, como máximo, de dos organismos en 100 ml, según las técnicas del número más probable (NMP) o de filtro de membrana.
2. No deberá contener organismos coliformes fecales.

Aparte de lo anterior, se podrán realizar, a satisfacción de las autoridades sanitarias, todas las pruebas que se consideren necesarias, a fin de identificar otros riesgos a la salud.

En el Artículo 211 se indica que los requisitos organolépticos y físicos se establecerán atendiendo a las característicassiguientes: aspecto, pH, sabor, olor, color, turbiedad del

agua y, en su caso, los demás que señale la norma. El Artículo 212 establece que se considera que el agua es potable, en lo relativo a las características anteriores, cuando se encuentre dentro de los límites siguientes:

I. Aspecto: líquido
II. pH: 6.9-8.5
III. Sabor: característico
IV. Olor: característico
V. Color: hasta 20 unidades de la escala de platino-cobalto, o su equivalente en otro método.
VI. Turbiedad: hasta 10 unidades de la escala de sílice, o su equivalente en otro método.

El Artículo 213 establece que el contenido de elementos, iones y sustancias, expresado en miligramos por litro, no debe exceder los límites permisibles que se expresan a continuación:

Alcalinidad total expresada como CaC03	400.00
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	1.00
Cadmio	0.005
Cianuro, expresado como ion (CN)	0.05
Cobre	1.50
Cloro libre: en agua clorada	0.20
en agua sobreclorada	1.00
Cromo hexavalente	0.05
Dureza de calcio expresada como CaC03	300.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros expresados como (F)	1.50
Magnesio	125.00
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos, expresados como nitrógeno	5.00
Nitritos, expresados como nitrógeno	0.05
Nitrógeno proteico	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido	3.00
Plomo	0.05
Selenio	0.05
Sulfatos, expresados como ion	250.00
Cinc	5.0
SAAM (Sustancias activas al azul de metileno)	0.5
ECC (Extractables carbón–cloroformo,	0.3
ECA (Extractables carbón–alcohol)	1.5

Los demás que señale la norma correspondiente.

Como complemento a lo establecido en el reglamento citado se han publicado las normas que aparecen en el recuadro siguiente:

NOM–012–SSA1–1993

Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados

NOM–013–SSA1–1993

Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y la distribución de agua para uso y consumo humano

NOM–014–SSA1–1993

Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua, públicos y privados

Para el cumplimiento de las disposiciones legales anteriores, la SSA, por conducto de su Dirección General de Salud Ambiental, realiza un Programa de Vigilancia y Certificación que, en el caso del DF, instrumenta con el concurso de la DGCOH para llevar a cabo el muestreo aleatorio de las fuentes de abastecimiento, red de distribución, plantas de tratamiento, y tomas domiciliarias.

A partir de 1991 la SSA se sumó, además, al Programa Agua Limpia establecido por la CNA, promoviendo y vigilando más estrechamente la cloración del agua en todo el país, y el control sanitario del agua embotellada y del hielo; como posible resultado, a partir de 1992 se ha observado, como se mostrará más adelante, una disminución en la frecuencia de diarreas.

3.4.2. Monitoreo de la calidad del agua en el Distrito Federal

A causa de la importancia del suministro de agua de buena calidad, los programas de vigilancia se iniciaron en 1951, fecha en la que se creó el Laboratorio de Xotepingo, de la actual DGCOH. Estos programas se implementaron en los sistemas de abastecimiento existentes en ese momento: Lerma, acueducto Xochimilco, pozos y manantiales, que en aquel tiempo aportaban un gasto promedio de 11.8 m^3/s.

Durante los años subsecuentes, el intenso y acelerado crecimiento de la población incrementó la demanda de servicios, entre ellos los de suministro de agua potable. La calidad del agua comenzó a declinar por los asentamientos anárquicos en zonas en donde la infraestructura hidráulica era insuficiente o no existía. Durante el decenio de 1980 fue necesario construir y anexar al sistema hidráulico de abastecimiento la cuenca del río Cutzamala; se incrementó así sustancialmente la cantidad de tomas domiciliarias en servicio, de 85% a 97%. Una parte de la población que se encontraba en cotas inaccesibles y asentamientos irregulares se abastecía por medio de carros cisterna. Todo lo anterior obligó a incrementar la vigilancia de la calidad del agua por parte de las instituciones reguladoras [Correa, A., 1992].

La Subdirección de Desarrollo, dependiente de la Dirección Técnica de la DGCOH, perteneciente al Departamento del Distrito Federal, es la responsable del Laboratorio

Central de Control, (Fig. 3.4.1) el cual se divide en las áreas de análisis siguientes:

i) Análisis fisicoquímicos de agua potable
ii) Análisis bacteriológicos de agua potable
iii) Análisis fisicoquímicos de agua residual
iv) Análisis bacteriológicos de agua residual
v) Control de calidad analítica
vi) Cromotografía de gases
vii) Espectrofotometría de absorción atómica
viii) Virus, parásitos y mutágenos
ix) Análisis especiales

Dentro del proceso de control de la calidad del agua, el Laboratorio Central de Control se aboca a la destinada para consumo humano, la residual y la residual tratada. En lo que se refiere a la primera, ha establecido un sistema de monitoreo y análisis de la calidad que implica la evaluación cotidiana de las instalaciones que forman parte del sistema hidráulico del DF que incluye pozos, tanques, estaciones de rebombeo, manantiales, plantas potabilizadoras y sitios de agua en bloque. En materia de agua residual, se tienen clasificados sitios fijos de monitoreo en los principales drenes que se ubican en el sistema, así como en las salidas de agua del DF. Para valorar el agua renovada cotidianamente se toman muestras de los influentes, efluentes y durante algunos procesos intermedios, de las plantas de tratamiento de agua residual.

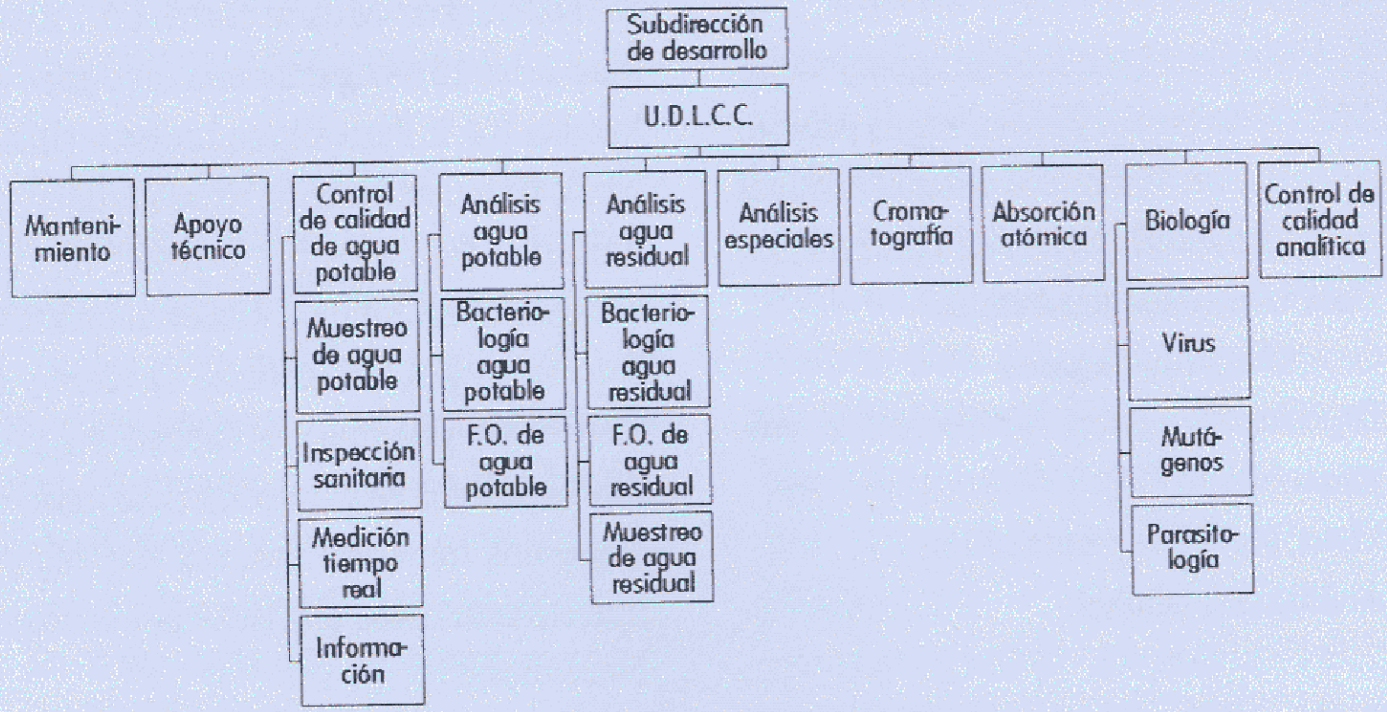
Para supervisar la calidad del agua para consumo humano se efectúan monitoreos en la red de distribución que abastece a la población del DF; se realizan muestreos en cruceros específicos de cada una de las 1,270 colonias de las 16 delegaciones, como aparece en la tabla 3.4.1. Para ello se hacen visitas aleatorias de muestreo a los 76,968 cruceros existentes en esas colonias. Tan sólo en 1993 se analizaron un total de 46,569 muestras y se realizaron 176,564 lecturas de cloro y 6,304 inspecciones sanitarias (Tablas 3.4.2 y 3.4.3.) Sin embargo, esto implica sólo una o a lo sumo dos muestras anuales por red y seis muestras anuales por sitio de instalaciones hidráulicas.

En un día normal de operación de la Subdirección de Desarrollo y de su laboratorio se realizan las actividades siguientes:

- Elaboración de programas de muestreo específicos.
- Determinación de orden y lugar de mues treo y tipo de análisis.
- Realización del muestreo correspondiente y/o de inspección sanitaria.
- Recepción y registro de muestras. Captura de datos.
- Distribución de las muestras a las áreas correspondientes para su análisis.
- Medición de cloro y colecta de los datos respectivos.
- En su caso, notificación inmediata de deficiencias para emprender acciones correctivas.
- Captura y tratamiento de los resultados de los análisis.
- Notificación de resultados anormales.

FIGURA 3.4.1

ORGANIGRAMA DEL LABORATORIO CENTRAL DE CONTROL



- Investigación de los problemas y planteamiento de posibilidades y alternativas de solución.
- Adopción y ejecución de decisiones correctivas.

Cuando se identifican pozos con problemas de calidad del agua que, a pesar de los trabajos correctivos, tienden a agravarse con el transcurso del tiempo, el agua extraída se emplea para riego de áreas verdes o para usos industriales. En cuatro pozos problemáticos se han instalado, además, plantas de tratamiento.

Análisis de la calidad del agua potable

La evaluación de la calidad del agua potable de las muestras obtenidas en instalaciones y red se procesa con base en cuatro niveles de análisis que incluyen parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, biológicos y cromatográficos y que proporcionan información relativa a vigilancia o a la investigación acerca de datos más precisos de calidad del agua (Tabla 3.4.3. B) [Correa, A., 1992].

Nivel A. Está enfocado a detectar contaminación bacteriológica, así como a proporcionar información respecto a: cloro residual libre y total, pH, conductividad eléctrica, temperatura y turbiedad. Estos datos permiten establecer la correlación entre los niveles de concentración de microorganismos e indicadores físico-químicos, así como los efectos del cloro libre residual combinado, sobre la calidad bacteriológica del agua.

Nivel 2 A. Permite obtener un perfil mínimo de calidad del agua, según las características

TABLA 3.4.1

COLONIAS Y CRUCEROS EXISTENTES POR DELEGACIÓN POLÍTICA EN EL DISTRITO FEDERAL

Delegación	*Núm. colonias*	*Núm. cruceros*
Álvaro Obregón	154	5,886
Azcapozalco	88	4,999
Benito Juárez	48	3,667
Coyoacán	81	4,841
Cuajimalpa	41	1,191
Cuauhtémoc	31	3,784
Gustavo A. Madero	162	11,971
Iztacalco	41	3,294
Iztapalapa	183	14,816
Magdalena Contreras	37	1,835
Miguel Hidalgo	68	3,998
Milpa Alta	12	894
Tláhuac	53	2,980
Tlalpan	117	5,629
Venustiano Carranza	58	3,892
Xochimilco	96	3,291
Total	1,270	76,968

físico-químicas imperantes en el DF. Dentro de este esquema de análisis se incluyen los once parámetros del Nivel A, más alcalinidad total, cloruros, color, oxígeno consumido en medio ácido (OCMA), dureza total y nitrógeno amoniacal.

Nivel 3A. Se determina para satisfacer los requisitos incluidos en las Normas de Calidad del Agua Potable establecidas por la Secretaría de Salud. Incluye todos los parámetros anteriores y la demanda de cloro, dureza de calcio, dureza de magnesio, fluoruros, sólidos disueltos totales, nitratos, nitritos, nitrógeno proteico, sulfatos, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), calcio, potasio, sodio y metales como aluminio, antimonio, arsénico, cadmio, cinc, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio.

Nivel 4A. Los parámetros que se incluyen parten de experiencias internacionales acerca de la calidad del agua e incluyen, además de todos los parámetros anteriores, a los sólidos en todas sus formas, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de

TABLA 3.4.2

PORCENTAJE DE MUESTRAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN CONFORME A LA NORMA EN 1993

Delegación	*Núm. total*	*Núm. óptimas*	*%*
Álvaro Obregón	2,258	2,165	96
Azcapozalco	2,696	2,612	97
Benito Juárez	433	425	98
Coyoacan	1,346	1,322	98
Cuajimalpa	651	597	92
Cuauhtémoc	461	453	98
Gustavo A. Madero	6,570	6,324	96
Iztacalco	1,251	1,173	94
Iztapalapa	7,507	6,755	90
Magdalena Contreras	808	768	95
Miguel Hidalgo	827	806	97
Milpa Alta	487	475	98
Tláhuac	1 ,938	1,792	92
Tlalpan	1,306	1179	90
Venustiano Carranza	1,829	1,663	91
Xochimilco	1,868	1,699	91
Quejas usuarios	14,333	13,538	94
Total	46,569	43,746	94

oxígeno (DQO), compuestos orgánicos sintéticos (por medio del análisis cromotográfico que, entre otros, detecta grupos como hidrocarburos alifáticos, aromáticos, alcoholes, fenoles, cetonas, ésteres, éteres, virus, parásitos y mutágenos). Adicionalmente, se analizan radón y *Vibrio cholerae*.

El porcentaje de aplicación de los niveles analíticos es: A, 70%; 2A, 15%; 3A, 10%; y 4A, 5% de las muestras. Los niveles A y 2A se emplean para analizar las muestras de tomas domiciliarias. El nivel 3A se utiliza en el estudio de muestras tomadas en las instalaciones hidráulicas, como pozos, manantiales, tanques de almacenamiento y estaciones de rebombeo. Finalmente el nivel 4A se aplica sólo en muestras de instalaciones hidráulicas y en tomas domiciliarias que han manifestado problemas o cuando se sospeche que existen.

Resultados del monitoreo

Análisis de la calidad del agua residual y renovada. Para la evaluación de las aguas

TABLA 3.4.3. A

PORCENTAJE DE LECTURAS DE CLORO CONFORME A LA NORMA EN 1993

Delegación	*Núm. total*	*Núm. óptimas*	*%*
Álvaro Obregón	7,060	6,719	95
Azcapotzalco	5,520	5,443	99
Benito Juárez	3,107	2,975	96
Coyoacán	6,979	6,760	97
Cuajimalpa	1,337	1,301	97
Cuauhtémoc	2,555	2,500	96
Gustavo A. Madero	12,419	11,622	94
Iztacalco	3,572	3,423	96
Iztapalapa	19,510	16,911	87
Magdalena Contreras	1,709	1,591	93
Miguel Hidalgo	2,952	2,810	95
Milpa Alta	1,110	1,057	95
Tláhuac	4,023	3 , 508	87
Tlalpan	4,148	3,928	95
Venustiano Carranza	3,414	3,256	95
Xochimilco	4,215	3,755	89
Total DGCOH	83,630	77,559	93
Total SSA	92,934	88,750	93
Total	176,564	166,309	94

residuales y de las residuales tratadas (renovadas), se aplica un sistema similar al del agua potable, el cual comprende cuatro niveles de acción.

Nivel B. Incluye pH, temperatura, oxígeno disuelto, cloro residual libre y cloro residual total.

Nivel 2B. Se determina: pH, color, turbiedad, alcalinidad total, dureza total, carbonatos, bicarbonatos, conductividad eléctrica, cloruros, sólidos en todas sus formas, nitrógeno amoniacal y proteico, nitratos, nitritos, fosfatos, calcio, coliformes totales, DBO, DQO, grasas y aceites, SAAM, y algunos metales, como hierro, manganeso, plomo, cadmio, mercurio y arsénico.

Nivel 3B. Incluye parámetros de orden específico como: sodio, metales solubles y coliformes fecales.

TABLA 3.4.3. B

PORCENTAJE DE INSTALACIONES CON CALIDAD DE AGUA SATISFACTORIA

Tipo de instalación	*Número de instalaciones muestradas*	*Porcentaje de muestras que cumplen satisfactoriamente los parámetros físicoquímicos**	*Porcentaje de muestras que cumplen satisfactoriamente los parámetros bacteriológicos*
Pozos[a]	774	69	79
Manantiales[a]	55	62	24
Tanques[b]	274	51	56
Estaciones de rebombeo	114	60	77
Agua en bloque[bc]	18	56	61

* Se miden parámetros adicionales a los contenidos en la norma sanitaria. En tomas domiciliares 85 a 100% de las muestras cumplen con la norma

[a] La muestra se tomó antes de tratamiento.

[b] En algunas instalaciones la muestra se tomó antes de la cloración.

[c] El agua en bloque es muestreada en el punto de entrada al sistema de distribución.

Nivel 4B. Comprende todo lo determinado en los niveles anteriores, y se le adicionan las evaluaciones de compuestos orgánicos sintéticos, virus, parásitos y mutágenos, además de exámenes especiales de *Vibrio cholerae*.

Es oportuno expresar que en muchos casos se efectúan análisis con grupos de parámetros, no incluidos en los niveles citados, con la intención de cubrir necesidades específicas de información.

Reúso del agua renovada

El propósito principal de tratar agua residual en la ZMVM es proveer fuentes alternas de agua para usos que no requieran de agua potable.

Asimismo, como se menciona en uno de los capítulos anteriores, para atenuar el problema de sobreexplotación del acuífero, se ha propuesto recargarlo artificialmente con agua residual sometida a tratamiento terciario. Para que la recarga sea efectiva, la formación geológica a través de la cual se plantea llevar a cabo la recarga debe ser de alta porosidad. La zona de transición y las zonas bajas de las montañas poseen tal tipo de porosidad y están conectadas con el sistema de acuíferos de la ZMVM. Sin embargo, debe considerarse que las mismas formaciones de alta permeabilidad que permiten que el agua fluya, a la vez hacen que el acuífero sea vulnerable a la contaminación.

Además de los problemas de contaminación por compuestos químicos tóxicos, en la literatura existe evidencia respecto a la dificultad de destruir los organismos enquistados

de los parásitos intestinales y existen dudas de que el tratamiento al que se someta al agua residual sea capaz de remover tales agentes de riesgo, así como los enterovirus.

Uso del agua residual no tratada para riego de cultivos

La gran riqueza de nutrientes del agua residual generada en la ciudad de México, propició hace más de 40 años, la decisión de emplearla para irrigar la zona agrícola del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, lo cual impulsó notoriamente la economía de esa zona. Hasta el año de 1991, en que se publicó la norma que prohibe el uso del agua residual no tratada para el riego de productos que se consumen crudos o crecen a ras de tierra, esa agua se empleaba para irrigar aproximadamente 58,000 hectáreas. La regulación de su empleo surgió de la preocupación por el riesgo que implica para la salud de los consumidores la presencia de un alto contenido de organismos patógenos en dicha agua residual y su contribución al alto índice de enfermedades gastroentéricas.

3.4.3. Monitoreo de la calidad del agua en los municipios conurbados del Estado de México

La Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México (CEAS), realiza desde análisis físicos, químicos y bacteriológicos (inclusive de metales pesados) en laboratorio hasta muestras de agua de fuentes de abastecimiento municipales y estatales en los 17 municipios conurbados de la ZMVM. Cabe destacar que la infraestructura con la que cuenta para realizar la vigilancia y el control de la calidad del agua para consumo humano no se compara con la antes descrita para el DF.

El muestreo se efectúa dos veces por año, de acuerdo con un programa preestablecido. Las fuentes estatales se han muestreado desde 1982, y las municipales desde mediados de 1991, cuando en el Estado de México entró en vigor el "Programa Agua Limpia".

Se determinan los parámetros siguientes:

- Organolépticos: aspecto, potencial de hidrógeno, olor, sabor, color y turbiedad.
- Bacteriológicos: coliformes totales y fecales.

Elementos, iones y sustancias: alcalinidad, aluminio, arsénico, bario, cadmio, cloruros, cobre, cromo hexavalente, dureza total y de calcio, hierro, fluoruros, magnesio, manganeso, nitratos, plomo, selenio y cinc.

Para determinar si el agua es apta para consumo humano se aplican las normas establecidas por la Secretaría de Salud. Del monitoreo cabe destacar lo siguiente:

1. La cantidad de muestras que en promedio se analizan física, química y bacteriológicamente en tomas domiciliarias de los municipios de Atizapán de Zaragoza, Naucalpan, Tlalnepantla, Ecatepec, Nezahualcóyotl, Cuautitlán Izcalli, Chalco e Ixtapaluca, es de 20 por mes y por municipio. En los

municipios de Huixquilucan, Nicolás Romero, Cuautitlán México, Coacalco, Tecámac, Chicoloapan, Chimalhuacán, Los Reyes-La Paz y Tultitlán se analizan en promedio 10 muestras por mes y por municipio.

2. Como parte del Programa Agua Limpia, el Instituto de Salud del Estado de México, monitorea quincenalmente el cloro residual en tomas domiciliarias de los 17 municipios conurbados al DF. El porcentaje de cloro residual detectado es el siguiente:

Atizapán de Zaragoza	81.4
Huixquilucan	89.4
Naucalpan	88.9
Nicolás Romero	80.9
Tlalnepantla	89.8
Cuautitlán Izcalli	76.1
Cuautitlán México	16.6
Coacalco	100.0
Tultitlán	55.8
Ecatepec	96.7
Nezahualcóyotl	97.4
Tecámac	93.7
Chicoloapan	100.0
Chimalhuacán	83.3
Los Reyes-La Paz	47.3
Chalco	56.0
Ixtapaluca	72.2

3. Según los resultados de laboratorio, los municipios en los que hay deterioro en la calidad del agua en las tomas domiciliarias debido a problemas en las líneas de distribución son: Nezahualcoyótl, Ixtapaluca, Ecatepec, Chalco, Naucalpan, Los Reyes-La Paz y Tultitlán.

Lo anterior se debe principalmente a dislocaciones y fracturas en las líneas de distribución, pues al disminuir la presión del agua en la red provocan la infiltración de contaminantes. Otro motivo importante del deterioro de la calidad del agua en las redes antiguas de distribución es que no reciben mantenimiento, por lo que las sales disueltas en el agua (principalmente las de calcio, magnesio, hierro y manganeso) se incrustan paulatinamente en la tubería. Cuando la presión del agua aumenta se desprenden estas incrustaciones y degradan la calidad del agua.

4. Los municipios en los que se hacen más reparaciones y/o cambios de tubería en las líneas de conducción y distribución, en orden progresivo, son: Chalco, Nezahualcóyotl, Ecatepec, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Tultitlán, Naucalpan, Atizapán y Tlalnepantla.

3.5. Vulnerabilidad de la salud de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México

3.5.1. Contexto demográfico y causas principales de mortalidad

En la ZMVM se concentra una gran población, que dentro de su ámbito ecológico comparte una diversidad de fenómenos. Su densidad demográfica es de alrededor de 12,556 habitantes por km^2.

Como ya se mencionó en otro capítulo, en 1990 la población total en el área era de

15,047,685 habitantes, de los cuales el 48.5% correspondieron al sexo masculino y el 51.5% restante al sexo femenino [SPP-INEGI, 1991]. Aunque la tasa de crecimiento tiende a reducirse, se espera que para el año 2,005 la ZMVM albergue a más de 20 millones de habitantes.

La magnitud de la población estimada en las delegaciones del DF aparece resumida en la tabla 3.5.1. Existe un proceso de redistribución poblacional de las áreas centrales hacia las periféricas y hacia los municipios conurbados.

En la tabla 3.5.2 se resumen los datos de la población estimada para 1993 en los municipios conurbados.

La estructura de la población por grupos de edad y sexo muestra que el intervalo de edad que contribuye con mayor porcentaje es el de 15 a 64 años, población de gran interés, pues en él se encuentra la mayoría de la población económicamente activa, que suma un total de 9,419,485 habitantes [CONAPO, 1987]. De esta manera, el 33.4% del total de la población de la ZMVM corresponde al grupo de 0 a 14 años, y constituye un reto para los programas de atención a la salud, por ser el segmento que cuenta con mayores factores de riesgo.

El mejoramiento de las condiciones de salud y bienestar social alcanzadas por la población mexicana durante el siglo actual, ha contribuido a una profunda transición epidemiológica y demográfica que, sin embargo, sigue siendo incompleta y desigual en su distribución, circunstancia que en cierta medida también ha contribuido a la problemática de salud en el área metropolitana.

Las tablas 3.5.3, 3.5.4 y 3.5.5 resumen las diez primeras causas de mortalidad general en todo el país, en el Estado de México y en el DF. En ellas se puede apreciar que las tasas de enfermedades del corazón y los tumores malignos en el DF corresponden casi al doble de las ocurridas en el Estado de México; en ambos casos están entre las tres primeras causas de muerte. Las tasas de mortalidad por enfermedades infecciosas intestinales en el DF equivalen a menos de la mitad de las observadas en el Estado de México; ocupan el decimotercer lugar, en vez del noveno, como causas de defunción [SPP-INEGI, 1991b]. La distribución de esos padecimientos a nivel nacional se aproxima más a la del DF.

En las tablas 3.5.6 a 3.5.8 se muestran las diez causas principales de mortalidad infantil en todo el país, en el Estado de México y en el DF, respectivamente. En relación a padecimientos como los originados en el periodo perinatal o las anomalías congénitas, que se encuentran entre las cuatro primeras causas de muerte, no se observa gran diferencia entre las tasas en el DF y en el Estado de México, pero nuevamente las tasas de mortalidad por enfermedades infecciosas intestinales son inferiores en el DF. Por su parte, los tumores malignos ocupan el decimoséptimo lugar como causa de muerte infantil en el Estado de México, y el decimosexto en el DF [SPP-INEGI, 1991b].

3.5.2. Poblaciones vulnerables

Desde la perspectiva de la calidad del agua, el presente análisis se orienta hacia el estudio de la distribución de las enfermedades diarreicas en la ZMVM, que son indicadores de: a) contaminación de agua y alimentos por organismos patógenos; b) infraestructura sanitaria deficiente; c) bajo nivel cultural, y d) disposición inadecuada de la excreta humana [Carrada-Bravo, 1986]. Enfermedades que particularmente afectan a los niños y ocasionan una cantidad elevada de muertes.

Por lo anterior, las diarreas se abordan desde el punto de vista de la mortalidad, la cual puede prevenirse recurriendo a la rehidratación oral [Acosta-Bendek y Vázquez-Camargo, 1989], y también con respecto a la morbilidad, lo que implica considerar el ataque a fondo de los factores causales; en este caso serían, los relacionados con el agua y el saneamiento básico.

Para elaborar el diagnóstico de la situación de la ZMVM a este respecto, se procedió a realizar un estudio con el propósito de detectar si existe una distribución desigual, de los casos de diarrea en las diferentes delegaciones del DF o en los municipios conurbados del Estado de México, que indique problemas particulares por resolver e identifique a poblaciones vulnerables.

Es pertinente resaltar que si bien las enfermedades diarreicas se pueden atribuir a la exposición a organismos patógenos específicos, las fuentes de exposición son múltiples, sobre todo cuando existe una importante dispersión de gérmenes en el ambiente como consecuencia del fecalismo a ras de suelo. Sin embargo, la contribución del agua al desarrollo de tales padecimientos puede deslindarse por medio de su análisis microbiológico, el cual permite determinar la contribución de virus, bacterias y protozoarios al desarrollo de las diarreas. De ahí la importancia de utilizar la distribución de las diarreas como indicador potencial de problemas puntuales de calidad del agua en la ZMVM [Tapia *et al.*, 1993].

Otros riesgos de la contaminación del agua por organismos patógenos incluyen el desarrollo de enfermedades paralíticas, meningitis aséptica, encefalitis, miocardiopatías, infecciones sistémicas severas en recién nacidos (meningo-encefalo-miocardiasis), síndromes respiratorios, orquitis, hepatitis y otras más, que pueden ser ocasionadas por gran diversidad de enterovirus. La mayoría de las infecciones virales de origen hídrico ocurren en niños, pues carecen de inmunidad contra una gran variedad de virus entéricos. En la ciudad de México, en un 20% de los infantes se ha detectado la excreción de virus entéricos y desde edad temprana el desarrollo de los anticuerpos respectivos contra ellos. Asimismo, en una frecuencia elevada de niños existe evidencia serológica de infección por el virus de la hepatitis A antes de los seis años de edad.

Varias enfermedades de posible transmisión hídrica, aunque pueden tener bajas

tasas de letalidad, son importantes porque producen morbilidad y causan anemia, molestias digestivas y otras condiciones de debilidad que repercuten en una baja productividad y en pobres estándares de vida. Entre ellas pueden incluirse la teniasis, la neurocisticercosis, la ascariasis y la anquilostomiasis, las cuales, como todas las anteriores descritas, están también íntimamente relacionadas con mala sanidad del agua, disposición inadecuada de excretas, falta de aseo personal y manejo inapropiado de alimentos [Tapia *et al.*, 1993].

La identificación de posibles problemas de contaminación química del agua mediante padecimientos "centinela" es más problemática; entre otros factores porque, por lo general, los contaminantes químicos suelen encontrarse en bajas concentraciones en el agua y formando mezclas complejas, aunado a que los padecimientos que pueden resultar de tal exposición tardan

TABLA 3.5.1
POBLACIÓN DELEGACIONAL DEL DISTRITO FEDERAL ESTIMADA EN 1992

Delegación	*Población (miles)*	*%*
Iztapalapa	1,515.8	18.1
Gustavo A. Madero	1,282.0	15.3
Álvaro Obregón	667.2	8.0
Coyoacán	644.5	7.7
Cuahtémoc	604.9	7.2
Venustiano Carranza	529.0	6.3
Tlalpan	498.4	6.0
Azcapozalco	476.6	5.7
Iztacalco	451.5	5.4
Miguel Hidalgo	416.6	5.0
Benito Juárez	411.9	4.9
Xochimilco	277.1	3.3
Tláhuac	213.9	2.5
Magdalena Contreras	197.4	2.4
Cuajimalpa	123.1	1.5
Milpa Alta	64.8	0.8
Población total	8,374.7	100.0

TABLA 3.5.2
ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN DEL ZONA METROPOLITANA CONURBADA, 1993

Municipio	*Población (miles)*	*%*
1. Atizapán	365.30	4.97
2. Chalco	327.69	4.46
3. Chicoloapan	65.94	0.90
4. Chimalhuacán	279.62	3.80
5. Coacalco	176.50	2.40
6. Cuautitlán México	56.60	0.77
7. Cuautitlán Izcalli	378.13	5.15
8. Ecatepec	1,411.42	19.21
9. Huixquilucan	152.85	2.08
10. Ixtapaluca	159.18	2.17
11. La Paz	154.45	2.10
12. Naucalpan	909.90	12.38
13. Nezahualcóyotl	1,458.07	19.84
14 Nicolás Romero	213.39	2.90
15. Tecámac	142.71	1.94
16. Tlalnepantla	813.99	11.07
17. Tultitlán	283.78	3.86
Población total	7,349.43	100.00

años en manifestarse y que su origen puede ser multifactorial [Craun, 1991; Rothwell *et al.*, 1991].

En los países en vías de desarrollo, la OMS ha identificado una correlación entre morbi-mortalidad infantil e infraestructura sanitaria deficiente [Acosta-Bendek *et al.*, 1989].

Lo anterior también se ha discutido en algunos artículos que presentan resultados de estudios acerca de incidencia y prevalencia de diarreas en situaciones posteriores a desastres, como en el caso del terremoto de la ciudad de México en 1985 [Ruiz-Matus *et al.*, 1987; Valdespino-Gómez *et al.*, 1987], en cuya oportunidad se logró apreciar que la carencia de agua entubada representó un factor de riesgo para el desarrollo de diarreas, y también que este factor fue mayor y más persistente en el nivel socioeconómico bajo, donde se encontraron casos agudos y crónicos vinculados con falta de agua para aseo,

TABLA 3.5.3

DIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD GENERAL EN LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, 1991

Número de orden	*Causa*	*Tasa*
1	Enfermedades del corazón	69.4
2	Tumores malignos	48.1
3	Accidentes	44.7
4	Diabetes mellitus	31.1
5	Ciertas afecciones originadas durante el periodo perinatal	25.6
6	Enfermedades cerebrovasculares	23.8
7	Influenza y neumonías	22.2
8	Enfermedades infecciosas intestinales	21.5
9	Cirrosis y otras enfermedades crónicas del hígado	21.4
10	Homicidio y lesiones infligidas intencionalmente	17.3

Tasa por 100,000 habitantes.

y casos crónicos relacionados con ingesta de agua no hervida depositada en bolsas de plástico. Algunos comportamientos y hábitos de la población, como hervir el agua y consumir agua embotellada, tuvieron efectos protectores.

También se menciona que las actividades sanitarias de orientación y educación para la salud, así como la reparación de la red de distribución de agua potable, influyeron en la mejoría de la calidad de ésta, con la consiguiente disminución en la incidencia de casos de enfermedades diarreicas [Valdespino *et al.*, 1987].

3.5.3. ENFERMEDADES DIARREICAS EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO EN 1991

Como ya se expresó, en México las tasas de mortalidad y morbilidad por enfermedades diarreicas tienen gran variación geográfica, como reflejo de las condiciones sanitarias y sociales, pero también como resultado de la cobertura de los servicios de salud, como se menciona en la encuesta acerca de morbilidad, mortalidad y tratamiento de diarreas [SNESSA, 1988].

El Programa Nacional de Salud comprende el subprograma de control de enferme-

TABLA 3.5.4

DZIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD GENERAL EN EL ESTADO DE MÉXICO, 1991

Número de orden	*Causa*	*Tasa (por 100,000 hab.)*
1	Enfermedades del corazón	37.6
2	Influenza y neumonías	30.3
3	Tumores malignos	29.5
4	Cirrosis y otras enfermedades crónicas del hígado	29.2
5	Accidentes	28.0
6	Afecciones de origen perinatal	27.9
7	Homicidio y lesiones intencionales	27.0
8	Diabetes mellitus	24.6
9	Enfermedades infecciosas intestinales	19.2
10	Enfermedades cerebrovasculares	16.4

TABLA 3.5.5

DIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD GENERAL EN EL DISTRITO FEDERAL, 1991

Número de orden	*Causa*	*Tasa (por 100,000 hab.)*
1	Enfermedades del corazón	73.2
2	Tumores malignos	51.3
3	Diabetes mellitus	42.4
4	Accidentes	28.0
5	Cirrosis y otras enfermedades crónicas	26.9
6	Enfermedades cerebrovasculares	24.2
7	Afecciones de origen perinatal	22.0
8	Influenza y neumonías	18.9
9	Nefritis, síndrome nefrótico y nefrosis	10.4
10	Anomalías congénitas	9.9

TABLA 3.5.6

DIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD INFANTIL EN LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, 1991

Número de orden	*Causa*	*Tasa*
1	Ciertas afecciones originadas durante el periodo perinatal	810.6
2	Enfermedades infecciosas intestinales	278.4
3	Influenza y neumonías	266.8
4	Anomalías congénitas	249.7
5	Deficiencias en la nutrición	79.3
6	Infecciones respiratorias agudas	44.8
7	Accidentes	44.4
8	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	26.7
9	Septicemia	23.4
10	Enfermedades del corazón	21.1

Tasa por 100,000 nacidos vivos registrados.

dades diarreicas mediante hidratación oral en el grupo de menores de cinco años; para ello se requiere disponer de mejores estimadores de morbilidad por diarrea en el grupo de edad mencionado, con la finalidad de precisar las necesidades de sobres de hidratación en las entidades federativas.

Durante 1991, en 11 entidades federativas del país se realizó la Encuesta sobre el Manejo Efectivo de Casos de Diarrea, en niños en el hogar (EMECADI). Entre otros resultados de dicha encuesta se pueden mencionar los siguientes: incidencia de diarrea en menores de cinco años (dos semanas previas), 14.5%; incidencia anual (episodios por niño/año), 4.5%; tasa de uso de sobres Vida Suero Oral, 17.1%; tasa de uso de medicamentos, 53.2%; y tasa de uso de terapia de hidratación oral, 63.2%.

A pesar de los grandes avances logrados en lo relativo a calidad y distribución del agua, servicio de drenaje, condiciones de la vivienda y otros relacionados con el saneamiento ambiental en la ZMVM, aún se identifica un patrón de morbilidad y mortalidad dominado por enfermedades prevenibles e infecciosas; de tal manera que las enfermedades diarreicas, en conjunto, ocupan los primeros

TABLA 3.5.7

DIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD INFANTIL EN EL ESTADO DE MÉXICO, 1991

Número de orden	*Causa*	*Tasa*
1	Afecciones de origen perinatal	1,119.9
2	Influenza y neumonías	679.0
3	Enfermedades infecciosas intestinales	450.0
4	Anomalías congénitas	312.4
5	Deficiencias en la nutrición	113.9
6	Infecciones respiratorias agudas	101.1
7	Accidentes	68.0
8	Septicemia	44.6
9	Bronquitis crónica y no especificada, enfisema y asma	43.7
10	Homicidio y lesiones intencionales	22.5

Tasa por 100,000 nacidos vivos registrados (cifras preliminares).

TABLA 3.5.8

DIEZ CAUSAS PRINCIPALES DE MORTALIDAD INFANTIL EN EL DISTRITO FEDERAL, 1991

Número de orden	*Causas*	*Tasa*
1	Afecciones de origen perinatal	1,043.2
2	Anomalías congénitas	393.1
3	Influenza y neumonías	275.1
4	Enfermedades infecciosas intestinales	156.7
5	Infecciones respiratorias agudas	63.0
6	Accidentes	35.1
7	Septicemia	35.1
8	Deficiencias en la nutrición	31.5
9	Bronquitis crónica y no especificada, enfisema y asma	16.2
10	Enfermedades del corazón	16.2

Tasa por 100,000 nacidos vivos registrados (cifras preliminares).

lugares dentro de las causas de morbilidad y mortalidad [SNES-SSA, 1988].

En 1991 la tasa de diarrea aguda a nivel nacional fue de 3,233 por 100,000 habitantes en todas la edades; 46% de estos casos ocurrieron en menores de cinco años de edad. Este comportamiento epidemiológico es similar al de la morbilidad de las jurisdicciones sanitarias que administran los servicios de salud en áreas delegacionales de la ciudad de México.

En relación con la mortalidad, en particular la infantil, es un indicador significativo de la situación económica y ambiental, debido a que estos padecimientos son prevenibles y de manejo fácil. En los últimos años, en el país ha disminuido considerablemente la mortalidad; sin embargo, a pesar del acceso adecuado a los servicios de salud, en la ZMVM aquélla continúa ocurriendo casi con la misma magnitud.

Morbilidad

En las tablas 3.5.9 y 3.5.10 se resumen la incidencia y el porcentaje de enfermedades diarreicas por jurisdicción sanitaria del DF y municipios conurbados, en 1991.

Las tasas de morbilidad son más elevadas en la medida que las delegaciones se encuentran más al sureste del DF y con menor índice de población, como es el caso de las jurisdicciones de Milpa Alta y Tláhuac —caracterizadas por ser altamente rurales— que representan el 12.05% del total de casos registrados (Tabla 3.5.11).

Asimismo, se puede observar que entre las jurisdicciones del Estado de México conurbadas con el DF, entre las de mayor incidencia de enfermedades diarreicas se encuentran Tenango del Valle y Xonacatlán, que comprenden a los municipios conurbados de Chalco e Ixtapaluca, colindantes con las jurisdicciones del DF antes mencionadas (Tabla 3.5.10).

Entre las jurisdicciones con menor incidencia de enfermedades diarreicas dentro del DF se encuentran las localizadas al norte y noreste de la ciudad de México, tales son los casos de Iztapalapa y Gustavo A. Madero, que representan el 15.93% del total de morbilidad por enfermedades diarreicas (Tabla 3.5.9).

Dichas demarcaciones colindan con las jurisdicciones del Estado de México en las que también hay una incidencia más baja: Naucalpan, Cuautitlán, Ecatepec y Tlalnepantla (Tablas 3.5.9, 3.5.10 y 3.5.12), que abarcan los municipios del área conurbada de Tlalnepantla; Cuautitlán, Melchor Ocampo, Teoloyucan, Tepozotlán, Tultepec, Tultitlán, Cuautitlán Izcalli, Coacalco, Ecatepec y Tlalnepantla de Baz.

En relación con las jurisdicciones de la parte central, como Benito Juárez (941.98 casos por 100,000 habitantes) y Cuauhtémoc (1,049.93 casos por 100,000 habitantes), sus tasas son intermedias y representan el 11.23% del total (Fig. 3.5.1).

En la jurisdicción Nezahualcóyotl la incidencia fue de 839 casos por 100,000 habitantes, inferior en 170% con respecto a Iztapala-

pa y 396% en relación a Venustiano Carranza, que son sus demarcaciones colindantes.

Al ajustar las tasas en las jurisdicciones del Valle de México y su área conurbada, con respecto a una población estándar escogida, se encontró una característica importante: en el 88% de los municipios conurbados al DF hay tasas más elevadas en comparación con el resto de los municipios no conurbados.

En el DF, el grupo de edad más afectado por las diarreas es el de menores de un año, con incidencia de 17,472 por 100,000 NVR (nacidos vivos registrados), 13.2%; le sigue el grupo de 1 a 4 años, con tasa de 5,898 y un porcentaje de 18.2% del total. El grupo menos afectado fue el de 65 y más años, con incidencia de 1,471 por 100,000 habitantes.

Mortalidad

En las tablas 3.5.13 y 3.5.14 se presentan las tasas y los porcentajes de mortalidad por enfermedades diarreicas en el DF y en el Estado de México.

El 0.007% de la mortalidad general en el DF fue debida a enfermedades diarreicas, con tasa de 7 defunciones por cada 100,000 habitantes, cifra inferior a la correspondiente al nivel nacional (21.5 por 100,000 hab.).

En el Estado de México la tasa es de 17 defunciones debidas a diarreas por cada 100,000 habitantes, cifra considerablemente superior a la registrada en el DF.

Las jurisdicciones del DF con mayor tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas fueron Milpa Alta y Cuajimalpa; de las conurbadas: Xonacatlán y Amecameca (Tabla 3.5.14). Como se muestra en la figura 3.5.2, existe una relación entre las jurisdicciones del DF y las conurbaciones en cuanto a altas tasas de mortalidad por enfermedades diarreicas.

Como se observa en la tabla 3.5.15 (Fig. 3.5.2), la estructura etaria de la mortalidad presenta una ocurrencia elevada en las edades extremas de la vida.

Cólera

En 1991 el panorama epidemiológico del cólera en el mundo cambió sustancialmente. En México también aconteció un cambio notable por la aparición de este padecimiento en el país; ocurrieron un total de 2,690 casos, de los cuales el 2.9% correspondieron al DF, con tasa inferior a un caso por 100,000 habitantes; asimismo, se tuvo conocimiento de una defunción por este padecimiento, con tasa de letalidad de 1.1 por cada 100 casos. En el Estado de México, desde la primera aparición notificada en junio de 1991, se registraron 56 casos, que representaron el 2.1% de la totalidad de los registrados a nivel nacional, con tres defunciones y letalidad de 1.8 por 100 casos.

Brotes por enfermedades diarreicas

En el periodo de 1991 ocurrieron un total de 7 brotes por enfermedades diarreicas en el Estado de México: tres en el área conurbada, que comprendieron las jurisdicciones de Naucalpan y Tenango del Valle, con un to-

TABLA 3.5.9

INCIDENCIA Y PORCENTAJE DE ENFERMEDADES DIARREICAS POR JURISDICCIÓN SANITARIA EN EL DISTRITO FEDERAL, 1991

Juridicción sanitaria	*Casos*	*Tasa*	*%*
Álvaro Obregón	10,623	1,592.18	11.66
Azcapozalco	2,681	562.53	2.94
Benito Juárez	3,880	941.98	4.26
Coyocacán	10,241	1,588.98	11.24
Cuajimalpa	2,683	2,179.53	2.94
Cuauhtémoc	6,351	1,049.93	6.97
Gustavo A. Madero	6,443	502.57	7.07
Iztacalco	4,294	951.05	4.71
Iztapalapa	8,071	532.74	8.86
Magdalena Contreras	2,420	1,225.94	2.66
Miguel Hidalgo	5,237	1,257.08	5.75
Milpa alta	4,260	6,574.07	4.68
Tláhuac	7,130	3,333.33	7.83
Tlalpan	5,963	1,196.43	6.54
Venustiano Carranza	6,547	1,237.62	7.19
Xochimilco	4,286	1,546.73	4.70
TOTAL	91,110		100.00

Tasa por 100,000 habitantes.

tal de 98 casos, cifra inferior en 99% a la totalidad de casos de las jurisdicciones conurbadas al DF, lo cual significa que la mayoría de los episodios de enfermedades diarreicas suceden como casos aislados, que en su mayoría se atienden en las instituciones de salud.

En lo que respecta al DF, en 1991 no se notificaron brotes de enfermedades diarreicas, sólo casos aislados.

Investigación de padecimientos malignos y congénitos en el Distrito Federal

Con relación a la exposición de agentes tóxicos en el agua, son relativamente pocos los estudios epidemiológicos que se han realizado a nivel internacional, y sumamente escasos en México.

Como ya se señaló previamente, en el DF se hace más acentuada la transición epidemiológica por la que atraviesa el país, ya

TABLA 3.5.10

INCIDENCIA Y PORCENTAJE DE ENFERMEDADES DIARREICAS POR JURISDICCIÓN SANITARIA CONURBADA EN EL ESTADO DE MÉXICO, 1991

Jurisdicción sanitaria	*Casos*	*Tasa (por 100,000 habitantes)*	*%*
Amecameca	14,774	2,281	15.5
Cuautitlán	9,077	1,029	9.5
Ecatepec	14,925	990	15.6
Naucalpan	11,196	1,296	11.7
Nezahualcóyotl	12,661	839	13.2
Tenango	10,360	4,830	10.8
Tlalnepantla	4,931	646	5.2
Xonacatlán	17,631	4,049	18.5
TOTAL	96,304		100

TABLA 3.5.11

JURISDICCIONES SANITARIAS CON MORBILIDAD ALTA POR DIARREAS, 1991

(TASAS POR 100,000 HABITANTES)

Distrito Federal	*Tasa*	*Juridiscciones sanitarias Municipios conurbados del Estado de México*	*Tasa*
Milpa Alta	6,574	Tenango del Valle	4,830
Tláhuac	3,333	Xonacatlán	4,049

que presenta tasas de enfermedades del corazón y de tumores malignos elevadas, sin que por ello dejen de ser importantes las tasas de enfermedades infecciosas intestinales.

El enfoque que la Escuela de Salud Pública de México sigue en la actualidad, para investigar las posibles implicaciones en la salud de los habitantes del DF (derivadas de la exposición a contaminantes químicos ambientales, incluyendo los presentes en el agua que se bebe), consiste en determinar y evaluar la distribución de la mortalidad en niños menores de cinco años en las distintas delegaciones, atribuida al: cáncer mesodérmico, cáncer de hueso, leucemias, linfomas y malformaciones congénitas de tubo neural. Enfermedades todas ellas

TABLA 3.5.12

JURISDICCIONES SANITARIAS CON MORBILIDAD BAJA POR DIARREAS, 1991

(TASAS POR 100,000 HABITANTES)

Distrito Federal		*Jurisdicciones sanitarias*	
	Tasa	*Municipios conurbados del Estado de México*	*Tasa*
Iztapalapa	532.74	Naucalpan	1,296
Azcapotzalco	562.53	Cuautitlán	1,029
Gustavo A. Madero	502.57	Ecatepec	990
		Tlalnepantla	646

consideradas como "eventos centinelas" que ocurren en una población sensible.

Evento centinela se define como alguna enfermedad prevenible, incapacidad o muerte prematura, que al ocurrir sirva como una señal o indicador de los niveles alcanzados por un agente ambiental inductor, que permita iniciar acciones para la prevención oportuna de tales enfermedades.

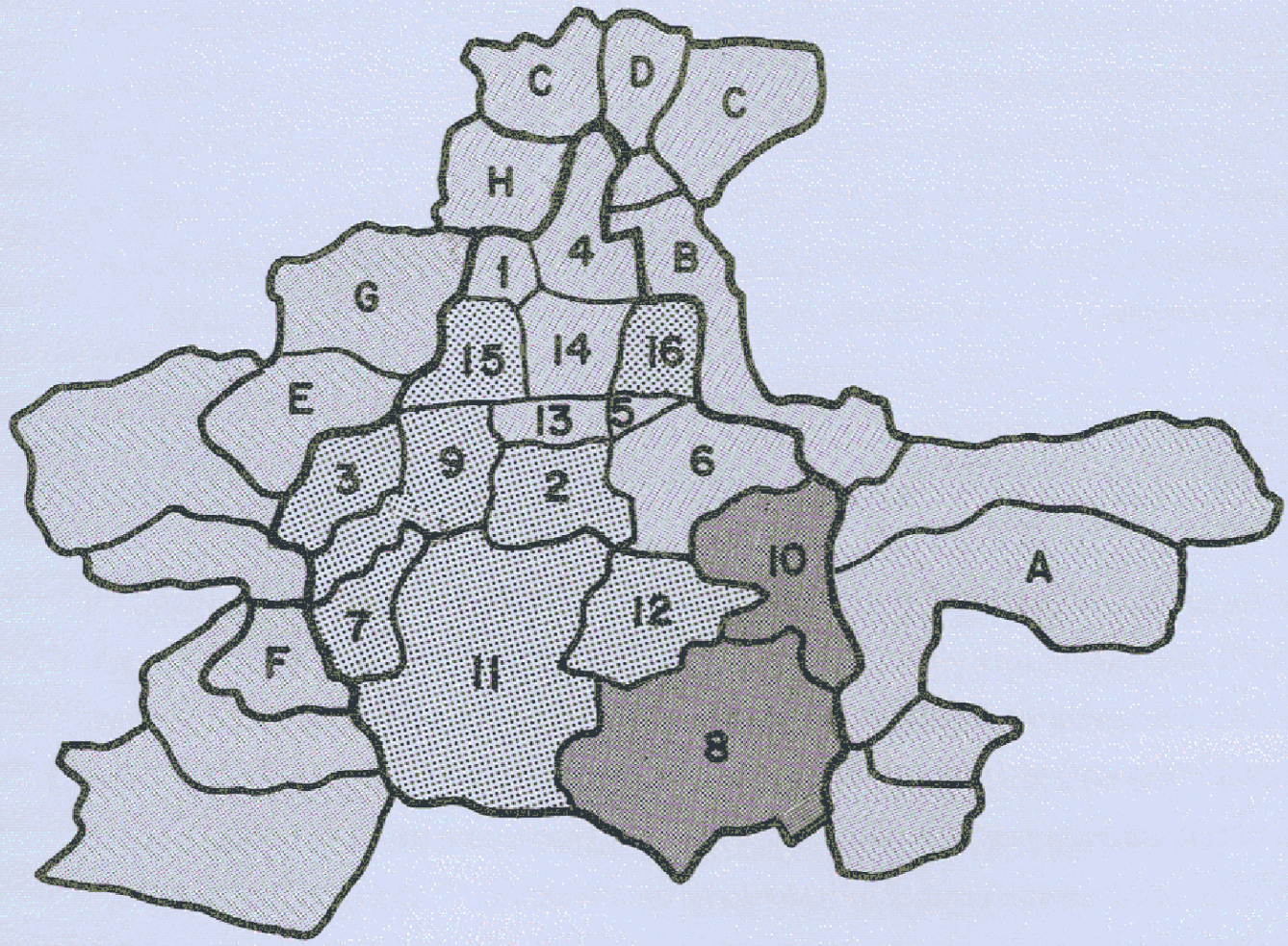
Se trata de un estudio epidemiológico de tipo ecológico, que si bien tiene limitaciones en cuanto a que no determina la exposición a posibles agentes de riesgo ni controla eventos confusores, puede permitir identificar situaciones que requieran ser investigadas más a fondo para prevenir riesgos.

La base del estudio es el análisis de los listados de certificados de defunción, que permite construir una base de datos de mortalidad, para cada uno de los padecimientos arriba mencionados, durante la década de 1980 a 1990, en cada una de las delegaciones que conforman el DF. Para ello se utilizan las muertes identificadas como numerador y la población de cada delegación como denominador, para generar tasas específicas por grupo de edad y causa. Se establecen así tanto las tasas anuales como acumuladas y una tasa global para el periodo de diez años estudiado, obteniéndose: tendencias anuales de mortalidad para cada delegación, la mortalidad decenal por causa y delegación, así como la razón de mortalidad por delegación.

Los resultados preliminares del estudio indican que existen diferencias en la distribución de la mortalidad por los padecimientos seleccionados en las diversas delegaciones, identificándose a las delegaciones de Álvaro Obregón, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tlalpan como las que presentan mayores tasas de mortalidad por algunos de esos padecimientos o en las que se observa una tendencia creciente para algunas de esas causas de muerte. Este tipo de estudios destaca la im-

FIGURA 3.5.1

INCIDENCIA DE ENFERMEDADES DIARREICAS, POR JURISDICCIÓN SANITARIA, EN EL VALLE DE MÉXICO (1991)



TASA POR 100 000 HAB.

- 6 001 O MAS
- 3 001 - 6 000
- 500 - 3 000

ESTADO DE MEXICO

A.- AMECAMECA
B.- NEZAHUALCOYOTL
C.- CUAUTITLAN
D.- ECATEPEC
E.- NAUCALPAN
F.- TENANGO
G.- TLANEPLANTLA
H.- XONACATLAN

DISTRITO FEDERAL

1.- AZCAPOTZALCO
2.- COYOACAN
3.- CUAJIMALPA
4.- GUSTAVO A. MADERO
5.- IZTACALCO
6.- IZTAPALAPA
7.- CONTRERAS
8.- MILPA ALTA
9.- ALVARO OBREGON
10.- TLAHUAC
11.- TLALPAN
12.- XOCHIMILCO
13.- BENITO JUAREZ
14.- CUAUHTEMOC
15.- MIGUEL HIDALGO
16.- VENUSTIANO CARRANZA

TABLA 3.5.13

MORTALIDAD Y PORCENTAJE DE ENFERMEDADES DIARREICAS, POR JURISDICCIÓN SANITARIA, EN EL DISTRITO FEDERAL, 1991

Jurisdicción sanitaria	*Defunción*	*Tasa*	*%*
Álvaro Obregón	60	8.99	8.06
Azcapozalco	37	7.76	4.97
Benito Juárez	31	7.53	4.17
Coyoacán	43	6.67	5.78
Cuajimalpa	17	13.81	2.28
Cuauhtémoc	44	7.27	5.91
Gustavo A. Madero	111	8.66	14.92
Iztacalco	37	8.19	4.97
Iztapalapa	149	9.83	20.03
Magdalena Contreras	17	8.61	2.28
Miguel Hidalgo	39	9.36	5.24
Milpa Alta	15	23.15	2.02
Tláhuac	22	10.29	2.96
Tlalpan	42	8.43	5.65
Venustiano Carranza	49	9.26	6.59
Xochimilco	31	11.19	4.17
TOTAL	744		100.00

* Tasa por 100,000 habitantes.

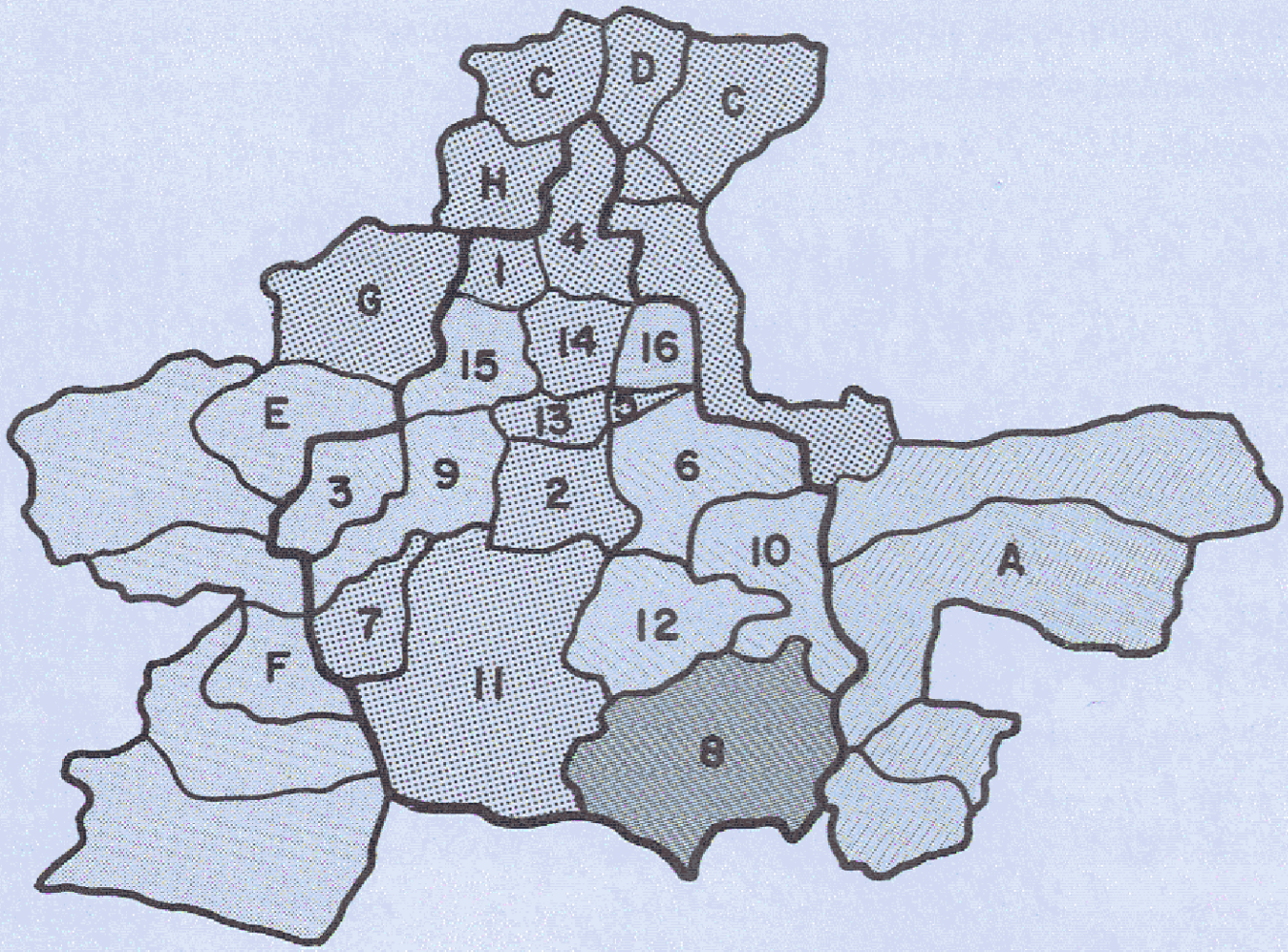
portancia de identificar, evaluar y controlar los posibles agentes de riesgo involucrados.

3.6. DISCUSIÓN

La contaminación de los acuíferos con residuos químicos provenientes de las actividades antropogénicas, agrícolas, industriales y de servicios, en diversos países del mundo, se identifica como uno de los problemas ambientales más importantes (*La salud ambiental y la gestión de los recursos de agua dulce en las Américas*, 1992). En Estados Unidos, por ejemplo, se reconoce que una cantidad importante de los acuíferos han resultado afectados por la disposición final inadecuada de residuos industriales peligrosos. Esto condujo a establecer una lista nacional prioritaria (NPL) de sitios abandonados que requieren ser evaluados y a crear

FIGURA 3.5.2

MORTALIDAD POR ENFERMEDADES DIARREICAS, POR JURISDICCIÓN SANITARIA, EN EL VALLE DE MÉXICO (1991)



TASA POR 100 000 HAB.

42.77 - 62.18

23.34 - 42.76

3.91 - 23.33

ESTADO DE MEXICO

A.- AMECAMECA
B.- NEZAHUALCOYOTL
C.- CUAUTITLAN
D.- ECATEPEC
E.- NAUCALPAN
F.- TENANGO
G.- TLANEPANTLA
H.- XONACATLAN

DISTRITO FEDERAL

1.- AZCAPOTZALCO
2.- COYOACAN
3.- CUAJIMALPA
4.- GUSTAVO A. MADERO
5.- IZTACALCO
6.- IZTAPALAPA
7.- CONTRERAS
8.- MILPA ALTA
9.- ALVARO OBREGON
10.- TLAHUAC
11.- TLALPAN
12.- XOCHIMILCO
13.- BENITO JUAREZ
14.- CUAUHTEMOC
15.- MIGUEL HIDALGO
16.- VENUSTIANO CARRANZA

un fondo para su rehabilitación [The Conservation Foundation, 1987].

Las experiencias de muchos países han conducido a promover la adopción de un enfoque preventivo y a desarrollar acciones tendientes a proteger los sistemas de agua subterránea, sobre todo en zonas vulnerables, pues la remoción de las sustancias tóxicas en los sitios contaminados es compleja y sumamente costosa, como también lo es la rehabilitación de fuentes de agua contaminadas.

Tales acciones se han adoptado, aun en ausencia de evidencias epidemiológicas sólidas de que la exposición a las sustancias tóxicas en el agua pueda ocasionar efectos adversos en la salud humana, por las posibles implicaciones del consumo continuo de dichas sustancias y en función de la posibilidad de que se desarrollen padecimientos crónicos, severos e irreversibles.

Cabe señalar que la exposición a los contaminantes en el agua puede ocurrir no tan sólo mediante ingestión, sino también por inhalación o a causa de absorción dérmica. Por ello no basta remplazar el agua para consumo humano con el fin de evitar una posible exposición.

Una publicación reciente del Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos de América [National Research Council, 1991] relacionada con problemas de salud pública y residuos peligrosos, ilustra el estado actual del conocimiento en ese país acerca del tema. Se describen a continuación algunos de los hallazgos más relevantes para discutir esa situación en la ZMVM.

Uno de los incidentes más conocidos de disposición inadecuada de residuos industriales peligrosos, es el ocurrido en Love Canal, New York, cuando se inundan los sótanos de casas de agua contaminada con sustancias químicas de tipo orgánico como el benceno.

Los residentes del área se vieron expuestos a ellos vía inhalación. Se tuvo que reubicar la comunidad afectada y rehabilitar el lugar con costos sumamente elevados. Las investigaciones epidemiológicas realizadas a la fecha en los individuos expuestos no han mostrado incrementos significativos en nin-

TABLA 3.5.14

JURISDICCIONES SANITARIAS CON MORTALIDAD ALTA POR DIARREAS

(TASA POR 100,000 HABITANTES)

Distrito Federal	*Tasa*	*Jurisdicciones sanitarias Municipios conurbados del Estado de México*	*Tasa*
Milpa Alta	23.15	Xonacatlán	25.72
Cuajimalpa	13.81	Amecameca	27.2

Tabulaciones de defunciones. SPP-INEGI, 1991b.

TABLA 3.5.15

DISTRIBUCIÓN ETARIA DE LAS MUERTES POR DIARREA

Edad	*Distrito Federal*	*Municipios conurbados del Estado de México*
< Un año	47%	65%
> 65 años	30%	14%

guna forma de cáncer, aunque en los hijos de las madres expuestas se ha evidenciado bajo peso al nacer [Ortiz *et al.*, 1987; Janerich *et al.*, 1981; Vianna y Polan *et al.*, 1984].

Un estudio epidemiológico, realizado a nivel nacional, se basó en la NPL y en los datos de mortalidad causada por 13 de los tipos más importantes de cáncer, para evaluar el posible impacto de la contaminación de agua subterránea –utilizada como única fuente de agua potable– detectada en 339 condados de 49 estados, en los que se identificaron 593 sitios de disposición final de residuos peligrosos. Los resultados mostraron una correlación significativa entre el exceso de muertes en todos los condados con sitios contaminados de residuos peligrosos, y casos de cáncer pulmonar, de vejiga, esófago, estómago, intestino grueso y recto, en hombres blancos; casos de cáncer pulmonar, de mama, vejiga, estómago, intestino grueso y recto en mujeres blancas, con respecto a condados sin sitios de disposición final inadecuada de residuos peligrosos [Griffith *et al.*, 1989].

Estudios efectuados en Nueva Jersey, donde existe un gran número de sitios en los que se vertieron residuos industriales peligrosos, han mostrado una elevación –a nivel de condado– de diversos tipos de cáncer gastrointestinal [Najem *et al.*, 1983], y de mama [Najem y Geer, 1985], relacionada con la residencia próxima a tales sitios. A nivel municipal se observaron asociaciones positivas con cáncer de estómago, colon y recto [Najem G., Louria D. *et al.*, 1985]. En ninguno de los casos se determinó la posible vía de exposición ni se tomaron en consideración factores confusores.

También en Nueva Jersey, se realizó un estudio epidemiológico con el objetivo de determinar posibles vínculos entre la contaminación de las fuentes de abastecimiento público de agua para consumo humano con compuestos orgánicos volátiles –tricloroetileno, tetracloroetileno, 1,1,1-tricloroetano y solventes clorados relacionados– desechados inadecuadamente y la incidencia de leucemia; se encontró un exceso de casos sólo en mujeres en las poblaciones con mayor exposición [Fagliano *et al.*, 1990].

La investigación de efectos en la salud por consumo de agua de pozo contaminada

con tricloroetileno, tetracloroetileno y cloroformo en Woburn, Massachusetts [Lagakos *et al.*, 1986], identificó una relación positiva con la incidencia de leucemia infantil. Esa ciudad inició su industrialización hace más de 130 años por ello no ha sido posible la identificación de las fuentes de contaminación. La clausura de los pozos y la eliminación de la exposición, se han visto acompañadas por una disminución en los casos de leucemia; sin embargo, no se puede excluir la existencia de otros factores causales del agrupamiento de casos o que éstos hayan ocurrido como eventos azarosos. Además, en este estudio se observó una asociación positiva entre el acceso al agua de los pozos contaminados y la elevación en las muertes perinatales, malformaciones congénitas del sistema nervioso central, paladar hendido y anomalías del oído, así como de dos de nueve categorías de padecimientos infantiles, infecciones renales y tracto urinario, y afecciones del tracto respiratorio. Sin embargo, a este último estudio se le han señalado diversas limitaciones.

La evaluación de mapas de cáncer por condado, realizada por el Instituto Nacional de Cáncer en el periodo 1950-1979, mostró áreas de mortalidad elevada por cáncer de vejiga, en varios de los condados del noroeste de Illinois. Como consecuencia se realizó un estudio de la incidencia de cáncer de vejiga entre 1978 y 1985 en esos condados. Se encontró un agrupamiento de casos en hombres y mujeres en el condado de Winnebago; previamente en éste se había identificado un alto riesgo de contaminación del agua subterránea por la disposición final, durante los últimos 100 años, de desechos sólidos y líquidos en zonas de abastecimiento de agua [Mallin, 1990]. Se encontró que, de los cuatro pozos destinados a este propósito, uno se había clausurado por contaminación, y dos se encontraban a menos de media milla de un tiradero que dejó de operar en 1970. Los análisis de estos dos últimos pozos mostraron trazas de tricloroetileno, tetracloroetileno y otros solventes.

Concentraciones elevadas de nitratos en agua subterránea (> 15 mg/l) y, probablemente, de fenoles bromados provenientes de actividades de preservación de madera, se han relacionado con agrupamientos de casos de defectos del sistema nervioso central en hijos de mujeres expuestas por ingesta de agua [Dorsh *et al.*, 1984].

En el condado de Santa Clara, California, se descubrió un pozo contaminado con desechos de solventes —1,1,1-tri cloroetano o metil cloroformo— que se fugaron de un tanque subterráneo de almacenamiento en una planta de semiconductores [Swan *et al.*, 1989]. Tal hallazgo condujo a realizar dos estudios acerca de posibles implicaciones para la salud de la población expuesta. En el primero, a pesar de que se identificó un agrupamiento de casos de niños con anomalías cardíacas importantes, no se pudo relacionar con el suceso, pues la fuga del tanque ocurrió posteriormente al tercer mes de gestación, en cuya

etapa debieron producirse las anomalías [Swan *et al.*, 1989]. Sin embargo, al comparar a las poblaciones que consumieron el agua del pozo contaminado con otras no expuestas, se identificó un agrupamiento de abortos espontáneos, bajo peso al nacer y anomalías congénitas [Deane *et al.*, 1989].

Se notificaron relaciones entre anomalías cardíacas congénitas y la contaminación del agua subterránea en el valle de Tucson, Arizona [Goldberg *et al.*, 1990]. Tal asociación parece ser debida a la contaminación del agua con tricloroetileno y, en menor grado, con dicloroetileno y cromo. Estudios en animales de experimentación –ratas y pollos [Dawson *et al.*, 1990; Loeber *et al.*, 1988]– expuestos de manera controlada a tricloroetileno, realizados al descubrirse el desarrollo de diversos defectos cardíacos, apuntan en la misma dirección. La posibilidad de medir los metabolitos del tricloroetileno en seres humanos expuestos, constituye un método para identificar y proteger poblaciones en riesgo [National Research Council, 1991].

La exposición de pobladores de Galena, Kansas, vecinos de uno de los sitios abandonados en los que –entre otros posibles contaminantes del agua para consumo– se han encontrado residuos peligrosos, plomo y cromo hexavalente, ha tenido como consecuencia una elevación significativa en la frecuencia de ciertas causas de muerte y enfermedad (padecimientos del riñón y corazón, y anemia) en personas mayores de 44 años [Neuberger *et al.*, 1990].

La desinfección del agua mediante cloración, en áreas donde el contenido de materia orgánica en el agua es alto, se ha relacionado con la formación de trihalometanos (THM), así como con una elevación en la incidencia de tumores malignos en vejiga, en personas expuestas durante por lo menos 40 años [Cantor *et al.*, 1987]. La frecuencia de cáncer de vejiga en mujeres y no-fumadores de ambos sexos, que por 60 años o más consumieron el agua superficial clorada, fue tres veces superior a la de individuos que no consumieron agua superficial tratada. En este estudio se resalta la importancia de determinar, con la mayor precisión posible, la ingesta diaria de agua.

En la región de Gassim, Arabia Saudita, se encontró una relación entre una elevación en el cáncer esofágico y la contaminación por hidrocarburos del agua para consumo humano. Las pruebas de mutagenicidad realizadas a muestras de agua –mediante pruebas bacterianas– mostraron una actividad mutagénica significativa en dos tercios de las muestras. También se observó que, con respecto a los de otras industrias, en los trabajadores de las industrias petrolera y petroquímica de la región incidía con una frecuencia tres veces mayor el cáncer esofágico, que en los de otras industrias. Los autores atribuyeron a la contaminación del agua y a la malnutrición, el desarrollo del cáncer esofágico en esa región [Mallin 1990; Amer *et al.*, 1990].

En Taiwan, al consumo de agua subterránea contaminada con arsénico se le ha vinculado con una elevada mortalidad por

cáncer de vejiga, renal, en la piel, pulmonar, hepático y en el colon, aunque no se excluye que otros factores —como la presencia de ácido húmico— puedan estar involucrados [Chen *et al.*, 1985 y 1990]. En México, en la Comarca Lagunera, en los estados de Coahuila y Durango, también se ha relacionado este consumo con el desarrollo de cáncer en la piel [Cebrián *et al.*, 1983].

La identificación de zonas en la ZMVM —como en la de transición o en los sitios de la zona lacustre donde existen fracturas— en las cuales puede haber infiltración de contaminantes químicos, ponen en evidencia la vulnerabilidad del acuífero del que se extrae el agua que permite cubrir más de dos terceras partes del suministro actual. Tal vulnerabilidad se acrecienta al reconocer que en esas zonas de posible infiltración se desarrollan actividades o procesos que pueden provocar la contaminación del acuífero con sustancias tóxicas; tal es el caso de la descarga de aguas residuales industriales, fugas de conductos, tanques de almacenamiento de hidrocarburos, derrames de solventes, lixiviación en tiraderos de basura, así como de organismos patógenos por la eliminación inadecuada de aguas de desecho doméstico. Así lo indican los diversos estudios caso, incluídos en este capítulo.

En lo que se refiere a la contaminación del agua por organismos patógenos, existen amplias evidencias de la vulnerabilidad de los sistemas de distribución y almacenamiento del agua potable. Un atenuante en este caso es que las soluciones, a pesar de ser costosas en algunos casos o de requerir cambios profundos en la actitud de la población hacia el agua, se encuentran más al alcance que en el caso de la contaminación química.

A ese respecto, la distribución no uniforme de las enfermedades diarreicas en las distintas delegaciones del DF y en los municipios del Estado de México, conurbados a la ZMVM, también refleja problemas que requieren una atención particular.

Indudablemente es posible disminuir la mortalidad por diarreas, mediante el empleo de los sobres de rehidratación oral; no obstante que no ha tenido la penetración debida, es uno de los factores que más han contribuido a hacer descender las tasas de mortalidad por estos padecimientos; sin embargo, al no eliminarse los factores causales, la repetición de episodios diarreicos y la necesidad de utilización de medicamentos, propician que la salud y el estado nutricional de los niños afectados sean precarios.

En un estudio reciente, publicado por el Banco Mundial [Margulis *et al.*, 1992], se realizó una estimación del costo del daño ambiental en la ZMVM ocasionado por problemas diversos, incluyendo la sobreexplotación del acuífero y la posible contaminación del agua de consumo. Se trata de un ensayo en el que de manera basta se intenta calcular costos para orientar a los tomadores de decisiones y mostrar formas de abordar los problemas ambientales a partir de consideraciones económicas.

En él se hace referencia a los costos (posiblemente considerables) por daños a la infraestructura –redes de agua y drenaje, estructuras de edificios, cables de electricidad– causados por el hundimiento del terreno y agravados por los terremotos; costos que, sin embargo, no se han calculado adecuadamente.

Costos de otro tipo, que menciona el estudio citado, son los relativos al agua a largo plazo en la ZMVM, que requieren diferenciar los costos sociales marginales y los privados, ya que la subestimación del valor del agua por razones sociales ha causado el que las condiciones externas a su uso, como la generación y eliminación sin tratamiento de aguas residuales, no sean abordadas adecuadamente.

Los posibles impactos en la salud: contaminación del agua y de alimentos por el uso de aguas residuales sin tratar en la irrigación de cultivos, se abordan desde la perspectiva de las enfermedades gastrointestinales, principalmente diarreas. Por el problema que representa distinguir entre los múltiples factores y fuentes de exposición a los organismos patógenos que las ocasionan, el estudio de costos se centró en el efecto en la salud –las diarreas– más que en los problemas ambientales que las originan.

Los costos de la mortalidad por diarrea se estimaron cercanos a 3.6 mil millones de dólares, por pérdida de esperanza de vida. Se consideró que la terapia de re-hidratación oral es la principal herramienta para mitigar dicha mortalidad a un costo relativamente bajo (aproximadamente un dólar por paciente, más gastos de administración y el costo de la medicación).

En lo que se refiere a la morbilidad por diarreas, y considerando los costos siguientes: a) tratamiento médico de todos los casos, b) aplicación de la rehidratación oral al 50% del total, y c) la necesidad de realizar análisis de laboratorio en 5% de los casos, el costo total por atender los casos ocurridos en niños menores de 14 años y adultos mayores de 65 (los más frecuentes), equivale a 20 millones de dólares. Para los otros grupos de edad, se calculó un costo total del tratamiento en 8.5 millones de dólares, lo cual representa un costo total general de 30 millones de dólares.

Por las limitaciones de datos con que se partió, este estudio constituye sólo un ejemplo de la aplicación de una metodología para poder atribuir un costo al impacto ambiental y resaltar la necesidad de generar los elementos de información que permitan aplicarla para presupuestar la reparación de los daños inflingidos al acuífero si no se impide su deterioro. Esto último, es de particular interés en el caso de la posible contaminación con sustancias tóxicas.

3.7. Conclusiones

1. En la ZMVM existen zonas vulnerables, de acuerdo a sus caractertísticas geológica-geohidrológicas, algunas en mayor grado que otras, en las que puede presentarse

factibilidad de infiltración hacia el acuífero: en la zona de transición o principal zona montañosa de recarga, compuesta principalmente por rocas basálticas fracturadas y piroclastos del mismo origen; así como en la zona lacustre donde se han formado fracturamientos provocados por la sobreexplotación de los basaltos.

2. La presencia de elementos provenientes de fuentes naturales como el hierro, el manganeso, los compuestos de azufre y la mineralización del agua del acuífero, en general como resultado, entre otras causas, del cambio en los patrones de extracción, crean zonas críticas en las que la calidad del agua es inferior a la prescrita por la norma sanitaria.
3. Se han identificado diversas actividades y procesos que constituyen fuentes potenciales de contaminación del acuífero por sustancias tóxicas tanto inorgánicas como orgánicas: basureros, redes de drenaje dañadas, sitios de descargas de aguas residuales industriales, fugas de hidrocarburos, derrames de solventes, eliminación de desechos domésticos en fosas sépticas y barrancas.
4. Diversos estudios alertan sobre la posibilidad de migración de sustancias tóxicas hacia el acuífero en diferentes áreas a través del acuitardo y la zona lacustre consideradas previamente como impermeables. Este tipo de estudios no seleccionaron las áreas más representativas por su posible vulnerabilidad, como algunas de la zona de transición, que constituye la zona de mayor vulnerabilidad.
5. La vulnerabilidad del sistema de distribución y almacenamiento de agua potable, ha sido puesta en evidencia mediante estudios que indican la presencia de organismos patógenos en muestras de agua de tomas domiciliarias, tinacos y piscinas, así como por la interrupción temporal del suministro o por las fisuras en los conductos de agua, que pueden ser el origen de tales anomalías.
6. A pesar de su disminución continua, las enfermedades diarreicas en la ZMVM siguen siendo un problema de salud pública que requiere atención prioritaria.
7. El incremento en los últimos diez años de padecimientos malignos o congénitos —usualmente raros— en la población infantil de algunas zonas de la ciudad, llama la atención pues es posible que se trate de un problema de contaminación, tanto de agua como de aire, que puede estar influyendo en su desarrollo.

3.8. Recomendaciones

3.8.1. Políticas

1. Tomando en cuenta los diferentes aspectos a los que se ha hecho referencia, deben establecerse programas de manejo integral de los recursos hídricos en la ZMVM.
2. Con base en el principio de cautela, y dado que es más costoso remediar que prevenir, para evitar riesgos de contaminación es

preciso desarrollar acciones tendientes a proteger las zonas más vulnerables del acuífero; por tal razón, éstas se deben identificar con mayor precisión y establecer programas para planear los asentamientos humanos en ellas, así como la instalación de actividades industriales o de otra índole. En su caso, se debe considerar la posibilidad de reubicar asentamientos o actividades riesgosas, que actualmente existan en esas zonas.

3. Es urgente detener el crecimiento de la mancha urbana, en particular hacia las zonas vulnerables y en las que sea costoso y difícil proporcionar agua y drenaje.
4. Para decidir opciones de gestión se requiere emplear las consideraciones de costo–beneficio y de costo–efectividad, basadas en el análisis y jerarquización de riesgos para el ambiente y la salud, esto implica desarrollar dicha actividad y generar los datos para su aplicación.

3.8.2. Medidas de gestión para la prevención y control de la contaminación

1. Debe completarse e implementarse el marco normativo sanitario que posibilite la prevención de riesgos de contaminación del acuífero y del sistema de abastecimiento de agua, así como de afectación de la salud de los consumidores.
2. Es indispensable inducir el tratamiento de todas las aguas residuales de la industria y de servicios cuyas descargas sin tratamiento pongan en peligro al acuífero.
3. Se debe fortalecer el programa de mantenimiento y monitoreo de ductos y tanques subterráneos de almacenamiento de hidrocarburos.
4. A las poblaciones carentes de infraestructura de agua y drenaje debe dotárseles de ella, sobre todo a aquellas comunidades asentadas en zonas vulnerables.
5. Para identificar y controlar la posible migración de lixiviados hacia el acuífero, los basureros ubicados en las zonas vulnerables deben contar con programas de monitoreo adecuado y estar dotados de la infraestructura necesaria para extraer los lixiviados y darles el tratamiento adecuado.
6. Es indispensable controlar el proceso de generación de desechos peligrosos, tanto municipales como industriales y acelerar la instalación de plantas para tratamiento, reciclaje, estabilización y disposición final ambientalmente adecuada.
7. Se requiere que las plantas de tratamiento de aguas residuales cuenten con los módulos necesarios para el tratamiento de los lodos posteriores a su uso, los cuales tienen un alto contenido de sustancias tóxicas.
8. En las zonas donde se ha agudizado el problema de mineralización del agua, se debe vigilar y reducir la extracción de ésta.

3.8.3. Monitoreo

1. Se requiere sistematizar el monitoreo de metales pesados y compuestos orgánicos,

en particular en las zonas vulnerables, así como crear una base de datos computarizada y un sistema de información accesible, acerca de los resultados del monitoreo. Éste debe comprender los pozos de extracción de agua para consumo humano.
2. En las zonas problemáticas el monitoreo del agua para consumo humano en la toma domiciliaria debe incluir la evaluación de patógenos y de sustancias tóxicas apropiada a las circunstancias y, en su caso, la búsqueda de la fuente de contaminación.
3. Se debe poner especial énfasis en la vigilancia sanitaria de los pozos de empresas que preparan bebidas embotelladas y de las piscinas públicas.
4. Se ha de ampliar la participación comunitaria en el cuidado y en la vigilancia de la calidad del agua, en particular en zonas con problemas.

3.8.4. Evaluación y prevención de riesgos para la salud

1. Se requiere intensificar la promoción del uso de los sobres para la rehidratación oral y las campañas de educación comunitaria para combatir las diarreas.
2. Es indispensable desarrollar estudios sobre as muertes por padecimientos crónicos en niños, cuya distribución sea anormalmente alta en las delegaciones del DF y extender el estudio a los municipios conurbados.
3. En los programas de formación médica se debe impulsar la inclusión de materias relativas a los efectos del ambiente en general y de las sustancias tóxicas en particular, en la salud de la población, así como los programas de formación de especialistas en evaluación de riesgos para la salud.
4. Para identificar y prevenir riesgos se requiere promover estudios de monitoreo biológico de poblaciones en peligro por exposición a sustancias tóxicas.
5. Es necesario extender el empleo de metodologías de evaluación de los efectos adversos a la salud, de la jerarquización de riesgos y de toma de decisiones para su control.

3.8.5. Investigación y desarrollo tecnológico

1. Aprovechando la experiencia de los distintos grupos de investigación, que han realizado estudios para evaluar la posible migración de contaminantes hacia el acuífero, es deseable establecer programas de investigación centrados en el estudio de la situación de algunas áreas de la zona de transición en las que se hayan identificado actividades o procesos que representan riesgos de contaminación del acuífero.
2. Se debe promover y apoyar la creación de centros de asesoría en tecnologías para la reducción de la generación de desechos en la fuente y para su tratamiento y estabilización, con énfasis en los residuos industriales peligrosos.
3. Para desarrollar un sistema de información que permita evaluar y, en su caso, corregir

las medidas de gestión para protección y prevención de riesgos, es importante investigar, seleccionar y establecer indicadores del estado del acuífero, del sistema de distribución de agua y de la salud de los consumidores.

3.8.6. Educación y divulgación de información

1. Los programas de estudios de las diversas licenciaturas que directa o indirectamente incidan sobre los temas aludidos, deben incorporar los conocimientos para que los profesionales que de ellas surjan participen eficientemente en la evaluación y solución de problemas ambientales.
2. Para lograr mayor éxito en sus egresados, las especialidades y posgrados en materias afines, deben adoptar enfoques multidisciplinarios y abordar los problemas de manera global.
3. Es preciso recopilar, hacer accesible y difundir la información que haya surgido y se esté generando sobre el tema.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Bendek, E. y Vázquez-Camargo, R., "Agua y salud en el Caribe colombiano", en *Unimetro*, 5(9), 1989, pp. 58-69.

Alberro J., "Algunos efectos de las filtraciones en la estabilidad de las masas rocosas. Primera Conferencia Magistral R.J. Marsal", *Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, A.C.*, 22-24 de septiembre, México, 1993.

American Petroleum Institute, "The migration of petroleum products in soil and ground water", en *Engineering and Technical Research Committee*, Washington, 1972.

Bellia, S., Cusimano, G., González, M.T., Rodríguez, R.C. y Giunta, G., "El Valle de México. Consideraciones preliminares sobre los riesgos geológicos y análisis hidrogeológico de la cuenca de Chalco", en Cuaderno IILA (Serie Scienza, 4), Instituto Italo-Latino Americano, Roma, 1992.

Carrada-Bravo, T., "La lucha contra enfermedades diarreicas", en *Revista Mexicana de Pediatría*, 53(5), 1986, pp. 161-165.

Cech, I. y Essman, A., "Water sanitation practices along the U.S. Mexico border. Implication for physicians on both sides", en *Southern Medical Journal*, 85(11), EUA, 1992, pp. 1053-1064.

CONAPO, *Proyecciones de población 1980-2010*, México.

Cortés, A., Arizabalo, R.D. y Rocha, R., "Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la cuenca de México", en *Geofísica Internacional*, 28(2), 1989, pp. 265-282.

Cortés, A., Jaimes L.R. y Farvolden, R.N., "Hidrología isotópica de la influencia de una tormenta en la descarga natural del agua en la sierra de Montealto", en *Geofísica Internacional*, 28(2), 1989, México, pp. 435-449.

Correa, A., *Suministro de agua potable en el Distrito Federal*, DGCOH-Secretaría General de Obras del DDF, México, 1992.

Craun, G.F., "Epidemiologic studies of organic micropollutans in drinking water", en *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, parte A (Water Pollution), Springer-Verlag, Alemania, 1991, p. 264.

Cherry, J.A., "Hydrogeologic contaminant behavior in fractured and unfractured clayey deposits in Canada", en Proc. del International Symposium on Contaminant Transport in Ground Water, Stuttgart, Alemania, 1989, pp 11.

D'Astous, A.Y., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Cherry, J.A. y Gillham, R.W., "Fracture effects in the shallow ground water zone in weathered Sarnia-area clay", en *Canadian Geotechnical Journal*, núm. 26, 1989, pp. 43-56.

DDF, *Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*, vols. I-IV, Talleres Gráficos de la Nación, México, 1975.

DDF, *Distribución de pozos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, México, 1991.

DDF, *Compendio DGCOH*, México, 1992.

DDF-DGCOH, *El sistema hidráulico del Distrito Federal*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México, 1982.

DDF-DGCOH, *El sistema de drenaje profundo de la ciudad de México*, Secretaría General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 2a. ed., México, 1990.

DGCOH-LESSER y Asociados, S.A. de C.V., *Perfiles de suelo para determinar el movimiento de contaminantes al agua subterránea*, 1993.

DDF y Gobierno del Estado de México, *Estrategia metropolitana para el sistema hidráulico del Valle de México*, México, 1989.

Durazo, J. y Farvolden, R.N., "The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations", en *Journal of Hydrology*, núm. 112, 1989, pp. 171-190.

Everett, G.L., "Guidelines and methodology for developing and implementing a ground water quality monitoring program", en *Genium Publishing Corp*, 1984.

González-Morán, T., "Estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco. Evaluación del impacto ambiental del basurero de Santa Catarina", tesis doctoral, UNAM, Colegio de Ciencias y Humanidades, México, 1992.

González-Morán, T. y Rodríguez, R., "Monitoreo geofísico en el entorno de un basurero industrial de desechos de cromo", en *Geofísica Internacional*, 28(2), México, 1989, pp. 409-416.

Grisak, G.E. y Cherry, J.A., "Hydrologic characteristics and response in fractured till and clay confining a shallow aquifer", en *Canadian Geotechnical Journal*, 12(23), 1975, pp. 23-43.

Gutiérrez-Ruiz, M., Bocco, G. y Castillo-Blum S., "Contaminación por cromo en el norte de la ciudad de México. Un enfoque interdisciplinario", en *Boletín del Instituto de Geografía*, núm. 16, UNAM, México, 1986.

Herrera, I., Medina, R., Carrillo, J. y Vázquez, E., *Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras*, DGCOH, DDF, Contrato 3-33-1-0689, (2 tomos) UNAM, Instituto de Geofísica, 1994.

Hiriart, F. y Marsal, R.J., "El hundimiento de la ciudad de México", en *El hundimiento de la ciudad de México. Proyecto Texcoco. Volumen Nabor Carrillo*, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 1969, México, pp. 109-147.

Islas, M,P. y Mazari, H.M., "Industria eléctrica-electrónica en la zona metropolitana de la ciudad de México: un análisis ambiental", en *Memorias, IX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambien-*

tal, A.C., 11 al 16 de octubre, México, 1993.

Keller, C.K., Van der Kamp, G. y Cherry, J. A., "Fracture, permeability and groundwater flow in clayey till near Saskatoon, Saskatchewan", en *Canadian Geotechnical Journal*, núm. 23, 1986, pp. 229-240.

Lesser-Illades, J.M., Sánchez-Díaz, F. y González-Posadas, D., "Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México", en *Ingeniería Hidráulica en México*, I(5), México, 1990, pp. 52-60.

Lesser y Asociados S.A. de C.V., "Recarga artificial del agua residual tratada al acuífero del Valle de México", en *Ingeniería Hidráulica en México*, 6(2), 1991a, pp. 65-70.

——, Interacción de zonas contaminadas por fugas de tanques almacenadores de gasolinas, DGCOH, Contrato 1-33-0693, 1991b.

Lugo-Hubb, J., Pérez, A. y Rojas-Salas, M., "Formación de grietas en el margen del antiguo lago al oriente de la cuenca de México", en *Geofísica Internacional*, 30(2), México, 1991, pp. 87-96.

Mackay, D.M. y Smith, L.A., *Organic Contaminants* en "Regional groundwater quality", Alley W. (ed.), *Van Nostrand Reinhold: New York*, 1993.

Mackay, D.M. y Cherry, J. A., "Groundwater contamination: pump-and-treat remediation", en *Environmental Science Technology*, 23(6), 1989, pp. 630-636.

Marsal, R.J. y Mazari, M., "El subsuelo de la ciudad de México", del Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2a. ed., México, 1969.

Mazari, H. M., "Potential groundwater contamination by organic compounds in the Mexico City Metropolitan Area", tesis de doctorado, *Environmental Science and Engineering*, Universidad de California, Los Ángeles, 1992.

Mazari, H. M. y Mackay, D.M., "Potential for groundwater contamination in Mexico City", en *Environmental Science Technology*, 27(5), 1993, pp. 794-802.

Miranda-Hernández, J.A., "Comportamiento físico y químico del cromo en aguas profundas en el municipio de Tultitlán, Estado de México", tesis de licenciatura, UNAM, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Cuautitlán, México, 1987.

Mooser F. y Molina C., "Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México", en *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra*, 3(1), México, 1983, pp. 68-84.

National Water Well Association (NWWA), "DRASTIC: A standarized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings", Office of Research and Development, U.S., Environmental Protection Agency, Ada, 1985.

Neri, R., González-Cortés, A. y Quiñones, A., "Daños a la salud de los trabajadores de una fábrica de cromatos", en *Salud Pública de México*, 22(1), México, 1980.

Niederberger, B. C., "Paleopaysages et archeologie preurbaine du bassin de Mexico", en *Centre d'études mexicaines et centroaméricaines*, 2 vols., México, 1987.

Ortega, A., Cherry, J.A. y Rudolph, D.L., "Hydrogeology and large scale aquitard consolidation near Mexico City", en *Ground Water*, 31(5), 1993, pp. 708-718.

Ortega, A. y Farvolden, R.N., "Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico", en *Journal of Hydrology*, núm. 110, 1989, pp. 271-294.

Ortiz-Monasterio, F., Cortinas de Nava, C. y Maffey, L., "El manejo de los residuos industriales peligrosos en México", en *Fundación Universo Veintiuno*, México, 1987.

Pankow, J.F., Johnson, R.L., Heweston, J.P. y Cherry, J.A., "An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the Equivalent Porous Medium Model (EPM)", en *Journal of Contaminant Hydrology*, núm. 1, 1986, pp. 65-76.

Pitre, C., "Analysis of Induced Recharge from a Waste Water Canal through Fractured Clays in Mexico City", M. Sc. Earth Science, tesis de maestría, Universidad de Waterloo, Canadá, 1993.

Quadri de la Torre, G., *Aguas residuales de la ZMCM*, Fundación F. Ebert-DDF, México, 1989.

Rifai, H.S. *et al.*, en *Journal Environmental Engineering*, 114(5), 1988, pp. 1007-1029.

Rivera, F., Ortega, A., López-Ochoterena, E. y Paz, M.E., "A quantitative morphological and ecological study of protozoa polluting tap water in Mexico City", en *Trans. Amer. Micros. Soc.*, 98(3), 1979, pp. 465-469.

Rivera, F., Ramírez, P., Vilaclara, G. *et al.*, "A survey of pathogenic and free-living Amoebae inhabiting swimming pool water in Mexico City", en *Environmental Research*, 32, 1983, pp. 205-211.

Rodríguez, R., "Consideraciones preliminares, basadas en resultados geofísicos, so bre la interfase agua mineralizada-agua dulce en el área de Sta. Catarina Yecahuitzol, Distrito Federal, México", en *Geofísica Internacional*, 26(4), México, 1987, pp. 573-583.

Rodríguez, R. y González-Morán, T., "Comportamiento hidrodinámico del acuífero de la subcuenca de Chalco, México", en *Geofísica Internacional*, 28(2), México, 1989, pp. 207-219.

Rothwell, Ch. J., Hamilton, Ch. B. y Leaverton, P.E., "Identification of sentinel health events as indicators of environmental contamination", en *Environmental*

Health Perspectives, 94, 1991, pp. 261-263.

Rudolph, D.L., Cherry, J.A. y Farvolden, R.N., "Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City", en *Water Resources Research*, 27(9), 1991, pp. 2187-2201.

Rudolph D.L., Herrera I. y Yates R., "Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City", en *Geofísica Internacional*, 28(2), México, 1989, pp. 363-408.

Ruiz-Matus, C., Cárdenas-Ayala, V., Koopman, J., Herrera-Bastos, E., Montesano-Castellanos, R. y Hinojosa, M., "Enfermedad diarréica después de los sismos de 1985 en México", en *Salud Pública de México*, 29(5), septiembre-octubre, 1987, pp. 399-405.

Sahab-Hadad, E., "El agua subterránea y la ciudad de México", del simposio: El sistema acuífero de la cuenca de México, organizado por la UNAM y la Universidad de Waterloo, México, 1989.

SARH-CAVM, "Estudio para evitar la contaminación del acuífero del Valle de México", en *Contrato CAVM 85-406*, Instituto de Geofísica, UNAM, Comisión de Aguas del Valle de México de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1988.

SARH-SP, Distrito de control de la contaminación y reuso del agua residual en el Valle de México, en contrato SP-81-C-5, Diseños Hidráulicos y Tecnología Ambienta, S.A., Subsecretaría de Planeación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1983.

SEDESOL-INE, *Informe sobre el equilibrio ecológico y la protección del ambiente*, México, 1991-1992 y 1993.

SPP-INEGI, Área metropolitana de la ciudad de México (AMCM): *Síntesis de Resultados*, del X Censo General de Población y Vivienda, 1990, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Secretaría de Programación y Presupuesto, México, 1991a.

——, *Bases de Datos de Mortalidad. Estados Unidos Mexicanos*, México, 1991b.

SSA-Sistema Nacional de Encuestas de Salud, *Encuesta sobre morbilidad, mortalidad y tratamiento de diarreas*, México, 1988.

Tapia, C.R., Velázquez, M.O. y Ramírez L.G., *Las enfermedades diarréicas en la ciudad de México*, 1993.

Tomassini, P. y López-Ochoterena, E., "Análisis taxonómico de las especies de protozoarios encontrados en el agua potable de la ciudad. de México", en *Revista Latinoamericana de Microbiología*, núm. 21, 1979, pp. 147-151.

U.S. EPA, "Santa Clara Valley Integrated Environmental Management Project, Stage Two Report", Hinman K., *et al.* (eds.), Office of Policy, Planning, and Evaluation. U.S, en *Environmental Protection Agency*, Washington, 1987.

Valdespino-Gómez, J.L., Parrilla-Cerillo, M.C., Sepúlveda-Amor J., Díaz-Ortega, J.L., Camacho-Amor, M.L. y Luna-Jimé-nez, J.L., "Calidad del agua en la ciudad de México en relación a los sismos de septiembre de 1985", en *Salud Pública de México*, 29(5), septiembre-octubre, 1987, pp. 412-20.

Viscaíno, M.F., *La contaminación en México*, FCE, México, 1986.

Williams, R.E. y Farvolden, R.N., "Effects of joints on groundwater movement in till", en *Journal of Hydrology*, núm. 5, 1967, pp. 163-170.

Capítulo 4
Administración de la demanda de agua en la ZMVM
Política de conservación, recuperación de costos y equidad

Resumen

La mayoría de las fuentes de agua de la zona metropolitana del Valle de México se han sobreexplotado desde hace mucho tiempo; esto ha provocado hundimiento significativo, deterioro de la calidad del agua, rápida escalada de costos y acceso inequitativo a ella. Sólo en la ciudad de México, los sectores de suministro y drenaje tienen un *déficit* anual de mil millones de dólares con respecto a la recaudación, debido al subsidio excesivo que al mismo tiempo ha estimulado el consumo excesivo. Aunado a esto, el acceso de la gente de bajos ingresos al suministro confiable de agua de buena calidad es inequitativo y limitado. El financiamiento insuficiente restringe la capacidad del sistema para expander la red a áreas subabastecidas, tratar el agua residual y reparar las fugas del sistema de distribución. La noción de que este recurso es escaso trasciende tan débilmente, que la mayor parte del consumo se mide de manera poco confiable o de plano no se mide; muchas viviendas pagan una cuota fija por el servicio de agua. Por lo tanto, el incremento de la demanda continúa rebasando la provisión sustentable.

Anteriormente, el sector de planificación de este satisfactor se abocó principalmente a estrategias de suministro; empero, este planteamiento ya es inadecuado. Este capítulo argumenta a favor de una noción más amplia de *administración del agua*, en la cual dentro de la reglamentación de su consumo también se atienda el proceso de planificación. Se consideran acciones voluntarias e involuntarias. La reforma más efectiva para reducir la demanda es un esquema de precios y facturación que genere sustancialmente más fondos y a la vez estimule reducciones voluntarias significativas en el consumo. En gran medida, la factibilidad de esta estrategia depende del contexto administrativo y económico dentro del cual se implemente. Se anticipa que la mayoría de

los obstáculos serán de índole institucional y estarán sujetos a los incentivos que encuentren los organismos administrativos.

RESUMEN DE POLÍTICAS RECOMENDADAS

Sinopsis: tanto los costos como el consumo del agua están fuera de control. Por lo tanto, es cuestionable la necesidad de mayor provisión para compensar el crecimiento poblacional y económico.

Casi todas las fuentes de agua de la región están sobreexplotadas, en tanto que las normas de calidad ambiental e hídrica se han tornado más estrictas. En consecuencia, los costos del agua han ascendido dramáticamente. Sólo en el DF los sectores de suministro y drenaje tienen un déficit anual de 1,000 millones de dólares en relación con los ingresos [Banco Mundial, 1992]. Estos costos restringen la capacidad del sistema para expander la red a áreas deficitarias, tratar el agua de desecho y reparar las fugas en el sistema de distribución, estimadas en 30 o 40%. Además, el consumo de agua es artificialmente alto y la recaudación es imprácticamente baja. La noción de que el agua es escasa tiene tan poca trascendencia, que la mayor parte del consumo se mide de manera deficiente o de plano no se mide, por lo que muchas viviendas pagan una cuota fija por el servicio de agua.

Recomendaciones: balancear más la demanda y la provisión, por medio de una noción más amplia de *gestión*, en la que dentro del proceso de planificación se atiendan tanto el suministro como el consumo. El consumo de agua puede en muchos casos reducrise sin detrimento del desarrollo económico de la región, cuando se sustituye el concepto de *conservación* por el de *uso eficiente*. Los medios específicos para el logro de este propósito incluyen: (1) programas: (a) educacionales, (b) de modernización de las tuberías ya existentes, (c) de supervisión para evitar desperdicio de gua y (d) de instalación y mantenimiento de medidores; (2) leyes para evitar el desperdicio; (3) planeación del uso del suelo urbano, así como reestructuración de precios para hacerlo más acordes con los costos.

Consideraciones sobre la implementación: la reforma más efectiva para reducción de la demanda es un esquema de precios y facturación que de manera substancial genere más fondos y significativamente estimule reducciones voluntarias de consumo. En gran medida, la factibilidad de esta estrategia depende del contexto económico y administrativo en el cual se aplique. La importancia fundamental del agua en la vida económica y social del área metropolitana sugiere que, más que científicas, todas las decisiones más importantes acerca de su *status* y su distribución serán de índole política. Por tanto, una evaluación acerca de quién gana y quién pierde ante cualquier cambio que se considere, es indispensable para cualquier estrategia de reforma. Se anticipa que la mayoría de los obstáculos serán de índole institucional, y

dependerán de los incentivos que tengan los organismos administrativos relevantes. La inciativa de privatización en el DF es un ejemplo de intento por cambiar estos incentivos para hacerlos consistentes con la captación de ingresos y con objetivos de mejoramiento del sistema.

Las tarifas como mecanismo de financimiento y de uso eficiente

Las estrategias económicas se basan en una variedad de incentivos e inhibidores monetarios para conscientizar a los consumidores del valor social del agua en sus diferentes usos. La meta es promover mejores prácticas de consumo para la preservación y sustentabilidad del recurso. Una de las claves más fundamentales en la administración de la demanda—central en muchas de las opciones—es el establecer precios realistas. La cuestión de las tarifas se conceptualiza mejor como un instrumento político—de objetivos múltiples—que influya en el consumo, satisfaga metas financieras y logre propósitos ambientales y sociales importantes. Respecto al uso eficiente y sustentable del recurso, es más probable que esto ocurra cuando los servicios de agua sean autosuficientes financieramente y los consumidores paguen aproximadamente el costo verdadero de producción, distribución y mantenimiento de los sistemas.

Recomedaciones: establecer procedimientos confiables y eficientes de lectura de medidores y cobro de adeudos, así como fijar tarifas a un nivel que permita el autofinanciamiento de los servicios de agua. Desarrollar una base de datos de los consumidores —al menos de los principales— con el fin de orientar adecuadamente la política tarifaria.

Inversión en infraestructura para administrar la demanda

Algunos ejemplos de medidas regulatorias o estructurales que reducen la demanda efectiva son la medición, la adecuación para favorecer un menor consumo, el uso de sistemas de desviación para colectar y distribuir agua gris, así como la reparación de fugas. En el pasado, las virtudes de los programas de readecuación se han exagerado. Por otra parte, solamente a 53% de los medidores de la ciudad de México se les toma lectura, pero en muchos casos de manera irregular. Pero frecuentemente el mantenimiento de medidores no es adecuado y el cobro de adeudos es dispar. Esto es un obstáculo inmenso para la determinación de precios con base en el consumo. La sola medición efectiva y regular del agua podría reducir el consumo substancialmente —tal vez un 15 o 20% abajo de los niveles predeterminados—y permitiría detectar más fácilmente las fugas.

Recomedaciones: continuar la modernización de la red de distribución e instalar medidores para todos los usuarios, excepto para los de menores recursos, quienes típicamente no tienen acceso al agua en el interior de sus viviendas. Con este fin se tendrían que insta-

lar varios millones de medidores adicionales, a un costo unitario aproximado de N$ 300. Aunque la inversión correspondiente es considerable, es poco significativa en relación a la requerida para reparación y mejoramiento de la infraestructura; además, si se complementa con la reestructuración tarifaria, contribuiría a capacitar a las jurisdicciones políticas para recuperar —a plenitud y equitativamente— los costos del servicio de agua y drenaje. Aunque la instalación de medidores es un paso necesario, por sí sólo es insuficiente; conjuntamente se debe: (1) extender el servicio a áreas ahora no conectadas al sistema de suministro; (2) establecer un cargo fijo a todos los usuarios, basado en el costo marginal de abastecimiento, y que incluya una *línea de por vida* para cierto volumen de agua; (3) renovar las instalaciones con base en envejecimiento y fallas, (4) actualizar los registros, leer los medidores, preparar los recibos de adeudo, y sancionar a los morosos—para todo esto se necesitará entrenamiento de cuadros con capacidad adecuada—; y (5) reparar rápidamente las fugas, lo cual puede alcanzar tanta importancia como el desarrollo de nuevas fuentes.

Oportunidades y cambios organizacionales

Esta categoría incluye acciones que comprenden la promoción de prácticas tarifarias sanas y de investigación y desarrollo, así como la educación del público, y otras políticas regulatorias, incluido un examen de los beneficios potenciales de la privatización. Ejecutivos, administradores y políticos tienen una función central en, la promoción de mejoras de las políticas de precios, por ejemplo. La educación y la conciencia del público tiene también un papel importante por ejercer sobre la preservación del recurso. Un programa bien diseñado de educación al público puede cambiar los hábitos de consumo de agua de una comunidad y, como consecuencia, lograr un reducción substancial en su demanda.

El interés en la privatización se debe a que se cree que el sector privado tiene, con respecto al sector público, dos ventajas: mejor acceso al capital de inversión en algunas instancias y mayor eficiencia administrativa debida a la motivación pecuniaria. Aún bajo marcos diferentes, la privatización en el sector hídrico tiene precedentes exitosos en Francia y Gran Bretaña. El modelo francés en el cual se basa el sistema del DF, deja la propiedad de la infraestructura en manos del sector público, pero contrata muchas funciones operativas con firmas privadas vía contratos competitivos de corto plazo.

A su vez, los gobiernos tienen dificultad para abordar el asunto de la preservación del agua, pues éste conlleva una fuerte carga política. Debido a que el agua es esencial para la vida, en México mucha gente piensa que las autoridades están obligadas a proporcionarla a la población a bajo costo o nulo.

Recomendaciones: continuar campañas de educación al público, particularmente respec-

to al costo real del agua, predicando y convenciendo a la población de la conveniencia de la preservación, aún *bombardeándola* con mensajes alusivos a ésta. Continuar la búsqueda de oportunidades para involucrar al sector privado en las responsabilidades de administración del agua, especialmente el cobro de adeudos y el mantenimiento de los sistemas.

Capacitación

Uno de los impedimentos principales para mejorar la administración de la demanda de agua es la falta de personal adecuadamente preparado para realizar las tareas necesarias. El énfasis en el pasado fue en la construcción de nuevas obras para suministro, que se reflejaba en la contratación y la promoción de personal competente en ingeniería, pero no en psicología, comunicación social, política pública y economía. La atención preponderante que hasta recientemente se prestó a los aspectos físicos del sistema, dio lugar a que se tratara de manera escasa y muy insuficiente la compilación de información sobre las características de los consumidores, sus hábitos, y las clases de incentivos que tuvieran mayores posibilidades de éxito en la reducción de la demanda.

Recomendaciones: aunque muchas de las funciones de los organismos abastecedores de agua ya se privatizaron, o están programados para hacerlo, todavía las autoridades locales tienen una función muy importante en el establecimiento y la supervisión de las políticas relativas al agua. Por lo tanto se requiere de un esfuerzo concertado para capacitar estas instituciones, particularmente en la contratación y la promoción de profesionales con experiencia en disciplinas de ciencias sociales como psicología, comunicación social, administración pública y economía. A las oficinas encargadas de la preservación y administración de la demanda del agua, se les debe ubicar en una posición jerárquica que les proporcione autoridad real en la toma de decisiones.

Equidad

La calidad de los servicios de agua proporcionados a los diferentes residentes de la ZMVM es muy diversa, y también los volúmenes consumidos. Para algunos, el servicio es fácilmente accesible y a bajo costo; para otros, es incierto o inconveniente. El énfasis en la preservación y en la administración de la demanda no debe soslayar la necesidad de mejorar el servicio que se da a muchos de los residentes más pobres. Las dependencias respectivas necesitarán amplio apoyo público para establecer una reestructuración tarifaria y otras reformas. Para lograrlo es necesario que exista la convicción generalizada de que el servicio se proporciona con equidad. Estudios e investigaciones indican que la población de menores recursos, además de pagar una proporción mayor de su ingreso económico, recibe el peor servicio. La creencia generalizada de que estructuras tarifarias racionales tendrían

fuertes efectos negativos en los sectores de ingresos escasos, carece de base firme y no debería ser impedimento para establecerlas. Sin embargo, se necesitan más estudios para comprender en forma más completa la forma en que expansiones del sistema de distribución y la reestructuración de las tarifas afectarán a la salud y la economía de los más pobres.

Recomendaciones: se deben continuar los esfuerzos para hacer llegar servicios confiables de agua a los segmentos menos afortunados de la población de la ZMVM que no los tienen. En la evaluación de quién se beneficia y quién paga a consecuencia de reformas como la reestructuración tarifaria y la privatización, se ha de conceder atención especial a los impactos sobre este segmento de la población. El agua es un satisfactor básico, esencial para la salud y el bienestar humanos, y debe haber suficiente accesibilidad para satisfacer las necesidades humanas básicas, tanto de la población de altos ingresos como la de bajos.

El incremento de las cuotas que se aplican a grandes usuarios con servicio no medido transferirá algo del peso del costo a los más capaces de afrontarlo, y estimulará las acciones de preservación del agua.

4.1. INTRODUCCIÓN

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se ubican la capital del país y 17 municipios del vecino Estado de México. Como una de las conurbaciones más grandes y de mayor rapidez de crecimiento en el mundo, naturalmente la presión poblacional y del desarrollo han conducido a dificultades en la planeación y en la provisión de muchos servicios públicos, así como a una variedad de problemas ambientales y de recursos, como los señalados en este estudio. Como se indica en otros capítulos, desde hace tiempo el nivel de consumo de agua subterránea ha sido insostenible, y la calidad del agua es un obstáculo creciente.

Hay varios factores que ahora están ayudando a que en México se reconozcan los problemas de calidad del agua y de las limitaciones de abastecimiento en la ZMVM. Por ejemplo, el incremento demográfico es atribuible a algunas de tendencias macroeconómicas y económicas regionales, que en su mayoría están bastante alejadas del control de los planificadores locales del agua. También la planeación de uso del suelo ha desempeñado una función importante en el crecimiento de la región, pero ésta es igualmente difícil de ajustar a corto plazo [Garza, 1987, 1989]. Si bien ahora se están haciendo esfuerzos enérgicos para proteger de invasiones ulteriores las áreas de recarga del acuífero y el espacio abierto remanente en el interior, las acciones destinadas al control de crecimiento en la periferia urbana no se pueden considerar viables en ausencia de otras decisiones restrictivas. Los costos del aumento de abastecimiento de agua están aumentando y serán prohibitivas, en el futuro

previsible —especialmente si se consideran las erogaciones reales de agua y sus transferencias. Finalmente, el crecimiento de la población y la modernización han obligado a reconocer que el costo total del consumo urbano de agua debe incluir el gasto generado por el desarrollo de sistemas de alcantarillado y de plantas tratadoras de aguas residuales.

En este capítulo, el marco del estudio se amplía a incluir tres problemas pocos conocidos pero no menos fundamentales: (1) políticas conservacionistas insuficientes en el sector de planeación hídrica; (2) finanzas endebles, como consecuencia de prácticas tradicionales de tarifas y cobros, y (3) acceso inequitativo y a menudo insuficiente a agua de buena calidad para los grupos de menores recursos, en toda la región. En tanto que la índole de estos problemas, más que técnica tiende a ser conductual, las soluciones propuestas son ortodoxas y factibles; se les puede describir como *administración de la demanda*. Ésta consta de dos componentes centrales: (1) preservación, para mantener disponibilidad de abasto, y (2) recuperación de costos. Es complementaria a soluciones de ingeniería tendientes a aumentar el suministro y asegurar que el consumo del agua disponible sea eficiente y equitativo. No es una reacción a una situación crítica; en vez de eso, es un dispositivo aplicable en toda circunstancia.

Sin embargo, las estrategias de la administración de la demanda pueden ser impopulares porque, al revelar la distribución verdadera de costos y beneficios del actual consumo subsidiado, transparentan el precio real del agua. En consecuencia, las tarifas han continuado muy rezagadas con respecto a los costos, porque los gobiernos locales temen reacciones políticas adversas. Por lo tanto, rara vez se emprenden políticas de administración de la demanda, excepto si la situación se torna amenazante, como lo es ahora en la ZMVM. En el presente capítulo se tratan éstos y otros elementos de una estrategia basada en la administración de la demanda, y se concluye con recomendaciones específicas de instrumentos de política y cuestiones relativas a su ejecución.

No obstante, la reducción del consumo a niveles más manejables no es la única meta a la mano, y para muchas autoridades inherentes no es siquiera una meta. En muchos aspectos un problema más presionante es la débil condición del sistema de finanzas. Históricamente en México, para la mayoría de los usuarios lo común han sido los costos artificialmente bajos y el acceso a cantidades ilimitadas de agua. A través de los años, tales subsidios sirvieron también como política espacial implícita, en el sentido de que las industrias que cosumían gran cantidad de este líquido no tuvieron inconveniente para ubicarse en la ZMVM. De ahí que el consumo sea mucho mayor que en ausencia de subvenciones y que así hayan contribuido a la escasez. Esta situación no es exclusiva de México, puesto que —hasta recientemente— el agua barata había sido el común denominador mun-

dial. Los subsidios substanciales siempre habían sido populares cuando los gobiernos deseaban promover el desarrollo económico local. También se ha defendido a las subvenciones con el argumento de que son políticas contra la pobreza, considerando que la población de menores recursos podría no tener acceso a una provisión adecuada de precios no subsidiados.

A causa del interés de estas cuestiones, en este capítulo se aborda especialmente la política de precios. En la sección 2 se hace una revisión de problemas en términos generales, y se enfatiza la importancia de considerar tanto la demanda como el suministro en la planeación del sector hídrico. En la sección 3 se hace un perfil del consumo de agua en la ZMVM, en la medida en que los datos disponibles lo permiten. En la discusión se identifica cómo se distribuye el consumo por sectores, así como la variación del acceso por delegación y municipio (similar al condado de los EUA). En la sección 4 se delínea como es posible hacer un uso creciente de la administración de la demanda como instrumento para: (1) aumentar el suministro al menor costo posible y (2) abordar cuestiones de equidad en forma directa. Se resumen los méritos relativos de incentivos económicos, medios regulatorios y decisiones institucionales que afectan el consumo. En la sección 5 se tratan los problemas de implementación, incluyendo la capacitación y la iniciativa de privatización, actualmente en proceso en el DF. En la sección 6 se establecen algunas conclusiones.

4.2. Problemas y prioridades

Como en todo el mundo, en la ZMVM los costos reales para satisfacer la ascendente demanda de agua de calidad aceptable son crecientes. Su incremento, y el de servicios de saneamiento, actúan dramáticamente en la elevación de costos a medida que la población urbana continúa en expansión, y la disponibilidad, calidad y las finanzas del agua se deterioran. Además, una gran porción del agua que entra al sistema formal de distribución se pierde por fugas, y la satisfacción de la demanda no es pareja en las diferentes partes de la región. En algunas de las áreas más pobres, el suministro puede ser tan bajo como 20 litros por persona por día, mientras que otros consumidores usan tanto como 650 l/pers/día [Contreras, 1988; García, 1988; Schteingart, 1993]. Finalmente, la manera como mucha del agua consumida se cobra y financia sólo hace que estos problemas empeoren bastante, debido al estímulo al consumo excesivo y a la escasez de fondos necesarios para el mantenimiento y expansión del sistema.

Sin embargo, no puede decirse que el reconocimiento de estas cuestiones sea nuevo en México. Por ejemplo, Buenfil (1993) los ordena de manera general en un rudo orden de prioridades:

> ***Preservación del agua:*** importancia de constreñir a la gente a consumirla menos, principalmente por medio del cobro por vo-

lumen. El agua ahorrada puede permitir la extensión del sistema, mejorar normas del servicio, o proteger el ambiente.

Recuperación de costos y salud financiera de la empresa: necesidad de generar ingresos adecuados para sufragar todos los costos, incluidos suministro, drenaje y desagüe pluvial, entre otros. También la necesidad de generar inversiones futuras.

Equidad doméstica y social: deseo de evitar prácticas discriminatorias asociadas a tarifas fijas o basadas en volumen, dando acceso general al agua potable y favorecimiento a hogares de ingresos bajos en la estructura tarifaria.

Pérdidas: reducción del suministro no contabilizado (tomas clandestinas y fugas).

Información: mejores datos acerca de demanda y consumo para mejorar operaciones –y desarrollar nuevos planes– del sistema de abastecimiento.

El primero de éstos reconoce que el consumo no está en función únicamente de la cantidad de usuarios o de las características de la red de suministro, sino que de modo crítico depende también del costo al usuario y del ambiente regulatorio. Los individuos y las empresas adoptan decisiones acerca del consumo de agua con base en cierto número de factores, muchos de los cuales están bajo el control de las autoridades respectivas. Algunos de estos factores incluyen: precio, procedimiento de cobro, confiabilidad y calidad, y restricciones interpuestas a su consumo. El comportamiento del usuario es sensible a cada uno de ellos, y la cantidad consumida depende de las políticas que los rigen. Además, en gran medida, la efectividad de programas para preservarla está determinada por los esfuerzos de implementación realizados por los organismos operacionales.

La segunda de las cuestiones enunciadas por Buenfil hace notar que, dada la escasez general de todas las recaudaciones públicas, juntamente con las reformas estructurales en proceso tendientes a reducir la intervención gubernamental para estimular la macroeconomía, los subsidios históricos al sector hídrico ya no están disponibles. Además, los ingresos adicionales necesarios para reparar, dar mantenimiento y expander el severamente dañado e inadecuado sistema de distribución no han de provenir de otros niveles del gobierno. Las autoridades a quienes compete el agua comprenden que deben recurrir a los consumidores para recaudar fondos destinados a mantener el nivel existente de servicio a largo plazo y para inversiones futuras. Y en la medida en que las comunidades intenten compensar la inequitativa disponibilidad de agua confiable y suficiente en áreas de bajo ingreso en la ZMVM, sin duda se requerirá que éstas compartan más el costo real de suministro y desecho.

Como ejemplo, en esta zona el sector hídrico significa una enorme sangría para el erario público, desproporcionada en cuanto a su tamaño y necesidades. Al efecto, anual-

mente en el Distrito Federal se gastan más de N$ 3,000 millones—en cifras cerradas, N$ 375 por persona— para subsidiar los servicios de agua y saneamiento [Banco Mundial, 1992]. De las 64 ciudades mexicanas con más de 100,000 habitantes, el DF ocupa el vigésimo quinto lugar por el monto pecuniario recuperado por cada toma de agua, a N$ 0.298 por año [CNA, 1992]. En su jurisdicción[1] se cobran sólo N$ 0.323/m^3. Esto es considerablemente menos que en algunas otras ciudades, a pesar de que el costo marginal de suministro a las comunidades de la ZMVM se estima en aproximadamente N$ 3/m^3, de los más altos del país [Banco Mundial, *op. cit.*]. Por ejemplo, en Monterrey cobran N$ 1.158/m^3 [*Ibid.*]. Como se demuestra en la tabla 4.2.1, la componente no subsidiada de la inversión en la zona metropolitana es absolutamente más pequeña y proporcionalmente mucho menor que en otras partes del país. Es evidente que a los habitantes no se les envían mensajes acerca de la escasez. Además de provocar consumo excesivo, el gobierno federal debe cubrir estas subvenciones pidiendo empréstitos que de otra manera se destinarían a la instrucción pública, al sector de la salud o a otros gastos federales.

Como en otras partes, en el DF los subsidios masivos han tendido a reducir la necesidad de recuperar los costos. Si se puede disponer de aquéllos, las autoridades siguen la senda del menor esfuerzo, y conservan tarifas y cobros abajo de como lo harían si fuera más difícil conseguir los fondos. Al respecto, recientemente el gobierno ha optado por la política de recuperación; en 1987 las tarifas domésticas se elevaron 80% y las industriales 220%, y en los años subsiguientes continuaron las alzas (por ejemplo, entre 1992 y 1993, en promedio las de ambas categorías se incrementaron 20%).

Sin embargo, por problemas de disponibilidad de fondos y de eficiencia administrativa, dichos esfuerzos se han trabado. Por ley, la responsabilidad de los sistemas de suministro y drenaje reside en los gobiernos municipales, que están especialmente sujetos a recortes financieros crónicos, su experiencia en la administración de estos sistemas es limitada, y están restringidos por sus esfuerzos por atraer talento operacional adecuado. La insuficiencia del capital disponible para invertir en los sistemas de suministro y drenaje es substancial; para todos los propósitos prácticos es un problema que no se puede resolver a corto plazo. La imposibilidad de obtener recaudaciones razonables en el sector hídrico, en conjunción con costos ascendentes, parcialmente causados por ineficiencias en el aprovisionamiento de materiales y equipo, exacerban esta insuficiencia. Tampoco ayuda la engorrosa red de organismos gubernamentales que comparten la responsabilidad de planeación y financiamiento de

[1] Más que nada, estas cifras de pesos por conexión reflejan la baja tarifa de cobro. Esto es, los recibos no se pagan, o tal vez en algunos casos ni siquiera se facturan. Así, estos números de la CNA hablan más de la eficiencia administrativa que de la política tarifaria en sí.

estos servicios en la ZMVM, pero sin la obligación de cooperar.

Si bien en este capítulo se arguye que anteriormente las estrategias de planificación que afectaban el consumo individual de agua se subutilizaron, es importante reconocer que tal omisión es una característica mundial de la planeación de los servicios de agua, y que en México ya se están emprendiendo reformas importantes relativas a la demanda. De hecho, en algunos aspectos México está entre los países de vanguardia. Cada vez más, se está reconociendo al agua como un bien económico privado, y se están implantando tarifas apropiadas para reducir el desperdicio e incrementar la recuperación de costos, con el fin de financiar la ampliación y la mejora de sistemas, dentro y fuera de la ZMVM. En 1993 se aprobaron varias leyes federales nuevas, que comprenden desde un nuevo sistema de cargos por efluentes tendiente a financiar el tratamiento de aguas residuales, hasta un cambio en la asignación de los derechos de agua. La última reforma ha permitido que las autoridades encargadas de este recurso comiencen a hablar abiertamente de derechos que se pueden comercializarlibremente en los mercados. También es evidente la tendencia a una creciente concesión de los servicios municipales a particulares, en términos que conservan la propiedad pública, pero que también introducen cierto grado de competencia.

4.3. Tarifas, consumo y acceso al agua en la ZMVM

Antes de evaluar los pros y los contras de las políticas diseñadas para reducir la demanda a niveles más sustentables, aquí se explica y describe su estado actual, y luego se caracteriza la forma en que el consumo puede cambiar en respuesta a circunstancias y políticas diferentes.

Tabla 4.2.1
Inversión en el sector hídrico (millones de nuevos pesos)

	Federal	*Estatal y municipal*	*Créditos y fondos de organismos operadores*	*Total*
ZMVM	314	189	47	550
Monterrey	92	110	140	342
Guadalajara	38	132	408	578
Otras ciudades	263	145	241	649
Zonas rurales	291	153	0	444
Total	998	729	836	2,563

Al describir el estado actual, un planteamiento podría ser el de abordar un análisis riguroso de la demanda; empero, no es propósito de este estudio estimar ni predecir la demanda [Piña *et al.*, 1993, quienes hacen tal planteamiento para 30 ciudades mexicanas]. Un pronóstico creíble de la demanda requeriría de un procedimiento complejo y técnico de compilación de datos originales [Kindler y Russell, 1984; Munashinghe, 1992], lo cual queda fuera del alcance de este trabajo. En vez de eso, se propone determinar el perfil del consumo en la ZMVM en la medida que los datos disponibles lo permitan, y así decidir dónde se podrían aplicar más económicamente los esfuerzos de preservación. Tal perfil puede también ayudar a detectar cuáles áreas de la economía y región tienen mayor necesidad de mejora del suministro.

En la tabla 4.3.1 se detalla el consumo de agua por sector en 1982 y 1992 en el DF, de acuerdo con estimaciones del DDF.[2] No hubo disponibilidad oportuna de las cifras correspondientes a la porción restante de la ZMVM. Durante el decenio anterior, la mayor parte del uso era *doméstico*, seguido por el *industrial* y luego otros. Nótese que el porcentaje relativo al primero, en el que ha ocurrido el incremento más dramático de consumidores, de hecho ha declinado. Por usuario, destaca el sector industrial. Por empresas individuales el consumo varía considerablemente, según lo confirmaría sin duda un estudio más detallado del sector industrial. Pero –con fines de preservación– es claramente importante analizar, aunque sea, categorías amplias de usuarios que utilizan grandes cantidades de agua, y por eso mismo estarían predispuestos a reaccionar de modo favorable a incentivos de preservación. Típicamente, en países en desarrollo el 20% de la población consume el 80% del agua, por lo cual es sensato empezar con los grandes consumidores [Banco Mundial, 1991]. Justamente, en el DDF la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica identifica 60,000 usuarios *mayores* con un consumo de por lo menos 60, m^3/mes. Éstos incluyen 3,107 usuarios industriales, 16,157 comerciales y 39,892 residenciales– pero en el estudio de referencia no se reporta el porcentaje de agua consumido por este grupo, ni la cantidad total de usuarios por sector [DDF, 1992b][3].

[2] Hay tres fuentes principales de estas cifras. Las primeras son las estimaciones oficiales de consumo realizadas por el gobierno de la ciudad de México: el Departamento del Distrito Federal [DDF, 1992b]. La segunda es la Comisión Nacional del Agua [CNA, 1992], que se basa en el consumo medido y otras determinaciones cuantitativas de flujo y descarga. Este último conjunto de datos tiene la ventaja de ser bastante actual y completo; empero, su precisión es dudosa a causa de la cobertura limitada de medidores en funcionamiento y el conocimiento impreciso del patrón y de la magnitud de las fugas. La tercera fuente es el Censo de Población de 1990 [INEGI, 1991], que de cada vivienda reporta la forma de surtimiento y las características de plomería y drenaje. El problema principal de este censo es la subestimación de viviendas en asentamientos irregulares (colonias), que cabe esperar figuren entre los menos atendidos por los organismos municipales.

[3] Sin embargo, en la ZMVM menos de la mitad de las viviendas tienen medidores que funcionen; por lo que estas estimaciones podrían ser sumamente deficientes.

TABLA 4.3.1

CONSUMO DE AGUA POR SECTOR EN EL DF EN 1982 Y 1992

Sector	*# de usuarios 1982*	*% del total 1982*	*# de usuarios 1992*	*% del total 1992*
Doméstico	1,900,000	69	?	67
Industrial	30,000	16	?	17
Comercial y servicios	180,000	15	?	16
Total	2,110,000	100	?	100

Hasta 1991 hubo tarifa única, independientemente del uso [Bahl y Linn, 1992]. Ahora la tarifa no doméstica es considerablemente más alta. La estructura tarifaria adoptada en 1991 –basada en un cobro progresivo por metro cúbico a medida que aumenta el consumo–, da mayores incentivos de ahorro de agua a las plantas industriales con servicio medido (Tabla 4.3.2).

Hasta 1992, en el DF, para la industria el precio máximo por metro cúbico era de N$ 2.9, ligeramente más que en Monterrey y similar al de muchas otras ciudades, pero inferior a la mitad de la tarifa máxima vigente en Guadalajara [CNA, 1992]. En la lista de precios publicada más recientemente, transcrita en la tabla 4.3.2, el máximo (N$ 5.6) corresponde a un consumo superior a 960 m^3. A los de uso no doméstico y sin medidor, incluyendo a la industria, se les cobra según el diámetro del tubo. Por ejemplo, si éste no es mayor de 13 mm, la tarifa bimestral es de N$ 84; ésta aumenta rápidamente al incrementarse el diámetro (Fig. 4.3.1), y alcanza N$ 669 235 en los que éste rebasa 300 mm [DDF, 1992b]. Se ha puesto especial atención en medir el consumo de usuarios que superan los 240 m^3 bimestrales [DDF, 1992a]. A usuarios como la Cervecería Moctezuma corresponden los cargos más elevados.

De manera aproximada, el consumo y los usuarios domésticos constituyen el 67% de sus totales respectivos, así como de los consumidores mayores. Sin embargo, en las viviendas de diferentes niveles de ingreso se consumen cantidades *per capita* que difieren grandemente. Existe el problema de que las moradas de ingreso bajo pueden no tener acceso a suficiente agua para satisfacer sus necesidades de salud y saneamiento. La Organización Mundial de la Salud ha indicado que en las ciudades de países en desarrollo se necesitan 150 litros diarios por vivienda; para protección contra las hidropatologías (enfermedades transmitidas mediante el agua) se consideran adecuados 75 l/día/vi-

TABLA 4.3.2

TARIFAS PARA EL AÑO DE 1992, USUARIO NO DOMÉSTICO

Consumo bimestral (m^3)	*Precio/m^3 (N$)*
Hasta 30	1.2
Más de 30 y hasta 60	2.0
Más de 60 y hasta 120	2.3
Más de 120 y hasta 240	3.0
Más de 240 y hasta 420	3.5
Más de 420 y hasta 660	4.2
Más de 660 y hasta 960	4.9
Más de 960	5.6

vienda [Falkenmark y Suprapto, 1992]. Con el fin de prevenir problemas de salud, el Banco Mundial estima que para saneamiento son necesarios al menos 50 litros *per capita* por día. En México, la mayor causa de mortalidad infantil en áreas irregulares y rurales continúan siendo las enfermedades diarreicas, debido en gran parte a hábitos impropios de saneamiento en el interior del hogar [Correa-Camacho, Luis A., 1992]. Algunas evidencias permiten inferir que el consumo entre los residentes de colonias pobres del Valle de México es tan bajo como 20 litros *per capita* [Schteingart, 1993].

Este volumen puede ser suficiente para cocinar y beber, pero no para mantener un ambiente saludable; cualquier consumo por encima de 50 l/día se considera que es para el confort: puede afectar la calidad de vida pero no es esencial para la salud y la nutrición. Por otra parte, típicamente en las residencias de quienes obtienen ingresos más altos, además de satisfacer las necesidades hogareñas elementales de evacuación de retretes y de baños, se consumen muchos cientos de litros diarios *per capita* para fines discrecionales, como el riego de plantas decorativas y jardines, y el uso en albercas. En la tabla 4.3.3 se muestran las tarifas domésticas actuales.

Hay dos maneras tradicionales de clasificar el patrón de consumo y distribuir los costos del sector doméstico: por ingreso y por localización. Desafortunadamente, para este estudio no hay datos que relacionen el consumo con el ingreso. En su lugar en las páginas siguientes se presentan dos categorías de datos, referentes a la ZMVM, relacionados con la localización.

La primera, resumida en la tabla 4.3.4, es una clasificación, de fuentes 'oficiales' (es decir, proporcionadas por servicios públicos gubernamentales) de agua entubada (en el

interior del hogar; en el patio; grifos públicos), por delegación y municipio, obtenida del censo de 1990. Según esta información, una casa posee una toma dentro de ella, en el patio (por ejemplo un grifo para jardín), o en un surtidor común cercano u otra fuente pública. Esta última categoría incluye camiones cisterna (*pipas*), que transportan agua a (1) depósitos en localidades específicas –con periodicidad fija–, desde donde se le conduce por tubo o se le acarrea en cubetas a la casa; y (2) por entrega domiciliaria directa. Presumiblemente, las casas sin acceso oficial a agua se surten de fuentes superficiales u otras. Los datos revelan que en tanto el 97% de las casas del DF sí tienen alguna de las modalidades de acceso a agua entubada, sólo el 74% tiene una fuente en el interior de su hogar. La gran mayoría del resto dispone de una en el patio. En las áreas metropolitanas del Estado de México, aproximadamente el 56% de las viviendas informaron tener el servicio en su interior, y el 33% en el patio; finalmente, alrededor del 9% carecen de acceso a agua tratada repartida mediante el sistema de distribución.

Algunos de los fuertes contrastes que hay entre las diferentes partes de la ZMVM son notables. Asimismo, tanto dentro del DF como dentro de la ZMVM del Estado de México existen disparidades verdaderamente dramáticas. Por ejemplo, en Tláhuac y en Xochimilco, ambas delegaciones del DF, solamente 39 y 55%, respectivamente, de las casas tienen agua entubada en su interior. Aún más, el 17% en Milpa Alta y el 14% en Tlalpan informan carecer completamente de acceso al agua entubada. De los 17 municipios, siete tienen a más de 10% de las viviendas sin esta forma de servicio; destaca el caso de Chalco, con casi 70%. Solamente dos de los municipios tienen más de 70% [INEGI, 1991].

Estos datos se ilustran en el mapa de la figura 4.3.2, que identifica la ubicación de cada demarcación política y las clasifica por la proporción de viviendas con agua en su interior, según el censo de 1990. Dos municipios de esta área del Estado de México reportaron menos de 25% de viviendas con tubería interior. Por otra parte, en el plano es evidente que las áreas con servicio más deficiente son las jurisdicciones recientes, como las de la zona central del DF y la zona oeste del Estado de México.

En la tabla 4.3.5 se presenta la segunda clase de datos geográficos descriptivos: la fuente de agua y los medios de drenaje, tal como lo declararon en cada vivienda a nivel delegacional o municipal. Los datos se obtuvieron de cuatro censos nacionales de población.

Estos datos ilustran varias cuestiones. La primera es el enorme incremento de casas con servicio de agua en el periodo de 30 años, especialmente en el decenio de los 'setentas', cuando más de 825,000 fueron conectadas al sistema de suministro. El número de casas conectadas a dicho sistema durante el siguiente decenio, en la ZMVM del Estado de México,

FIGURA 4.3.1

TARIFAS BIMESTRALES, SIN MEDIDOR, COMO FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DEL TUBO

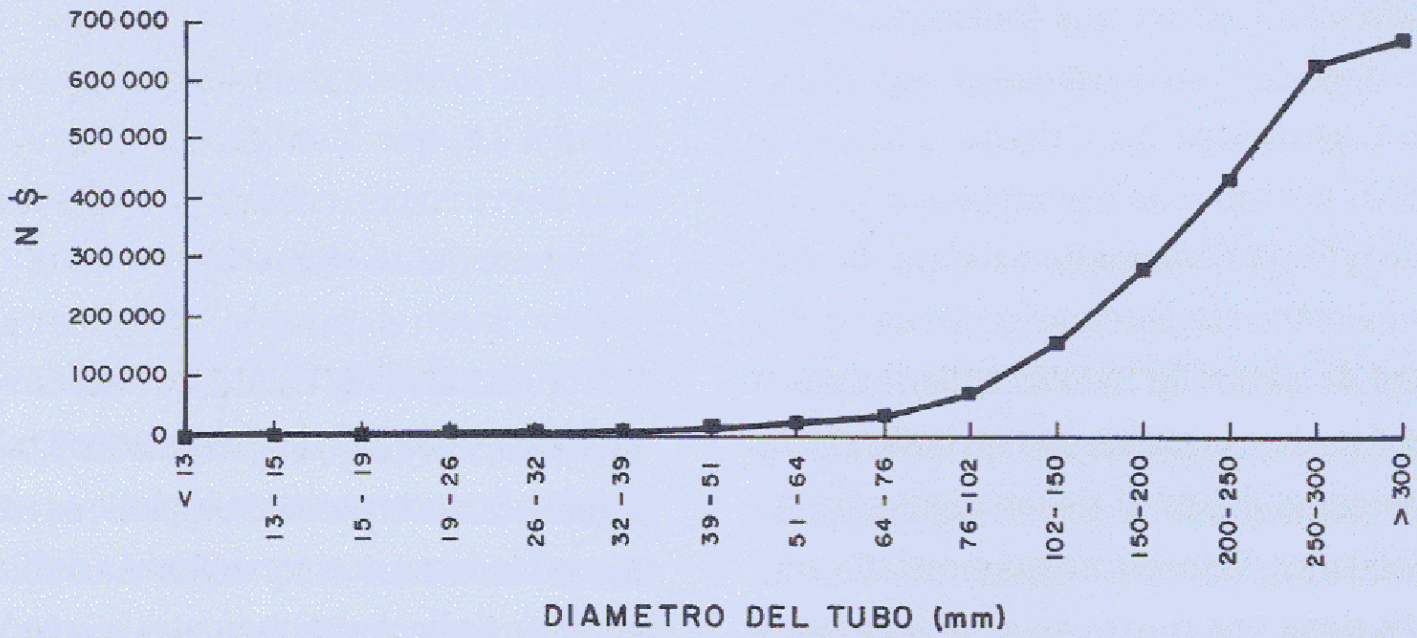


TABLA 4.3.3

TARIFAS PARA EL AÑO DE 1992, USUARIO DOMÉSTICO

Consumo bimestral (m^3)	*Precio/m^3 (N$)*
Hasta 10	Exento
Más de 10 y hasta 20	0.40
Más de 20 y hasta 30	0.50
Más de 30 y hasta 60	1.20
Más de 60 y hasta 120	1.40
Más de 120 y hasta 240	1.90
Más de 240 y hasta 420	2.20
Más de 420 y hasta 660	2.50
Más de 660 y hasta 960	2.80
Más de 960	3.20

fue más de 2.5 veces mayor que el que obtuvo el servicio en el DF; el crecimiento proporcional correspondiente fue cinco veces mayor en el Estado de México que en el DF, absorviendo 29.8% esta entidad federativa y 5.1% en el DF. Este patrón cambia de una jurisdicción a otra, pues varios municipios y delegaciones tienen incrementos tan elevados como 50 o 100%. Nótese también que las cifras agregadas enmascaran el decrecimiento absoluto de viviendas servidas en algunas delegaciones, lo que refleja las consecuencias del terremoto de 1985 y la declinación poblacional que ha ocurrido en algunas delegaciones centrales.[4] De manera general, la cantidad de viviendas conectadas al sistema de drenaje creció aún más rápidamente durante ese periodo de 30 años.

En las figuras 4.3.3 y 4.3.4 se presentan estos datos de manera algo más útil, aunque con menos detalle. En la 4.3.3 se grafican los porcentajes de las viviendas con abastecimiento interno de agua durante los tres decenios anteriores en la ZMVM, el DF y los municipios metropolitanos del Estado de México. Esta figura muestra cómo en el DF el progreso ha sido continuo por lo que a la proporción de moradas con servicio interior se refiere, alcanzando en 1990 un poco más de 70%. A las áreas metropolitanas del Estado de México les ha ido menos bien al respecto, tanto por lo que se refiere al valor de dicho porcentaje como a la forma en que ha evolucionado con el transcurso del tiempo. El 52% correspondiente a 1990, representa un gran logro con respecto al 17% correspondiente a 1960; empero, representa una declinación con respecto al 62% de 1980. La explicación más probable es que el sistema de distribución no pudo mantener el paso con el rápido crecimiento demográfico que tuvo el Estado de México en los 'ochentas'.

En la figura 4.3.4 se presentan datos similares sobre el drenaje domiciliario. En el transcurso de los tres últimos decenios, en la zona en estudio, hubo un porcentaje creciente de viviendas que realizan sus descargas hacia el alcantarillado o en fosas sépticas.

En general, en relación a la provisión de servicios públicos a los más pobres, por ejemplo quienes aun no reciben agua entubada, los datos son escasos. Sin embargo, en años recientes la CNA ha emprendido varias encuestas en viviendas de áreas seleccionadas; incluían preguntas con respecto a disponibilidad y costo del agua. Aunque no se pudieron revisar algunos de estos datos en detalle para este trabajo, en cambio sí es posible resumir algunos resultados de lo más reciente. Investigadores de El Colegio de México, que indagaron *hábitat* y salud en cuatro colonias populares (dos en el Estado de México y dos en el DF), encontraron situaciones variables de abastecimiento y consumo que diferían ampliamente de la norma esperada con base en la información oficial [Schteingart, 1993]. A una colonia del DF, un camión

[4] Discusiones detalladas de tendencias delegacionales se pueden encontrar en Garza, 1987.

TABLA 4.3.4

FUENTES DE AGUA EN VIVIENDAS EN LA ZMVM, 1990

		Fuentes de suministro en viviendas (%)			
	#de viviendas	*En el interior*	*En el patio*	*Grifo cercano*	*Ninguna*
Álvaro Obregón	133,937	72.6	24.2	3.2	2.5
Azcapotzalco	103,130	76.3	22.9	0.8	0.7
Benito Juárez	114,002	95.4	4.5	0.2	0.3
Coyoacán	142,533	78.7	20.8	0.6	0.6
Cuajimalpa	23,422	55.0	40.1	5.0	5.6
Cuauhtémoc	157,079	91.9	7.7	0.3	0.7
Gustavo A. Madero	262,905	73.6	25.5	0.9	1.6
Iztacalco	93,815	75.4	24.2	0.4	0.7
Iztapalapa	294,738	62.4	36.1	1.6	5.4
Magdalena Contreras	40,247	59.3	38.8	1.9	3.4
Miguel Hidalgo	98,051	84.5	15.1	0.4	0.6
Milpa Alta	12,258	42.2	50.8	7.0	17.1
Tláhuac	39,311	39.0	59.7	1.2	5.8
Tlalpan	103,137	66.4	30.2	3.4	13.8
Venustiano Carranza	117,640	82.0	17.7	0.3	0.7
Xochimilco	52,966	55.0	40.1	4.9	9.1
Total del DF	1,789,171	74.3	24.4	1.3	3.1

cisterna llevaba aguados veces a la semana, para vertirla en barriles. El servicio era gratuito. A otra se le proveía mediante una red de tubería construida por el programa de Solidaridad. Ahí la dificultad de instalación requirió de la labor profesional; los usuarios pagaron ésta y el material.

Aunque fue personal experto el que realizó la instalación, hubo problemas de reparación y mantenimiento. Un año después de su construcción, muchos colonos continuaron quejándose del mal servicio y de lo que consideraban un costo muy alto del servicio medido. En otra colonia donde había agua entubada tenían tarifa fija. Sin embargo, solamente la recibían de cuatro a seis horas por día, varias veces a la semana. De las cuatro colonias estudiadas, donde el funcionamiento era mejor, en una de ellas el 76% de los habitantes dijeron que tenían servicio las 24 horas del día y 91% declararon que tenían agua los siete días de la semana. Aparentemente la

TABLA 4.3.4 (CONT.)

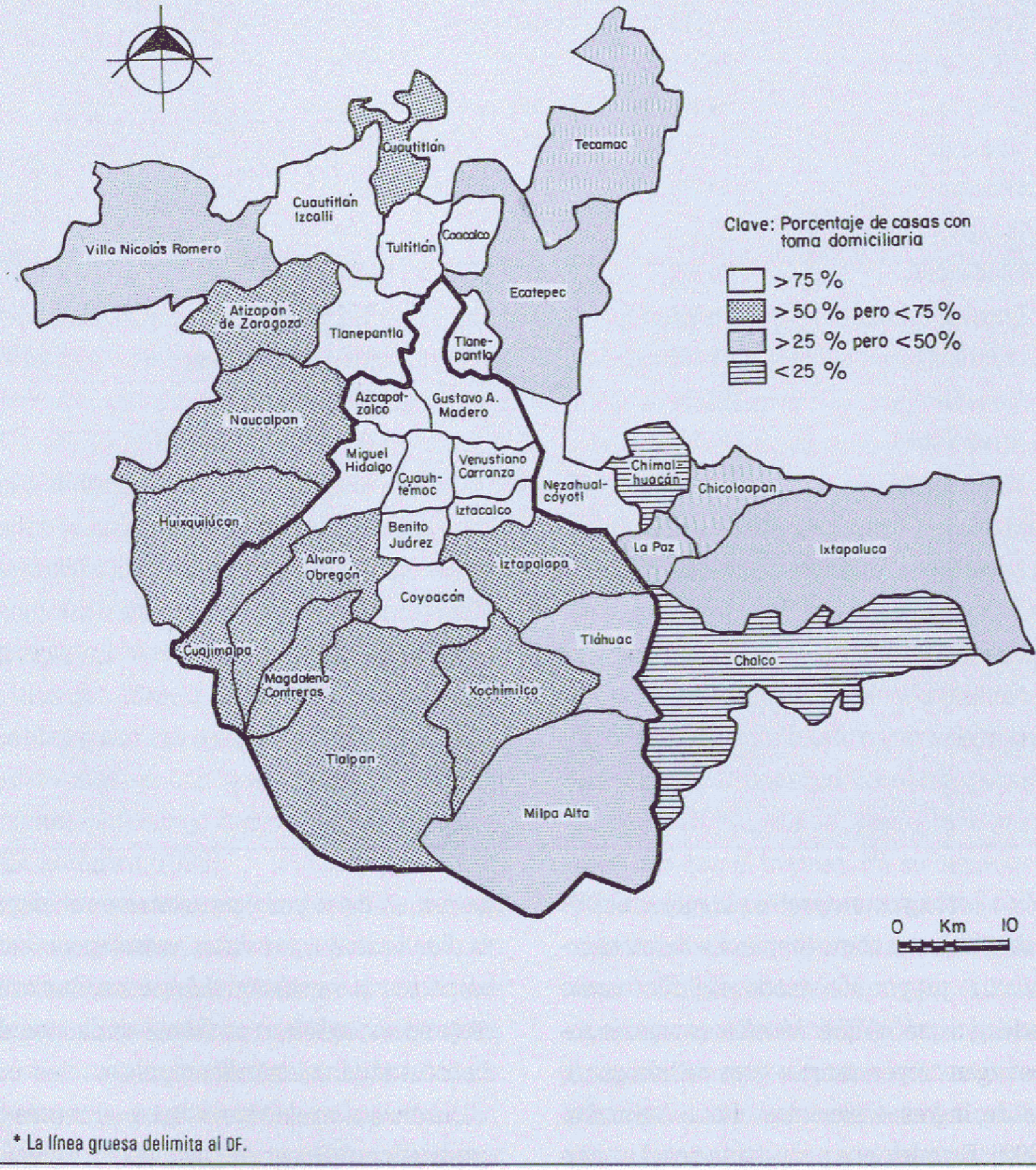
		Fuentes de suministro en viviendas (%)			
	#de viviendas	*En el interior*	*En el patio*	*Grifo cercano*	*Ninguna*
Atizapán de Zaragoza	64,990	58.6	25.5	0.8	5.9
Coacalco	32,072	89.1	7.0	0.4	2.1
Cuautitlán	9,693	66.0	30.0	0.9	2.7
Cuautitlán Izcalli	68,019	76.2	17.5	2.3	2.9
Chalco	54,155	13.7	12.9	1.8	69.9
Chicoloapan	10,749	27.2	65.5	2.0	4.7
Chimalhuacán	44,016	21.6	56.2	6.3	15.1
Ecatepec	283,413	46.8	26.4	1.2	9.0
Huixquilucan	25,392	51.5	34.8	2.1	9.9
Ixtapaluca	26,460	32.6	35.3	3.0	28.5
La Paz	25,226	39.3	46.1	2.0	11.5
Naucalpan	159,372	57.3	39.2	1.1	1.3
Nezahualcóyotl	239,951	52.3	43.3	0.7	2.3
Nicolás Romero	34,732	34.2	46.9	1.6	16.4
Tecámac	24,079	42.8	44.5	0.7	11.3
Tlalnepantla	144,366	65.3	30.6	1.3	1.8
Tultitlán	49,847	65.8	21.5	0.6	11.2
Estado de México metropolitano	1,296,532	52.1	32.8	1.4	8.8
ZMVM	3,085,703	63.3	27.4	1.3	5.5

calidad del agua era también la mejor: el 70% la describieron como limpia. En las otras colonias, la proporción que la identificó como sucia alcanzó el 75%. Muchas personas pobres substituyen el agua para bebida por la embotellada o refrescos, en vez de la entubada, en la cual tienen poca confianza. La alternativa es cara pero presuntamente segura. Por lo tanto, los datos estadísticos con respecto a la expansión del sistema de suministro de agua tratan en forma similar experiencias ampliamente discrepantes.

Adicionalmente al tiempo y el esfuerzo implicados en llevar el agua a mano, a menu-

FIGURA 4.3.2

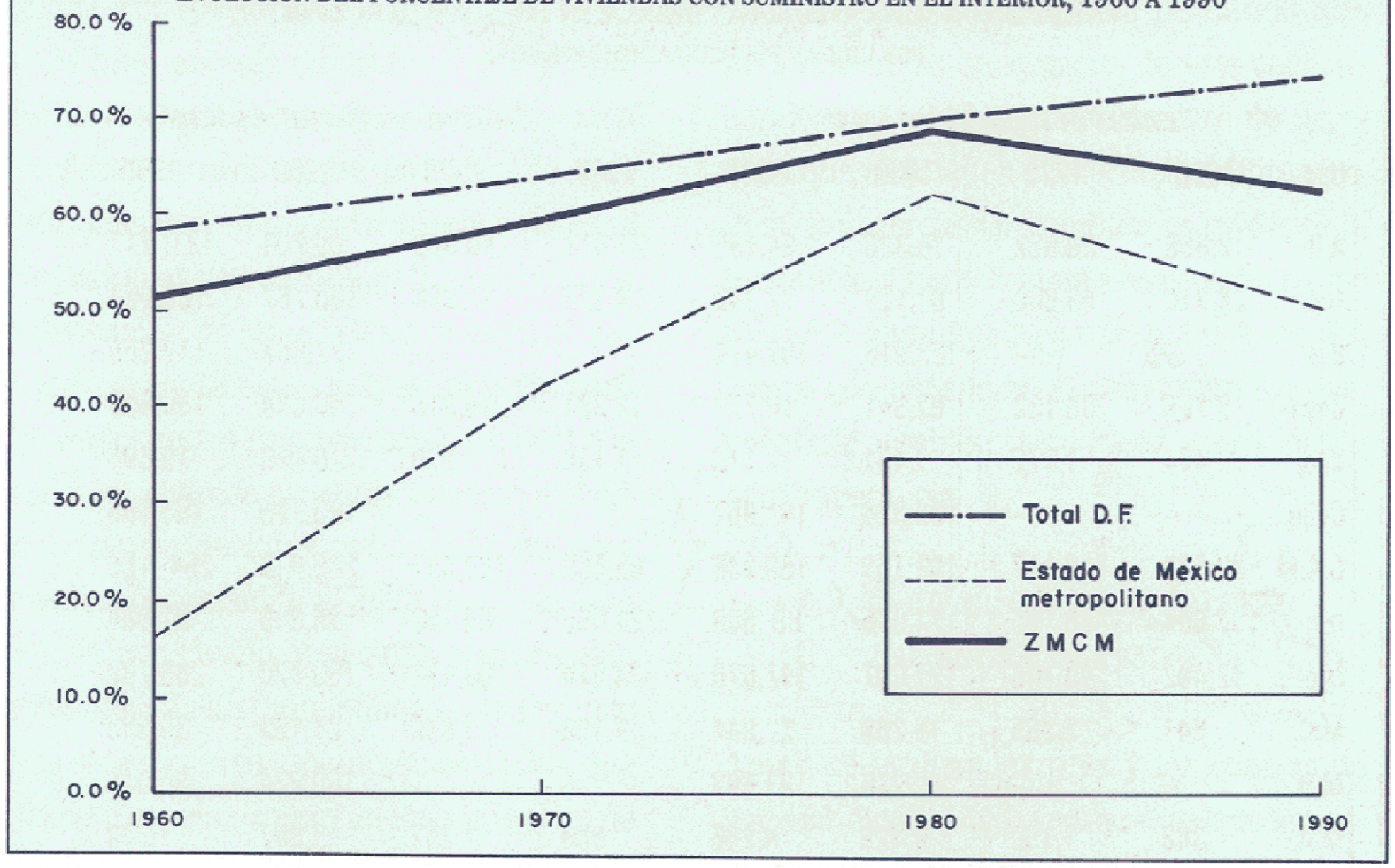
RELACIÓN DE VIVIENDAS CON SUMINISTRO DE AGUA EN EL INTERIOR DE LA ZMVM EN 1990, POR DELEGACIÓN Y MUNICIPIO*



* La línea gruesa delimita al DF.

FIGURA 4.3.3

EVOLUCIÓN DEL PORCENTAJE DE VIVIENDAS CON SUMINISTRO EN EL INTERIOR, 1960 A 1990



do el costo del agua es una carga económica para el pobre. Para el propósito de este capítulo, sería útil describir la carga financiera que gravita sobre éste y otros grupos de ingresos de la ZMVM, pero no se dispone de tales datos. Hay alguna evidencia de que no se impone rígidamente el pago del aviso de adeudo, y que muchos permanecen en la morosidad sin que se les corte el servicio [Comisión de Aguas, DF, 1993]. Casi todos los estudios sobre otras grandes ciudades de países en vías de desarrollo concluyen que existen criterios poco adjetivos sobre el consumo en estas ciudades, ya que los que tienen más bajos ingresos pagan proporcionalmente mucho más que los de ingresos elevados [Banco Mundial, 1992]. Esto se debe a dos factores: el abastecimiento es relativamente insensible a las percepciones pecuniarias, y algunos de los pobres deben comprar el agua a intermediarios, como los que la llevan en camiones cisterna, quienes la encarecen. En algunos países, como Indonesia y Haití, los pobres que no disponen de agua entubada puede ser que paguen tanto como 10 a 50 veces el litro respecto de las viviendas que cuentan con tomas domiciliarias [Banco Mundial, *op. cit.*; Crane, 1994]. El resultado es que no obstante que compran menos agua, la pagan a costos tan altos que pueden representar hasta el 10% de su ingreso. Para dar alguna idea de la inequidad social inherente a tales circunstancias, en la figura 4.3.5 se ilustra el porcentaje del ingreso gastado en agua en

TABLA 4.3.5

VIVIENDAS CON SERVICIO DE AGUA Y DRENAJE EN 1960-1990 EN LA ZMVM POR UNIDAD POLÍTICO-ADMINISTRATIVA

	Cantidad de viviendas con agua				*Cantidad de viviendas con drenaje*			
Upa	1960	1970	1980	1990	1960	1970	1980	1990
Á.O	12,868	39,552	75,330	94,135	21,411	50,868	95,201	121, 711
Azc	28,715	53,800	81,129	77,749	18,325	72,684	106,187	100,962
B.J.	–	–	122,916	107,474	–	–	127,657	112,269
Coyo	18,299	33,132	82,641	110,772	12,381	36,315	86,014	130,803
Cuaj	404	1,772	7,491	12,113	1,436	270	10,488	19,686
Cuau	–	–	168,328	141,951	–	–	183,725	153,469
G.A.M	33,023	116,147	193,155	189,248	63,563	157,547	243,023	254 ,188
Iztc	7,604	38,165	71,075	69 ,803	24,059	59,152	95,605	91,994
Iztp	12,492	40,148	127,097	172,678	24,674	50,422	150,970	260,798
M.C.	641	3,395	16,268	22,944	4,198	3,842	21,193	35,593
M.H.	–	–	92, 716	81,682	–	–	108,224	95,646
M.A.	388	1,150	4,429	4,256	659	1,257	2,887	7,373
Tláh	223	3,242	11,737	14,412	2 ,792	2,273	8,040	29,420
Tlal	2,214	11,918	37,352	58,638	5,262	13,544	42,791	84,722
V.C.	98,051	–	102,765	95,207	–	–	129,839	115,742
Xoch	1,486	5,869	23,188	26,323	4 ,580	7,151	22,193	41,713
TDF	490,531	779,373	1,217,617	1,279,385	397,388	957,685	1,433,037	1,656,089

Nogales, Sonora, comparados con el de Nogales, Arizona, en el año de 1993.

Los datos correspondientes a 1970 mostraron que, en la ciudad de México, tanto ricos como pobres pagaban por el agua un por centaje menor de su ingresos económicos que los habitantes de muchas otras áreas urbanas de países en desarrollo. Por supuesto, desde entonces han aumentado las tarifas, pero la característica de que gente pobre paga una proporción más alta de su ingreso respecto del rico bien podría permanecer vigente, especialmente si se toma en cuenta el tiempo y el esfuerzo implicados en hacer acopio e ir por el agua, o quedarse en casa para esperar a que llegue la *pipa*. Los patrones de acceso revelados en las tablas 4.3.4 y 4.3.5 apoyan esta interpretación de la situación en partes de la ZMVM. Se recomienda efectuar un estudio para aportar mayor conocimiento acerca de cómo las expansiones del sistema de distribución y las

TABLA 4.3.5 (CONT.)

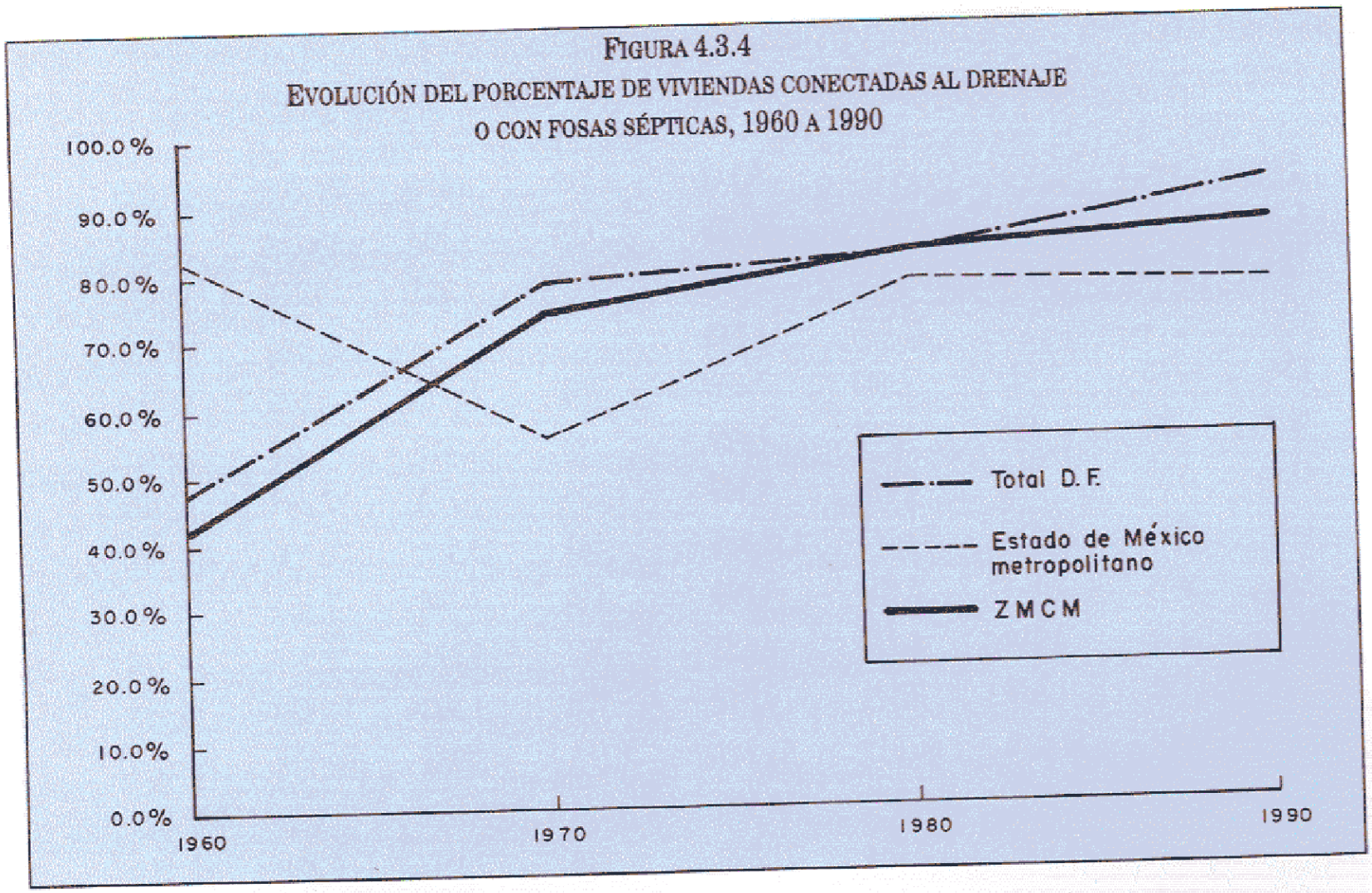
	Cantidad de viviendas con agua				*Cantidad de viviendas con drenaje*			
Atiz	254	3,839	23,689	38,113	312	3,956	26,806	51,695
Coac	70	1,245	15,548	28,563	128	1,138	15,754	30,912
Cuau	841	2,782	4,133	6,399	1,227	2,593	4,458	8,227
C.I.	–	–	23,088	51,846	–	–	21,343	60,263
Chal	749	3,103	7,440	7,420	766	2,495	4,074	11,800
Chic	38	466	1,191	2,927	45	399	758	6,332
Chim	962	603	4,385	9,499	1,088	255	2,347	17,792
Ecat	464	13,408	83,143	132,683	441	15,484	109,705	202,828
Huix	246	1,129	6,607	13,089	415	1,240	7,531	18,145
Ixta	735	2,944	6,777	8,633	767	2,371	6,527	14,754
La P	150	1,304	8,572	9,912	130	1,193	11,839	19,992
Nauc	2,460	34,415	85,019	91,247	2,775	43,984	108,198	145,632
Nez	–	29,158	125,843	125,562	53,774	198,102	–	233,809
N.R.	678	1,986	6,754	11,880	616	2,456	6,390	21, 250
Tecá	174	975	7,543	10,295	129	640	7,108	18, 439
Tlal	5,709	31,047	93,588	94,326	5,945	39,115	111,064	136,955
Tult	97	4,320	16,398	32,804	135	4,427	14,178	40,130
EMm	13,627	132,729	519,829	675,198	68,693	319, 848	656,182	1,038, 955
ZMVM	504,148	912,097	1,737,441	1,954,583	412,307	1,133,205	2,089,219	2,695 ,044

políticas tarifarias afectan la salud y el *status* financiero del más pobre.

Otro consumo mayor del sistema de suministro son las pérdidas en la conducción de agua. En ciudades antiguas, a menudo la red tiene fugas, a veces substanciales. Por ejemplo, en Bombay, India, la pérdida por fugas oscila entre 18 y 36% [Banco Mundial, 1991]. Asimismo, el agua no contabilizada representa una pérdida. El agua que se acondiciona y bombea pero no se paga, con frecuencia es un problema. El monto de ésta en la ZMVM asciende hasta el 40%, según lo ha estimado la CNA (1992), aunque no se disponga de cálculos precisos. Las fugas se pueden detectar mediante mediciones sistemáticas, segmento a segmento, instalación de hidrómetros (medidores) en casas particulares, actualización de datos de conexión, mejora del mantenimiento y renovación de las instalaciones más antiguas.

FIGURA 4.3.4

EVOLUCIÓN DEL PORCENTAJE DE VIVIENDAS CONECTADAS AL DRENAJE O CON FOSAS SÉPTICAS, 1960 A 1990



En la ciudad de México se están atendiendo las fugas y el cobro a los morosos. El hundimiento del terreno, causado por sobrebombeo del agua subterránea y los efectos del terremoto de 1985, han empeorado el problema de la infraestructura anticuada. Los organismos responsables han hecho reparaciones en las líneas de conducción, como parte del esfuerzo general de conservación. De acuerdo con datos oficiales [DDF, 1991a], mensualmente en el Distrito Federal se reparan —en promedio— 2,000 fugas y en el Estado de México, 1,800. Además, la DGCOH se ha abocado a eliminar las fugas domiciliarias, de modo especial en los edificios multifamiliares, enviando plomeros para este fin. Mediante programas de dichos organismos oficiales se controlan 150,000, fugas por año, aproximadamente [DDF, 1991b]. Tales programas incluyen instructivos detallados que explican a los moradores cómo se pueden detectar fugas y arreglarlas.

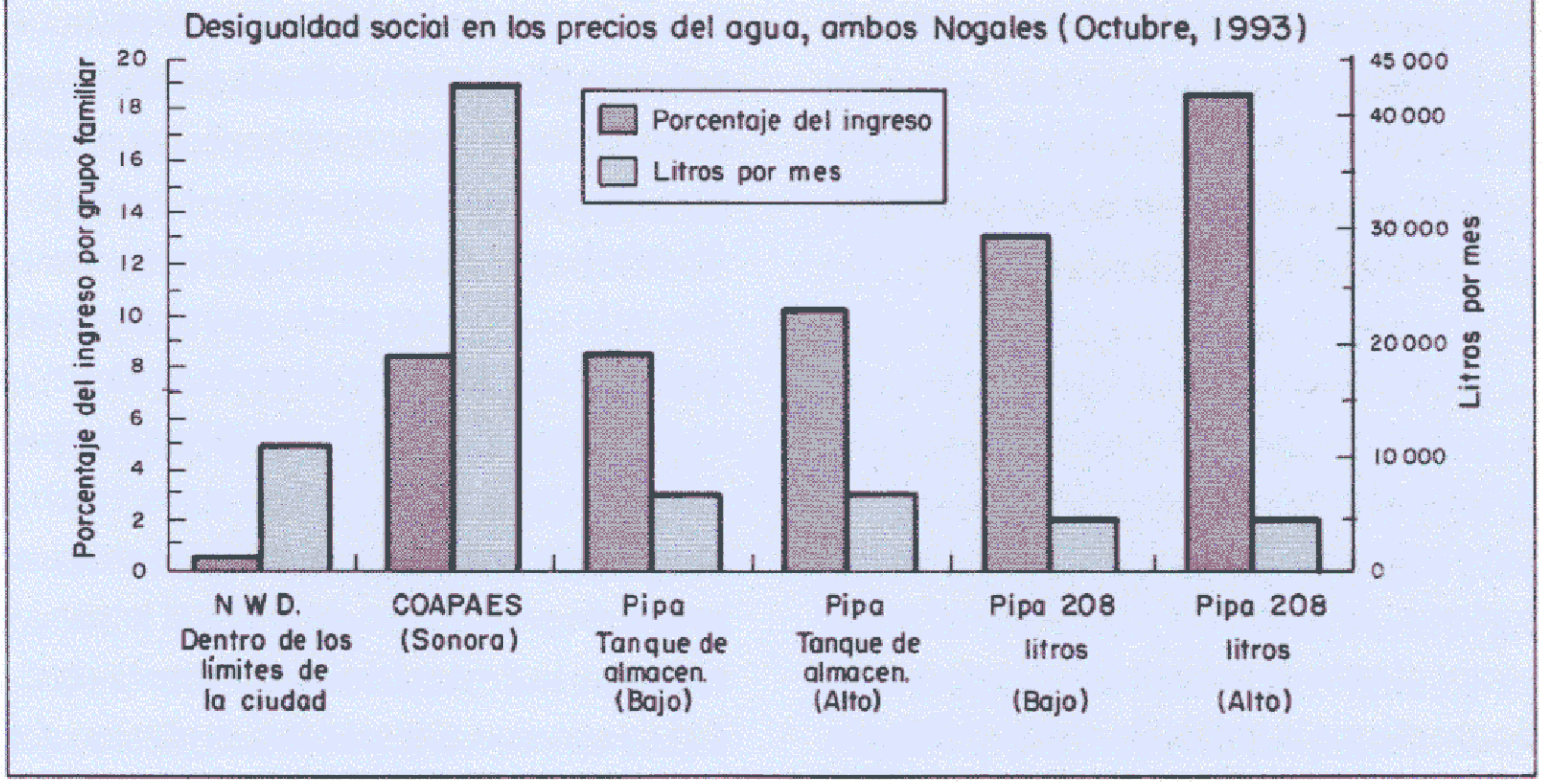
Resumen

En las secciones 2 y 3 se han identificado tres clases de problemas y de posibilidades de solución.

- Con relación a la demanda y la escasez del agua hay dos explicaciones dominantes:
  - El efecto del incremento poblacional, atribuible tanto a tendencias macroeconómicas como a prácticas de planeación de uso del suelo urbano local.

FIGURA 4.3.5

INEQUIDAD SOCIAL EN EL ACCESO AL AGUA EN AMBOS NOGALES (OCTUBRE, 1993)



— El patrón de subsidios a los usuarios, que tiende a alentar el consumo excesivo con relación al costo.

Esta escasez tiene implicaciones directas para la continuación del crecimiento económico y la vitalidad de la región. A medida que el agua escasea, el problema ya no es si se le ha de ahorrar, sino cómo obtenerla más efectivamente con respecto a consideraciones ambientales, de equidad y políticas viables [Frederick, 1993].

- Según las prácticas actuales, las finanzas del sistema son insostenibles.
  - — El costo del agua es ascendente debido a que las fuentes son más caras, las normas de calidad más elevadas, y el mantenimiento y expansión del sistema más demandantes.
  - — Simultáneamente, es improbable que las recaudaciones provenientes de subsidios continúen a niveles históricos máximos. Entre otras razones, porque las grandes reformas fiscales emprendidas en México a escala nacional se proponen devolver las responsabilidades de los ingresos y egresos a las autoridades locales. Esto es consecuencia de la descentralización del sector público. Mucho más que la administración de la demanda, los principios de '*recuperación de costos*' están guiando el comportamiento de los gobiernos locales y autoridades del agua, por igual en los países en desarrollo de todo el

mundo [Katko, 1992]. A causa de factores fuera de su control, de modo sustancial, el sector hídrico está forzado a generar sus propios ingresos, más que anteriormente.

- Efectos de la accesibilidad al agua y su costo, en la calidad de la vida de los habitantes de la ZMVM con bajos ingresos.

Por razones de salud, equidad y desarrollo económico, la reducción de desigualdades debidas a la ubicación geográfica y al nivel de ingreso dentro del área, es obviamente importante. En la sección 3 se evidenció que el acceso al agua de buena calidad varía dramáticamente con la ubicación, y por tanto según el ingreso, como también es el caso del costo real al consumidor (incluyendo costo de tiempo y transporte). La ampliación de la disponibilidad de acceso barato no se limita sólo a la tarifa por litro, sino que también debe reducir el tiempo y el esfuerzo requeridos para disponer de agua potable en casa. Por motivos ambientales y de salud, en áreas de bajo ingreso son necesarios sistemas de suministro y drenaje adecuados.

4.4. Instrumentos de la administración de la demanda

Este capítulo comienza por reconocer que el volumen de agua consumido por cualquier persona o negocio es variable, pues está influido por cierto número de factores. En una vivienda se usa agua para bañarse, beber, limpiar, saneamiento y cocinar. Además, la cantidad consumida en ella depende de la cantidad y la edad de los individuos involucrados, así como de los hábitos personales de cada uno. El volumen utilizado para algunos de estos hábitos, como cocinar y beber, es más bien fijo, en tanto que para otros, como jardinería, lavado de vehículos, o baños dilatados, no lo es. Por otra parte, en una empresa industrial el consumo ocurre principalmente en el proceso de producción. Mientras que una cervecería puede ejercer poco control sobre el volumen de agua requerida para cada botella de cerveza que produce, sí lo puede ejercer, y susbstancialmente, sobre la cantidad de cervezas elaboradas y en el reúso del agua sobrante. Aunque el DDF tiende a pronosticar el consumo en su jurisdicción partiendo de una base fija *per capita* multiplicada por una proyección en línea recta del incremento demográfico [DDF, 1992b], es muy probable que esos pronósticos se exageren de los hábitos de consumo, sea en el hogar o en el negocio. Entre otros factores, se hace caso omiso de la magnitud en que las actitudes, los precios, así como las condiciones imperantes en las viviendas y las instalaciones de plomería, determinan cuánta agua se consumirá efectivamente.

Algunos de los factores que influyen en el consumo individual están bajo control directo e indirecto de la autoridad responsable del agua, y por tanto son instrumentos de política. A la utilización de estos instrumentos para controlar el consumo se le denomina

administración de la demanda. En contraste con las estrategias de suministro, que enfatizan el desarrollo de nuevas y/o mejores fuentes para afrontar los problemas de escasez, la administración de la demanda se orienta a cambiar los hábitos de los consumidores.

A la administración de la demanda corresponden dos categorías de políticas de implementación:

- ***Políticas involuntarias:*** los consumidores tienen relativamente poca intervención en su implementación [Frederick, 1993]. Por medio de ellas se controla directamente el consumo. Generalmente son métodos de comando y control tales como racionamiento, readecuación de instalaciones de plomería, nuevos códigos de construcción, reglamentos de reúso y similares.
- ***Políticas indirectas o voluntarias:*** influyen en los hábitos de consumo pero no los prescriben. Incluyen determinaciones económicas y educacionales que, sin ser obligatorias, estimulan ciertos cambios de actitud. Más frecuentemente, las estrategias económicas se basan en incentivos e inhibidores varios que concientizan a los usuarios del valor social del agua en sus diversos usos. Una de las claves más fundamentales de la administración de la demanda y meollo de muchas de sus opciones es establecer precios realistas. Otra es la conciencia pública acerca del costo real del derroche.

La administración de la demanda proporciona un marco de referencia para guiar los hábitos del consumidor. Así mismo, tiene el potencial para: (a) promover la estabilidad financiera del organismo responsable del servicio, y (b) conducir a un abastecimiento sustentable a largo plazo. Entre sus metas están la preservación, la creación de procedimientos de recuperación de costos, y la redistribución del consumo entre los usuarios para reducir el despilfarro, así como incrementar la equidad. En gran medida, la efectividad de las políticas aplicadas para lograr las metas establecidas depende de las circunstancias de cada caso. En algunas ocasiones, por medio de las políticas involuntarias se obtienen avances a plazos más cortos que con una de reestructuración de precios; en otras, las voluntarias tienen más impacto.[5] En el resto de la presente sección

[5] Aunque muchas de los componentes de un enfoque del uso del agua, desde un planteamiento del ángulo de la demanda, son mundiales, también es cierto que los detalles de cualquier reforma municipal efectiva relativa al agua deben reflejar condiciones y objetivos locales. Considérese un ejemplo de los EUA en 1986, a California empezó a afectarla una sequía, particularmente en las áreas central y septentrional [Shaw, 1992]. Cuando el efecto comenzó a extenderse hacia el sur, las agencias pertinentes establecieron planes de emergencia para reducir el consumo. En consecuencia, las dos ciudades más grandes de esta área, Los Ángeles y San Diego, iniciaron programas de ahorro de agua adicionales a los continuos de largo plazo ya existentes, incluyendo el uso de accesorios eficientes de plomería, rebajas en retretes de flujo ultrabajo, instrucción al público, etc. Las decisiones adoptadas en 1991 en ambas ciudades difirieron. En Los Ángeles el programa fue obligatorio; restringía con rigor el uso externo, establecía horas limitadas para riego de jardines domésticos, prescribía el lavado de banquetas y coche-

se analizan estas opciones en políticas de administración de la demanda de agua.

La formulación de recomendaciones correspondientes a aplicaciones específicas de los intrumentos de la administración de la demanda requieren de análisis detallados para determinar qué políticas son más apropiadas en cada tiempo y lugar. Tales análisis deben incluir una relación de datos acerca de consumo y usuarios, la preparación de pronósticos de necesidades mínimas de consumo, una evaluación de costos y beneficios de prácticas de administración de la demanda y el desarrollo de un plan administrativo a largo plazo [Dziegielewski *et al.*, 1992]. El análisis de los patrones de consumo y los datos que tipifican a los usuarios permiten a los planificadores entender mejor los factores que inciden en el consumo actual, y así pronosticarlo con más precisión. La comparación de prácticas alternas de administración de la demanda hace más fácil identificar, por ejemplo, el impacto relativo a la instalación de retretes de poco volumen de evacuación *versus* cambios en la estructura tarifaria. En el caso de la ZMVM, es claro que no todos los instrumentos de la administración de la demanda son igualmente importantes y que probablemente no es necesario emplear todos ellos a corto plazo o en diferentes partes de la misma.

ras caseras, entre otros, más una sobretasa por exceder un consumo básico. En San Diego este programa fue voluntario, basado en cooperación, publicidad y difusión de información acerca de este ahorro. El resultado fue interesante, pues en las dos ciudades se logró 22%-25% de reducción del consumo.

4.4.1. Instrumentos involuntarios

Medición: Algunos ejemplos de estrategias de comando y control para reducción de la demanda son la medición, la readecuación de instalaciones, el racionamiento de agua, el uso de sistemas duales, la reparación de fugas en la infraestructura. Más que incentivar los buenos hábitos de consumo, estas estrategias implican obligatoriedad. Aunque en México éste ha sido el planteamiento tradicional de la política de agua, a estas estretegias aún restan muchas posibilidades de reforma. La cuantificación del consumo tiene el efecto de hacer más eficiente un sistema municipal de agua y más equitativas sus tarifas. También se ha demostrado que efectivamente reduce la demanda, porque se cobra según el consumo [Banco Mundial, 1992]. En la ciudad de México se hace la medición a sólo el 53% de los usuarios, y no todos los medidores funcionan de manera apropiada. Aparentemente, a muchos de los que sí sirven se les determina su lectura de modo irregular, lo cual resulta en un cobro dispar. Es obvio que la carencia de medidores es un impedimento tanto para la recuperación de costos como para la preservación del agua. Hasta 1991, en el Distrito Federal se habían instalado 712,135 medidores domésticos [DDF, 1992a]. Para lograr la medición plena se tendrían que instalar varios millones adicionales, a un costo total de alrededor de N$ 300. La acción anterior conjunta-

mente con la de un sistema tarifario y de cobro por volumen tiene el potencial para reducir sustancialmente el consumo, porque los usuarios tendrían un incentivo para preservar el agua y, en particular, para evitar su despilfarro. La medición también permite una detección más fácil de fugas en el sistema.

Conservación: aproximadamente el 50% del consumo habitacional ocurre intramuros. De ese porcentaje, el 75% está relacionado con las instalaciones del baño. Así, este último es un objetivo ideal de ahorro de agua. Por ejemplo, comúnmente un retrete normal consume de 19 a 26 litros por evacuación. Usando uno de poco volumen, la cantidad de agua puede disminuir a 13 litros, sin perder efectividad. Una ducha de cinco minutos consume 150 litros. Mediante el uso de regaderas de flujo reducido es posible un decremento de 12%. Por lo tanto, la aplicación de códigos de construcción y plomería que obliguen a usar dispositivos ahorradores de agua puede contribuir en el largo plazo a la preservación del agua.

También la readecuación de varias partes de la infraestructura ayuda al ahorro. La readaptación doméstica implica el remplazo de accesorios y equipo de alto consumo por otros que sean preservadores. Desde un punto de vista de vivienda unitaria, la sustitución de regaderas, retretes y grifos, es relativamente barata; generalmente se amortiza en un año. Mediante las duchas de flujo reducido también es factible disminuir significativamente las cuentas por energía, al disminuir la necesidad de agua caliente. La readecuación al nivel del sistema puede asimismo contribuir a decrementos sustanciales de la demanda.

Reúso y reciclamiento: las aguas residuales municipales, que incluyen las descargas domésticas, comerciales y posiblemente industriales dentro de una comunidad, constituyen la fuente más vasta y generalmente disponible de agua reusable. Ésta ya tratada, representa a su vez una fuente potencial significativa de reúso con gran diversidad de propósitos benéficos. En la sección 2.5 (capítulo 2), se ha discutido ampliamente este tema. La utilización de esta clase de procedimientos es una forma importante de disminuir el abastecimiento de agua nueva y por lo mismo constituye un instrumento conservacionista.

4.4.2. Instrumentos voluntarios

Tal vez los medios de control del consumo más subutilizados en la ZMVM sean los de vía indirecta o instrumentos voluntarios, como las tarifas. En parte, esto puede ser un reflejo de la orientación tradicional que la planeación del sector hídrico ha dado al suministro, con poco uso de los instrumentos de modificación conductual. Sin embargo, instituyendo reformas más bien modestas, es posible reducir significativamente el consumo. Con un mayor énfasis en la política tarifaria, y una mayor atención a principios administrativos básicos

relativos a precios y facturación, se reduciría la demanda y a la vez mejoraría la salud financiera del sistema.

Tarifas: típicamente, los precios del agua se establecen de una de dos maneras: la menos común es por la interacción de la oferta y la demanda; la otra es por decisión administrativa. Aún en economías predominantemente de mercado, a menudo no hay mercado para el agua, sea de extracción o de corriente, puesto que los derechos legales sobre las fuentes mayores rara vez son de propiedad privada. En países menos desarrollados, particularmente donde la carga del costo es un problema para el pobre, también hay resistencia a permitir que los precios de un satisfactor esencial varíen según las condiciones del mercado. En los esquemas existentes de establecimiento tarifario subyacen los decretos administrativos. En este caso, las interrogantes de importancia primaria son: (a) cómo se va a administrar la tarifa, (b) qué tan alta sería, y (c) en qué proporción variaría el precio en el futuro, según los usuarios y las jurisdicciones.

En una política tarifaria hay tres componentes básicos:

- El más familiar en México tal vez sea la de *recuperación de costos*, o la relación directa entre egresos y recaudación. Para que la recuperación de costos sea verdadera, se han de incluir la disposición final del agua usada, el tratamiento de agua y los costos externos relacionados (por ejemplo el hundimiento causado por abatimiento del nivel freático), aunque por lo general no se hace por razones de dificultad de medición.
- La segunda es la demanda, que es distinta a la necesidad. Demanda es simplemente lo que quiere la gente; parcialmente es función del costo. Una necesidad, como quiera que se le defina, comúnmente no depende del costo. La demanda se rige por la relación inversa entre el precio pagado y la cantidad consumida. Ambos están ligados, y para la asignación eficiente de recursos, el precio pagado en cada caso por los usuarios por concepto de extracción, consumo y disposición final debe reflejar los costos marginales.

Generalmente hablando, los recursos escasos se utilizan mejor cuando los consumidores reconocen la totalidad del valor de lo que usan. Esto es lo que mide los costos marginales: el costo en recursos para producir un satisfactor en el margen. Por lo tanto, sin importar lo que el sistema del agua en su totalidad cueste, si el producir un litro adicional en cierto tiempo y lugar cuesta un peso, entonces una estructura tarifaria eficiente debe reflejarlo. Si un consumidor paga menos de un peso por ese litro, él o ella tenderá a consumir en exceso, puesto que está subvaluado. Por ejemplo, las fugas caseras pueden quedarse sin reparar porque el agua es barata, aunque sea absurdo cuando hay escasez.

Empero, los precios concordantes con el costo marginal son un ideal. En una industria con enorme economía de escala, como la del agua, estos precios pueden no recuperar todos los costos; la diferencia es lo que se concede. Lo que sí se logra con precios marginales es que a los consumidores se les envíen indicaciones precisas acerca de cuánta agua consumir y para qué. Cualquier *déficit* resultante se podría enmendar mediante subsidios generales. En la práctica se cobra el costo promedio, menos eficiente pero administrativamente más fácil de implementar. Finalmente, la demanda está ligada al costo del mismo modo que la cantidad suministrada lo está a la demanda. Los costos varían con el volumen producido. Por lo tanto la cuestión es si la demanda, es decir, el precio que la gente está dispuesta a pagar por una cantidad dada, corresponde al costo. La pregunta de si los consumidores aceptan financiar un nuevo sistema de provisión es un ejemplo de cómo ligar el costo con la demanda. Y en efecto, en países en desarrollo ahora la interrogante central que guía la política hacia el mejoramiento de la infraestructura es: ¿la demanda justifica el costo?

- La tercera consideración tarifaria es la *equidad*, que se refiere a la justicia en la distribución de los costos entre viviendas con ingresos económicos diversos.

Dentro de estas limitantes, las tarifas se pueden estructurar de varias maneras. Al respecto, Bahl y Linn [1992] han identificado cuatro categorías:

- Una cuota general para desarrollo, que se puede determinar por: (a) costo del capital para infraestructura, (b) tamaño del predio, (c) longitud del frente, o (d) valor de las propiedades ubicadas dentro del área provistas con servicio de agua. Este cargo se aplica independientemente de si el predio está o no conectado a la red.
- Una cuota general por conexión, cuantificable por el diámetro de la tubería o por características del consumidor relacionadas o no con el uso del agua.
- Un pago periódico fijo, establecido según el perfil del usuario, con o sin referencia al consumo, pero que no varía directamente con él.
- Una aportación periódica fija, definida por el consumo efectivo. La tarifa por unidad volumétrica puede variar según: (a) monto consumido, (b) temporada del año, (c) valor de la propiedad, (d) tipo de consumidor, etc.

En la ZMVM, para usos domésticos, comerciales e industriales los esquemas de precios más comunes son las categorías tercera y cuarta. Para usuarios industriales a veces se aplican la primera y la segunda. En la industria y el comercio es especialmente común la determinación según la cantidad consumida (categoría 4 del esquema anterior), con lo

que el precio se establece a mitad del costo. De modo creciente, a las viviendas también se les está cobrando por consumo efectivo. Sin embargo, la ejecución de la medición y el cobro frecuentemente no se efectúan, al grado que los funcionarios dudan que las estimaciones actuales del consumo sean precisas. A algunos usuarios se les cobra un monto pecuniario fijo, en vez de la cantidad consumida (categoría 3). No cuesta nada cada litro adicional, por lo que el precio efectivo de esta agua suplementaria es cero. En este caso, puesto que para los usuarios no hay un aumento en su valor, la tendencia a es consumirla más. Debido a que su costo es nulo, en muchos otros casos se desperdicia porque se le considera como algo sin valor. Pueden permitir que una fuga en la tubería o en el retrete no se atienda, dejar tirar la que sale de la llave del patio, o lavar el patio y la calle más de lo que lo harían si el agua no fuera gratuita. En un área donde las fuentes hídricas son crecientemente escasas y el costo del abastecimiento futuro seguramente será aún superior al del sistema Cutzamala, hay millones de personas que despilfarran agua, por la única razón de que no les cuesta nada.

Si bien cuando se cobra según lo consumido, pero con base en tarifas subsidiadas, el problema es menos severo, no está del todo ausente. Aunque los consumidores valúan cada litro cuando menos al precio pagado (aproximadamente N$ 3 por metro cúbico para uso industrial), todavía lo estiman en menos de su costo real. Qué tanto menos, depende del grado de respuesta del consumo frente al precio; es decir, la elasticidad de éste con la demanda. En la ZMVM parece no haber estimaciones de tal elasticidad. De cálculos realizados en otros países se deduce que la demanda es moderadamente sensible a cambios tarifarios [Bahl y Linn, 1992; Banco Mundial, 1992). Las soluciones a problemas de agua en la actualidad no deben hacer caso omiso de la necesidad de limitar el consumo y reasignar el suministro en respuesta a condiciones cambiantes de provisión y demanda. La subvaluación del agua para usos como irrigación, disposición final, o consumo doméstico, disminuye el agua disponible para otros usos. También desperdicia la posibilidad de recaudar fondos para el mantenimiento y ampliar las instalaciones de suministro. Limitarla a ciertos usos, independientemente de las condiciones subyacentes de oferta y demanda, se vuelve crecientemente costoso con el transcurso del tiempo.

¿Por qué y cómo deben aumentarse los precios? Un sistema tarifario mejorado reduciría los *déficits* de ingresos, trataría a los *clientes* de manera equitativa, y sería políticamente factible. En los casos en que prevalecen las cuotas fijas, el paso básico sería instituir la medición y empezar el cobro sobre la base del consumo, y reforzar la facturación para todos, excepto los más pobres. El paso siguiente es la elaboración de una estructura de precios y determinar el nivel más apropiado. Como dispositivos de ahorro, los

precios unitarios funcionan mejor cuando una tarifa grava a quienes consumen más en bloques progresivos. Ya se ha demostrado esto, de manera especial si la estructura es clara, y el precio suficientemente alto para captar la atención del público.[6] Actualmente, para usuarios domésticos a los que se ha dotado de medidores, en la ciudad de México se emplea una estructura en bloques progresivos. El más alto equivale a casi seis veces la tarifa básica. El que se logren las metas de preservación, por tal procedimiento, depende en gran medida de si las tarifas son suficientemente altas, de modo que afecten los hábitos de consumo de los usuarios de ingresos más elevados.

El sistema más simple sería una tarifa bipartita [McNeill y Tate, 1991; Bahl y Linn, 1992; Munasinghe, 1992].[7] La primera parte consiste en un cargo fijo, para sufragar los gastos indirectos y la administración. Sería común a todos los usuarios. La segunda sería una cuota constante por litro consumido; se basaría en el costo marginal del suministro, ajustada ligeramente para superar problemas recaudatorios potenciales. Para vencer los obstáculos a los que se enfrentan los consumidores de bajos ingresos, en la porción fija del cargo se podría incluir un pequeño volumen vital de agua, el cual, si el consumo es suficientemente pequeño, permitiría evitar la cuota marginal general.[8]

Este esquema sugerido satisface los principales criterios tasadores exitosos, anteriormente enunciados: recuperación de costos, eficiencia y equidad. Suponiendo que todos los factores de los costos se contabilizaran, esto permitiría su recuperación total. Puesto que –para el desarrollo de medios de abastecimiento de agua– aquéllos se reflejarían íntegramente en los precios, el consumidor recibiría señales precisas acerca del valor del recurso en usufructo, y motivaría su uso racional. Mediante la inclusión del volumen vital y el logro de mayor pago en proporción al consumo, este sistema de precios satisfacería el criterio equitativo básico.[9]

[6] Whittington (1992) discute los efectos en la equidad de una estructura tarifaria en bloque creciente cuando en muchas viviendas donde hay bajos ingresos se comparte un grifo sujeto a medición.

[7] A los lectores interesados se les recomienda consultar los trabajos de Bahl y Linn (1992) y de Munasinghe (1992), para discusiones detalladas sobre la relación de cada parte de la tarifa con componentes alternos de costos promedio y marginales de suministro, y para otras consideraciones teóricas y prácticas en la elaboración de tarifas, no atendidas aquí por razones de espacio.

[8] Los problemas de equidad se tratan otra vez en la sección siguiente, en *implementación*, en la sección relativa a viviendas.

[9] En la práctica, Bahl y Linn (1992) mencionan varios refinamientos que se podrían requerir para esta estructura, dos de los cuales son más relevantes para la ZMVM. Éstos incluyen las variaciones espaciales inter- e intraurbanas en los costos para ambas partes de las tarifas, como en el terreno en pendiente, lo que permite guardar las apariencias "estableciendo tarifas *vitales* para usuarios domésticos y conminando a todos los grandes usuarios, especialmente a las empresas industriales y comerciales, a cambiarse al sistema público". Agregan que el nivel real de las tarifas se mantendría mediante una actualización periódica que refleje los cambios en costos reales.

Sin embargo, las cuestiones involucradas en la obtención de agua en casa o en el negocio, son algo más que costos, beneficios y equidad. Posteriormente al uso, la mayor parte del agua se convierte en cloacal, drenaje, u otra modalidad de desecho, y el costo de su remoción es componente medular del sistema completo de abastecimiento. Para los propósitos de la política de precios, es útil distinguir entre tres tipos de servicio de desagüe particular: (a) doméstico conectado a un sistema de alcantarillado; (b) doméstico en el que se emplean otros métodos de eliminación, como fosas sépticas o drenaje simple, y (c) industrial [Bahl y Linn, 1992]. Para usuarios a los que se ha medido el suministro, la tarifa por alcantarillado reflejaría similarmente los costos marginales inherentes, más una cuota fija. A los que emplean métodos baratos de disposición final se les cargaría parte del costo de modernización (donde ésta sea apropiada). A los industriales se les cobraría también con base en los gastos por tratamiento y disposición final, que variarían según la índole de su agua residual. Así, las tarifas diferirían por la categoría del desecho.

Conciencia pública: adicionalmente a la política tarifaria, en la conservación tienen asimismo una función importante que desempeñar la educación y la conciencia del público. Al respecto, un programa bien elaborado puede lograr una reducción sustancial en la demanda.[10] Sin embargo, en la mayoría de los adultos están profundamente arraigados los hábitos de despilfarro concernientes al consumo. En años recientes, la autoridad responsable del agua en el DF estableció una sección supervisora del uso eficiente de este recurso; ahora cuenta con un laboratorio para probar la efectividad de los aparatos ahorradores de agua, publicaciones relativas a la preservación de ésta, y un programa imaginativo y vigoroso de *policía del agua* a cargo de niños de cuarto y quinto grados para descubrir fugas. En la ciudad de México hay numerosos mensajes en los medios de difusión que conminan a la población a cuidar los preciados recursos hídricos. En el caso de la ZMVM, aún no es evidente el grado de aceptación que las campañas informativas han tenido en el público. A éste se le ha sometido a muchas campañas de índole variada, y el medio puede estar saturado. Además, si van a preservarlos consciente y concienzudamente, la gente debe entender la esencia del problema.

4.5. Medios de implementación

Hay bastante diferencia entre opinar acerca de una mejor manera de hacer las cosas y

[10] Por ejemplo, en 1976, Tucson, Arizona, empezó una campaña "Bate el Pico" de ahorro de agua. Inicialmente dirigida a preservarla durante el verano entre las 16:00 y las 20:00 horas, pero con el transcurso de los años el enfoque se cambió a medida que los consumidores se hicieron más sofisticados al respecto. El consumo diario actual (1994) por persona es de aproximadamente 587 litros, evidentemente menos que los 757 litros de 1975 —una reducción de 22% [comunicación personal de Suzanne Jameson, Public Information Officer, Tucson Water].

hacerlas. Por ejemplo, si bien las tarifas crecientes tienden a desalentar a muchos usuarios de consumo excesivo, no se está exento de inconvenientes. Los incentivos pecuniarios operan sólo cuando se cuantifica el consumo; en parte, la decisión en torno a si sí o no se mide es un problema administrativo. La promoción de un *status* más elevado para profesionales en ciencias sociales dentro de los organismos del agua reforzaría sus opiniones referentes a si se han de cambiar, y cómo, los procedimientos y las tarifas. Más allá de estas cuestiones, cualquier política de precios es efectiva sólo si: (1) se administra capazmente, lo cual, con el fin de hacer estimaciones realistas de costos y de verificación del funcionamiento, requiere mucha capacidad en los procedimientos de: a) costos; (b) elaboración de presupuestos, y c) contables; y (2) se emprenden acciones adecuadas contra los evasores. Finalmente, los programas más efectivos de ahorro doméstico de agua han combinado incrementos tarifarios con campañas publicitarias que refuerzan el mensaje acerca de la necesidad de preservarla.

4.5.1. Usuarios domésticos

Cualquier discusión referente a la dificultad de implementar políticas administrativas en el suministro del agua para las viviendas aborda los temas de equidad y de eficiencia.

Equidad: a menudo ésta es la consideración más atendida; causa mucha preocupación que el pobre lleve una carga injusta, cuando los precios reflejan más fielmente los costos. En todo el mundo las tarifas tienden a reflejar esta preocupación. Además, se arguye que las estrategias para la preservación que afectan el aumento de precios gravitan demasiado sobre el pobre, que no está en condiciones de pagar más. Una segunda preocupación es que, cuando se llega a decisiones concernientes a la calidad del agua y expansión de los sistemas de distribución, con frecuencia se marginan áreas y usuarios de bajo ingreso. Menos comúnmente se observa que, de modo especial en países en desarrollo, ambas implicaciones están ligadas al papel fundamental de la recuperación de costos en las prácticas modernas de inversión en el sector hídrico. Aun en los casos en que la retórica gubernamental adjudica mayor importancia a la extensión de servicios adecuados y accesibles al pobre, es menos probable que éstos se amplíen hacia—o se mejoren en—áreas que no pueden financiarlos. Esto se apoya en la sabiduría convencional de que la inversión en la infraestructura de tales zonas se debe financiar mediante subsidios, ya que, por ser una opción poco viable, se rechaza el autofinanciamiento. Tales temores no sólo son en gran medida infundados, sino que pueden socavar los esfuerzos para expander la red de conexiones domiciliarias y el sistema distributivo en su totalidad.

Está bien documentado que, si es necesario, en países en desarrollo el pobre está dispuesto y en capacidad para pagar su parte con el fin de obtener agua de buena calidad

[Okun, 1991; Banco Mundial, 1992; Whittington y Choe, 1992; Crane, 1994]. En las ciudades grandes del mundo en desarrollo donde el pobre tiene acceso limitado a fuentes confiables de agua limpia, en general la investigación ha documentado cómo (1) ahora paga mucho más que otros habitantes de esa ciudad, y (2) estaría más que deseoso de pagar el costo total de un sistema municipal de distribución que la hiciera llegar al interior de su domicilio [Roth, 1985; Banco Mundial, 1992; Whittington y Choe, 1992; Ingram *et al.*, 1994]. Normalmente, en la mayor parte de los casos el pobre se beneficiaría con una estructura de precios que mejorara su acceso al agua. La no provisión de obras hidráulicas necesarias al citadiano pobre con base en el argumento de que los fondos son escasos y probablemente no se recuperarían, es una política que perjudica al pobre y no está apoyada en la evidencia. Si las obras hidráulicas necesarias no se construyen porque se considera que son demasiado costosas, entonces lógicamente el citadino pobre estaría mejor si se contruyeran y su costo se cobrara a los usuarios.[11]

Eficiencia: colateralmente a los problemas de equidad, los obstáculos de implementación en el sector doméstico incluyen la resistencia general de los no pobres a las tarifas, las dificultades prácticas inherentes a la elaboración apropiada de aquéllas por bloques, y la implantación de la medición. Por sí mismas, la impopularidad de precios sustancialmente más altos y la ejecución más rigurosa del cobro son los problemas institucionales y administrativos más difíciles de resolver en el sector doméstico. Ya en la práctica, el establecimiento de nuevas tarifas es un asunto complejo y delicado. Es axiomático que cuando a la gente se le pregunta cuánto querría pagar (por cualquier cosa), invariablemente responde que nada. Sin embargo, la mayoría comprende que bajo tal esquema el sistema no puede sostenerse por sí mismo, y que por algunos satisfactores, tal vez casi todos, se debe pagar algo. Por ejemplo, esto es crecientemente cierto del aire que se respira, en México y en cualquiera otra parte. Para mejorar o aún mantener su calidad, sería necesario pagar más por la gasolina, usar menos los vehículos automotores, así como aceptar muchos otros inconvenientes y gastos. Como condición para emprender mejoras, la gente debe haber establecido el vínculo entre el costo de aire limpio y su propia responsabilidad para sufragarlo. En el caso del agua, con el tiempo la idea de precios realistas llegará a ser aceptable, particularmente una vez que la vinculación entre calidad, disponibilidad y tarifas se comprenda mejor y se comience a percibir que otras opciones son más caras, o peores, por otros motivos. Por lo tanto, la tarea

[11] Jiménez (1989) trata con algún detalle los temas relativos a precios de servicio social en países en desarrollo. En relación con esta discusión, son tres los puntos principales: 1) El patrón existente de subsidios no se dirige hacia el pobre; 2) donde sean necesarios y útiles, los subsidios pueden dirigirse de manera más efectiva mediante precios diferenciales en lugar de tarifas uniformes; y 3) cuando es factible, los subsidios se aplican más efectivamente con base en las características del consumidor.

es educar al público y convencer a los políticos acerca de estos hechos. La diferencia que aquí se enfatiza es entre lo que uno quiere y lo que está dispuesto a pagar. No hay duda que la gente está dispuesta a pagar por agua buena —de muchas maneras ya lo hace, especialmente en áreas donde la distribución es privada. Entonces, el problema es cómo enseñar a los consumidores que tienen pocas opciones de largo plazo, como no sea el cubrir íntegramente el costo.

También para realizar la medición del consumo hay dificultades. Por ejemplo, no es aconsejable hacerla en la totalidad de la ZMVM. Adicionalmente al costo de capital básico de los hidrómetros, el relativo a su implementación es alto, pues consiste en instalación, lectura periódica, mantenimiento, facturación y contabilidad [Bahl y Linn, 1992; Buenfil, 1993]. Los beneficios de esa operación se deben comparar con sus costos. En los casos de grandes usuarios y empresas lucrativas, casi siempre es conveniente. En los de consumidores en pequeño, en áreas poco desarrolladas y de bajos ingresos, probablemente no es aconsejable a corto plazo.

4.5.2. Usuarios industriales

La experiencia tanto en países industriales como en desarrollo muestra que el potencial de una política de costos efectivos es mayor en la industria que en otros sectores. Cuando comparativamente la industria no es gran consumidora, frecuentemente sus plantas se ubican en áreas urbanas, independientemente de que ahí el consumo de agua esté creciendo más aprisa. Su precio por unidad volumétrica debe ser más alto que para el doméstico, debido principalmente a que —por lo general— las erogaciones por tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria son más elevadas. Además, los empresarios industriales tienden a ser actores racionales que responden rápidamente a incentivos económicos y reglamentarios. Tanto en países industrializados como en los que están en desarrollo, la experiencia ha demostrado el potencial que posee la industria para usar el agua más sensatamente y con mayor eficiencia de costo. En muchos casos, los egresos crecientes por tratamiento de aguas usadas o la necesidad de efectuar un pretratamiento antes de descargarlas al sistema de alcantarillado público, son motivo suficiente para que las industrias inicien un programa de preservación. Se espera que, en los EUA, para el año 2000, los insumos de agua nueva de la industria fabril sean 62% inferiores a los de 1977, principalmente debido a los costos crecientes que se gastan para eliminar el agua usada. En San Pablo, Brasil, la imposición de cargos por efluentes indujo a tres plantas industriales a reducir su demanda entre 42 y 62% [Banco Mundial, 1992]. En la ZMVM, el sector industrial es un blanco particularmente atractivo para el ahorro de este recurso, pues —en relación con el consumo— la cantidad de usuarios es bastante pequeña: sólo el 5.3% de los usuarios mayores [DDF, 1992b]. Asimismo, a causa de que a menudo

éstos consumen relativamente mucha agua, se les puede persuadir para que usen la reciclada, especialmente si se les vende más barata que la potable.

Ciertas ramas industriales demandan mucha agua en sus procesos de producción, así como para enfriamiento, lavado de equipo, riego de áreas verdes y aseo. Comúnmente el ahorro de agua para riego y aseo se puede lograr mediante la implementación de los mismos métodos utilizados para usuarios domésticos y comerciales. En el caso de los fabriles, a menudo la demanda se puede reducir recurriendo a: (1) cambio de procesos de producción, o incluso conversión a operación en seco; (2) segregación de agua usada y práctica de reciclamiento y reúso; (3) conversión, a sistemas cerrados, de las operaciones uniutilitarias de enfriamiento mediante agua; (4) uso de operaciones de enjuague y lavado a contracorriente; (5) reducción cuantitativa del agua para equipo de limpieza; (6) uso de agua refrigerante para limpieza, irrigación, etc., y (7) corrección de pérdidas incidentales por fugas en equipos y sistemas de distribución. Dando un precio suficientemente alto al agua, la implementación de tales prácticas de ahorro puede ser económicamente atractiva para la industria.

4.5.3. Obstáculos institucionales y administrativos

A causa de que casi dondequiera el agua es un problema de gran connotación política, los gobiernos tienen dificultad para ahorrarla; mucha gente la considera esencial para la vida y piensa que las autoridades están obligadas a aportarla a la población a bajo o ningún costo. Por lo tanto, se necesita una gran determinación para elevar los precios y hacer efectivo el sistema de adjudicación, medición, y las sanciones orientadas a reducir la demanda [Banco Mundial, 1991; Bahl y Linn, 1992]. Además, cuando el suministro no es confiable y la gente no recibe agua o la presión es demasiado baja durante mucho tiempo, ésta se resiste a pagar sus adeudos [Ingram *et al.*, 1994].

Política regional: el agua es también un elemento importante de la política regional. Las regiones –y ciudades comprendidas dentro de ellas– compiten entre sí por el crecimiento y la inversión, y se oponen a la limitación de cualquier recurso fundamental para el desarrollo, como el agua. A menudo se exageran las cifras de incremento demográfico de manera que regiones particulares puedan obtener partidas más grandes del presupuesto nacional y subsidios para desarrollar la infraestructura, como sistemas de abastecimiento de agua, alcantarillado y carreteras. A medida que las inversiones fluyen hacia regiones particulares a expensas de otras, la emigración hacia ellas aumenta al mejorar sus servicios. Ciertas regiones y ciudades se erigen en centros de poder e influencia, en tanto que otras decaen en importancia. La pugna interregional por el agua es parte de una contienda geopolítica más grande. A

causa de que la preservación del agua reduce el perfil de una región, se vuelve una estrategia políticamente poco atractiva. Pero, en México, las inversiones propuestas para el subsector del agua en el presupuesto federal de 1992, parecerían indicar que la enorme participación de la ZMVM, característica habitual de las políticas seguidas, puede estar declinando, mientras que a otras ciudades y áreas rurales se les está prestando mayor atención (Tabla 4.2.1).

Política organizacional: las doctrinas organizacionales de las dependencias locales encargadas del suministro y drenaje de agua predisponen a los organismos a la construcción de obras, más que a la administración de la demanda [Ward, 1990; Ostrom *et al.*, 1993]. Por tradición, y a veces por ley, se exige que estos organismos, al menor costo posible, satisfagan la demanda de todos los habitantes. Cuando éstos no tienen que pensar acerca del agua, por ejemplo si pueden abrir la llave en el momento que quieran y usar tanta como les plazca a un costo insignificante; los profesionales de dichos organismos sienten que están cumpliendo su labor. Los incrementos en el costo del servicio y la reglamentación del consumo crean controversias indeseables. Salvo que los organismos puedan prometer que eventualmente la preservación del agua le ahorrará algún dinero al usuario, el ahorro se vuelve una cuestión políticamente desagradable. Cuando las tarifas están muy subsidiadas y el financiamiento de nuevas fuentes proviene de medios que no son los pagos de los usuarios el argumento de reducción de costos carece de fuerza.

Debido a que en el pasado, por una parte, existía un alto nivel de centralización operacional, y por otra una separación entre la responsabilidad operacional y la del establecimiento y cobro de cuotas, en la ZMVM los incentivos organizacionales no han funcionado para mejorar la preservación. Además, la eficiencia con la que el organismo operó fue crítica para el *status* o el financiamiento de la DGCOH. Una razón para crear de la Comisión de Aguas del DF, en 1992, fue la de cambiar estos incentivos organizacionales [CNA, 1992; también capítulo 5 de este volumen].

Personal: en el Programa de Uso Eficiente del Agua, que ha recibido una atención creciente en el Distrito Federal, los supervisores de nivel medio encargados de su coordinación tienen la designación de ingenieros [DDF, 1992b]. Generalmente, el entrenamiento profesional de los ingenieros hidráulicos, que son los más abundantes en los organismos pertinentes, refuerza la preferencia por desarrollar nuevas fuentes de abastecimiento, en detrimento de la administración de la demanda. Los ingenieros están entrenados para construir, y para ellos es mucho más atractivo elaborar proyectos y ejecutar obras que manipular preferencias y hábitos del público.

Las oficinas de preservación, cuando existen, tienden a integrarse con los ingenieros (como en México, DF). Si se emplea a

economistas u otros profesionales de ciencias sociales, a menudo es a niveles bajos en la jerarquía del organismo. Además, a estas oficinas se les asignan relativamente pocos recursos, y tienen poco *status* en la organización.

4.5.4. Capacitación

Para la implementación de cualquier programa nuevo, hay que considerar asimismo costos administrativos y organizacionales los cuales se aplican igualmente a los planes de preservación [Okun y Lauria, 1991]. Los programas de administración de la demanda afectan a varios grupos diferentes, entre los que se incluyen los organismos administrativos y los consumidores. Todos los costos y beneficios deben evaluarse como parte del análisis de factibilidad de cualquier programa.

Un componente fundamental de tal análisis es la evaluación de incentivos y desincentivos a los que se enfrenta cada autoridad local relacionada con el agua. Los incentivos incluyen mayor capacidad de abastecimiento, y de este modo inversión y costos operacionales disminuidos. Los posibles desincentivos comprenden reducción de ingresos, necesidad de ajustes tarifarios más frecuentes, y aumento en la dificultad para pronosticar la demanda futura. Tales efectos existentes en cualquier estrategia de preservación –particularmente la formulada en los más altos niveles del gobierno– de los organismos locales encargados del agua, necesitan atenderse, si se espera que éstos se aboquen tanto a la teoría como a la práctica de mayor eficiencia en el uso del agua.

La aplicación práctica de recuperación de costos requiere también que haya capacidad técnica y administrativa para operar eficientemente un sistema de precios [Bahl y Linn, 1992; Ostrom *et al.*, 1993]. Esto reclama una lectura razonablemente precisa del suministro a cada consumidor que se factura por separado. Así, la instalación inicial de los medidores (hidrómetros) se debe respaldar por un sistema adecuado de mantenimiento y reparación (que incluya su recalibración a intervalos apropiados). Asimismo, se les ha de tomar lectura con una frecuencia bien definida. Posteriormente, con la menor demora posible, es menester preparar y enviar las facturas. Finalmente, se necesita hacer efectivo el pago de las cuentas dentro de un tiempo razonable, con penalización genuina por pago extemporáneo y una sanción final de corte del servicio, excepto en casos vitales. En ausencia de esta capacidad administrativa y técnica, cualquier intento de cobro por volumen de consumo casi seguramente demostraría ser una pérdida de energía. En tales circunstancias, es preferible buscar soluciones más simples para sufragar algunos o todos los costos de abastecimiento.

Es oportuno repetir dos consideraciones: (1) las oficinas de preservación deben recibir los recursos que necesitan para ser eficaces, lo cual incluye los fondos indispensables para atraer a personal calificado –los de las disciplinas de ciencias sociales merecen mención es-

pecial, por las razones ya expuestas. Si dentro de la organización se les confiere suficiente *status*, éstos tienden a quitarle comando y control a la política relativa al agua, y conducirla hacia la administración de la demanda; (2) para tener capacidad de promover los programas de administración de la demanda por encima de intereses atrincherados, la ingerencia de las propias oficinas de ahorro del agua debe incrementarse dentro de los organismos jurisdiccionales. En parte, tal incremento operativo se derivará del calibre y del profesionalismo del personal de esas oficinas.

4.5.5. Iniciativa de privatización en el DF

Recientemente, el DF adoptó una nueva estrategia de abastecimiento orientada hacia la demanda, lo cual representa un cambio algo radical en las prácticas administrativas pasadas. En julio de 1992, el gobierno federal creó la Comisión de Agua del Distrito Federal, dentro del DDF. Sus responsabilidades comprenden agua potable, drenaje, y tratamiento y reúso de aguas residuales. Se seleccionaron dos áreas de mayor atención: a) facturación universal del consumo, y b) mejoras en la infraestructura de distribución del agua. Lo anterior requerirá, para cada cuenta de consumo, mejorar la determinación del agua consumida, así como aumentar la efectividad en el cobro. Esto último implica un gran financiamiento.

Ya se tomó la decisión de invitar al sector privado a participar en estas tareas. La infraestructura continuará siendo gubernamental; las empresas privadas tendrán la responsabilidad gerencial y financiera para suministrar el servicio a niveles que se medirán por su desempeño. Por lo tanto, esencialmente el gobierno está contratando al sector privado para responsabilidades administrativas seleccionadas, con la diferencia de que cada empresa corre ciertos riesgos financieros. Los componentes principales del plan incluyen el mejoramiento de los sistemas de distribución y medición, así como la firma de contrato estimulantes, de plazo relativamente corto, para asegurar eficiencia y competividad.

El interés en la privatización está motivado por: (1) la creencia de que, con respecto a los organismos públicos, el sector privado a veces tiene mejor acceso al capital de inversión, y (2) su potencial para mejorar la eficiencia gerencial. La privatización en el sector hídrico tiene precedentes en Francia y Gran Bretaña, aunque dentro de marcos bastante diferentes. Empresas francesas de ingeniería reconstruyeron y rehabilitaron varios grandes sistemas de agua después de daños bélicos severos. Ahora éstos proporcionan el servicio a más del 75% de la población francesa; muchos los consideran los primeros ejemplos de operaciones eficientes e innovadores [Roth, 1985; Moraru-de Loé y Mitchell, 1993]. La clave del sistema francés es la separación de la propiedad respecto de la administración. En sentido amplio, los activos (contables) referentes al agua pertenecen al sector público, y las compañas privadas no son más que administradoras de tales activos, y —en gran

medida– depositarias de los riesgos. Generalmente, las compañas trabajan mediante contratos negociados individualmente con 36,000 municipios. La duración de estos contratos varía según la cantidad de dinero invertido en la infraestructura. Si los clientes están insatisfechos con el agua, pueden responsabilizar a los políticos municipales. El sistema contractual confiere a los municipios franceses considerable poder sobre las compañías. Sistemáticamente se renegocia para mejorar la calidad del agua y abatir precios, pues un municipio descontento puede conceder el contrato a otra compañía. Esto elimina algo del aparato regulatorio necesario en los sistemas de propiedad privada de servicio de agua, con exclusividad a largo plazo. Por otra parte, las plantas de agua británicas tienden a ser privadas; en vez de tener que competir periódicamente por contratos, se les adjudican monopolios locales [Moraru-de Loé y Mitchell, 1993].

Así, la privatización se define de modo diferente en escenarios diversos, y no ofrece una panacea a las dificultades de servicio público. Por ejemplo, para una localidad, las ventajas potenciales de una administración a la francesa comprende bajas cargas financieras, reducción de gastos administrativos, y la oportunidad de aprovechar más rápido las innovaciones tecnológicas, con lo cual se mejoran la confiabilidad en el servicio y la calidad del agua. Las desventajas comprenden la pérdida del control directo para muchas de las autoridades municipales de la calidad ambiental, y la percepción pública de que hay ganancias privadas generadas por el aprovechamiento de un recurso público. No obstante, muchas de estas desventajas se pueden superar mediante una negociación adecuada de los contratos y la educación del público.

El 13 de octubre de 1992, en el DF se publicó una convocatoria dirigida a empresas privadas para realizar la distribución y la facturación del agua en la ciudad. Los contratos firmados con las compañías ganadoras están estructurados en tres etapas: (1) actualización del registro de clientes e instalación de medidores; (2) facturación según el consumo; (3) la responsabilidad de empresas privadas sobre el mantenimiento y la reparación del sistema de distribución. En las etapas uno y dos, al contratista se le remunerará según tareas específicas, como instalación de medidores o emisión de facturas. Sin embargo, en la etapa final la ciudad venderá el agua en gran volumen a los contratistas, y éstos a su vez la revenderán a los consumidores finales. En este punto, las firmas privadas se harán cargo de la operación y del mantenimiento del sistema distributivo, y: 1) si no logran cobrar los adeudos mermarán sus ingresos, y 2) incurrirán en pérdidas por fugas. El precio de venta del agua a los contratistas se determinará después de que haya transcurrido un periodo de operación bajo un sistema de *pago por tarea*; la idea es reducir la incertidumbre, tanto para la ciudad como para los contratistas.

Una característica distintiva de este esquema es que la ciudad se dividió en cuatro *zonas*, por las cuales se asignaron contratos a otras tantas empresas diferentes. Así, durante el periodo de los convenios iniciales habrá cuatro empresas en operación.

Según este documento, los contratos se adjudicaron a un consorcio de compañías mexicanas y empresas francesas, americanas e inglesas. Es interesante hacer notar que, de los cuatro contratos asignados, dos fueron a consorcios con participación mayoritaria de las dos más grandes compañas francesas dedicadas al agua.

En la actualidad, el DF estima que este sistema de facturación y de lectura del consumo reducirá en 30 o 40% las necesidades de agua en la ciudad, en parte por la reparación de las fugas, y en parte mediante la reducción del consumo que se espera obtener como resultado de tarifas más altas.

En cooperación con las autoridades del agua, los industriales también han contribuido con soluciones particulares a la preservación. En 1989, un grupo de compañías del área de Vallejo, de la ciudad de México, buscó una alternativa para el servicio aportado por este organismo público. Veintiséis de ellas organizaron una nueva empresa no lucrativa: Aguas Industriales de Vallejo, para rehabilitar una anticuada planta municipal de tratamiento de aguas residuales. Cada compañía participante contribuyó proporcionalmente a sus requerimientos La compañía opera con una concesión gubernamental de diez años, y abastece de agua restituida a las empresas integrantes de la sociedad, a un costo estimado de 75% del precio del agua potable suministrada por el organismo público. Por supuesto, la potable se destina a otros usos [Banco Mundial, 1992].

4.6. Observaciones finales

Repetidamente se ha demostrado que, aun con los programas más simples de preservación del agua, el consumo se puede reducir de 20 a 30%, sin afectar sustancialmente el bienestar de los habitantes ni los negocios. Esto se logra principalmente introduciendo incentivos o tecnología que genere los mismos servicios con menor cantidad de agua. Por ejemplo, los programas que pretenden reducir la demanda dentro de una comunidad podrían comprender: (a) instalación y uso de aparatos ahorradores, como retretes de poca capacidad y duchas (regaderas) de bajo flujo; (b) restricciones a los usos no esenciales, como lavado de vehículos, riego de jardines domésticos, lavado de calles, irrigación de parques y otras áreas verdes; y (c) eliminación de pérdidas excesivas durante el tratamiento y la distribución. La medición del consumo a cada usuario doméstico, institucional, comercial e industrial de un sistema público de suministro puede también reducir efectivamente la demanda, particularmente si se acopla con una estructura tarifaria que contenga incentivos para reducir el consumo, como es el sobreprecio por consumo excesivo.

En años recientes, los funcionarios responsables del agua en la ZMVM han establecido metas de mejor gestión, que incluyen administración de la demanda efectiva, y han dado pasos importantes hacia el cumplimiento de estas metas. Se realizaron reorganizaciones para descentralizar e integrar mejor las funciones, y se han cambiado las estructuras de precios; empero –tal vez lo más importante–, los funcionarios han expresado la intención de enfrentarse al crecimiento urbano, que ha provocado muchos de los problemas del agua. En el documento titulado "Agua 2000", el jefe del DDF hizo un reconocimiento oficial sobre la necesidad de controlar el crecimiento y mantener a la población fuera de las áreas de recarga y establecerla donde existe infraestructura [DDF, 1991a]. Adicionalmente se ha reconocido la necesidad de cambiar algunas concepciones de la cultura popular concernientes al agua.

Éstos son pasos en la dirección correcta, pero es evidente la importancia de reformas ulteriores. En años recientes, los costos financieros y ambientales del consumo de agua en la ZMVM se han elevado agudamente, y continuarán en ascenso, pues a corto plazo la demanda amenaza rebasar la oferta. Como Frederick [1993] expresa solamente la magnitud y la índole de estos costos están en duda. Cuando el agua se tasa demasiado bajo y su adjudicación se restringe por ley y tradición, la mayoría de los costos se refleja en un uso ineficiente del agua, pérdida de oportunidades de desarrollo, y costos más elevados tanto para nuevos usuarios como para los pobres. Cuando se puede usar libremente para la disposición final de desechos, la mayor parte de los costos pagados por la sociedad adoptan las modalidades de ecosistemas deteriorados y problemas vinculados con el suministro contaminado. Por otra parte, cuando se usa más eficientemente se aseguran los usos de valor más elevado, un abastecimiento adecuado y la región deriva mayores beneficios netos de sus escasas provisiones de agua. La administración de la demanda –que incluye transferencia de agua entre usos alternos en respuesta a condiciones cambiantes de suministro y demanda, introduciendo incentivos apropiados para preservarla y proteger su calidad– provee un medio de control de la magnitud y de la índole de estos costos a me-dida que el agua escasea crecientemente.

Al suceder esto, aparentemente en muchas situaciones, utilizar más los precios para repartir y proteger la provisión, ofrecería grandes ventajas. Pero aunque los precios sean los dispositivos principales para administrar la demanda, todavía el gobierno conserva una función importante en la definición y en hacer efectivos los derechos de propiedad, en el sostenimiento de la salud y de los derechos de terceros, y en la reglamentación de precios y utilidades de abastecedores monopólicos. Además, para evitar decisiones conflictivas e inversiones ineficientes, se requiere de una planeación de los recursos hídricos que abarquen cuencas completas.

Bibliografía

Bahl, Roy W. y Linn, Johannes F., *Urban Public Finance in Developing Countries*, Oxford University Press (editado para el Banco Mundial), Nueva York, 1992.

Bläsig, H. H. y Juárez, R. A., "Water supply for Mexico City", en *Journal of Water SRT-Aqua*, núm. 39, 1990, pp. 79-85.

Brookshire, David S. y Whittington, Dale, "Water resources issues in the developing countries", en *Water Resources Research*, núm. 29,1993, pp. 1883-1888.

Buenfil, Mario, *Household water metering and tariffs*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México, 1993.

Caimcross, Sandy, "Water supply and the urban poor", en Hardoy, Jorge E., Caimcross, Sandy y Satterthwaite, David, *The Poor Die Young: Housing and Health in Third world Cities*, Earthscan Press, London, 1990, pp. 109-126.

Comisión de Aguas del Distrito Federal, *Licitación para la prestación de servicios relacionados con el servicio de agua potable y drenaje en el Distrito Federal*, DDF, México, 1993.

Comisión Nacional del Agua, "Situación actual del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento", Gerencia de Información y Participación Ciudadana, México, 1992.

Contreras-Domínguez, Wilfrido, "El agua, recurso renovable", en Puente, Sergio y Legorreta, Jorge (eds.), *Medio ambiente y calidad de vida*, DDF, Plaza y Valdés, México, 1988.

Correa-Camacho, Luis A., "Grupo sobre calidad del agua en la ciudad de México", DGCOH, DDF,1992 (mimeografía).

Crane, Randall, "Water markets, market reform, and the urban poor: Results from Jakarta, Indonesia", en *World development*, núm. 22, 1994.

DDF, "La ciudad de México en números", Dirección General de Reordenación Urbana y Protección Ecológica, México, 1987a.

———, *Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, 1987/88*, México, 1987b.

———, *Agua 2000: Estrategia para la Ciudad de México*, México, 1991a.

———, *Memoria: Programa de Uso Eficiente del Agua*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras, 4a. ed., México, 1991b.

———, *Memoria: Programa de Uso eficiente del Agua*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras, 3a. ed., México, 1992a.

———, *Compendio*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), Secretaría General de Obras, 1a. ed., México, 1992b.

Dziegielewski, B.; Optiz, E.; Kiefer, J. y Baumann, D., Evaluating Urban Water Conservation Programs: A Procedures Ma-

nual, California Urban Water Agencies, Sacramento, 1992.

Falkenmark, M. y Suprapto, R. A., Population-landscape interactions in development: a water perspective to environmental sustainability", en *Ambio*, 21: 1, 1992, pp. 31-36.

Frederick, Kenneth D., "Balancing Water Demands with Supplies: The Role of Management in a World of Increasing Scarcity", en *World Bank Technical Paper*, núm. 189, The World Bank, Washington, 1993.

García-Lascurain, María, "Calidad de vida en la periferia de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", en Puente, Sergio y Legorreta, Jorge (eds.), *Medio ambiente y calidad de vida*, DDF, Plaza y Valdés, México, México, 1988, pp. 109-135.

Garza, Gustavo (ed.), *Atlas de la Ciudad de México*, DDF, El Colegio de México, México, 1987.

———, *Una década de planeación urbano-regional en México, 1978-1988*, El Colegio de México, México, 1989.

Guerrero-Reyes, Lourdes, "Problemas de servicios urbanos en colonias populares", en Benítez-Zenteno, Raúl y Morelos, José-Benigno (eds.), *Grandes problemas de la ciudad de México*, Plaza y Valdés, México, 1988, pp. 31-183.

Ingram, H.; Laney, N. y Gilliland, D., "Divided Waters: Bridging the U. S.-Mexico Border", 1994 (prospecto de libro propuesto a la University of Arizona Press, Tucson,).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, "Resultados Definitivos, XI Censo General de Población y Vivienda 1990", INEGI, Aguascalientes, México, 1991.

Jiménez, Emmanuel, "Social sector pricing policies revised: A survey of some recent controversies", Proc. del World Bank Annual Conference on Development Economics, The World Bank, 1989, pp. 109-138.

Katko, T. S., "Cost recovery in water services", en *Water Science Technology*, núm. 26, 1992, pp. 2621-2629.

Kindler, J. *et al.* (eds.), *Modeling Water Demands*, Academic Press, London, 1984.

Martínez-García, Juan Manuel, "Programa de uso eficiente de agua en la ciudad de México", XII Congreso Nacional de Hidráulica, 1992.

McNeill, Roger y Tate, Donald, "Guidelines for Municipal Water Pricing", Inland Waters Directorate, Canadá, 1991.

Moraru-de Loè, Liana y Mitchell, Bruce, "Public private partnerships: Water and wastewater services in France", en *Water International*, núm. 18, 1993, pp. 137-146.

Munasinghe, Mohan, *Water Supply and Environmental Management: Developing World Applications*, Westview Press, Colorado, 1992.

Okun, Daniel A., "A water and sanitation strategy for the developing world", *Environment*, 33, núm. 8, 1991, pp. 16-43.

Okun, Daniel A. y Lauria, Donald T., Capacity Building for Water Resources Management: An International initiative for the 1990s, Division for Global and Interregional Programmes, United Nations Development Programme, 1991.

Ostrom, Elinor; Schroeder, Larry y Wynne, Susan, Infrastructure Policies in Perspective, Westview Press, Colorado, 1993.

Piña, Ramón, Vilehis, Reynaldo y Buenfil, Mario, "Water demand parameters for supply systems planning", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México, 1993.

Rondinelli, Dennis A. y Kasarda, John D., "Privatization of urban services and infrastructure in developing countries", en Kasarda, J. y Parnell, A. (eds.), *Third World Cities: Problems, Policies, and Prospects*, Newbury Park, EUA, 1993, pp. 134-160.

Roth, Gabriel, "The role of the private sector in providing water in developing countries", en *Natural Resources Forum*, núm. 9, 1985, pp. 167-177.

Schteingart, Marta (comunicación personal), El Colegio de México, 1993.

Shaw, D. T. *et al.*, "Urban drought response in Southern California: 1990-1991", en *Journal of the AWWA*, 84 (10), 1992, pp. 34-41.

Solley, Wayne B., Merk, Charles F. y Pierce, Robert R., "Estimated Use of Water in the United States in 1985", en *Geological Survey Circular*, núm. 1004, Washington, 1988.

Task Force on Water Reuse, Water Poll (TFWU), "Water Reuse", Cont. Fed. en *Manual of Practice*, SM-3, 2a. ed., 1989.

Trava-Manzanilla, J., Calleros, J. Román y Bernal-Rodríguez, F., *Manejo ambientalmente adecuado del agua en la frontera México-Estados Unidos: situación actual y perspectivas*, El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, 1991.

Ward, Peter, *Mexico City: The Production and Reproduction of an Urban Environment*, Belhaven Press, Londres, 1990.

Whittington, Dale, "Posible adverse effects of increasing block water tariffs in developing countries", en *Economic Development and Cultural Change*, núm. 41, 1992, pp. 75-87.

Whittington, Dale y Choe, Kyeongae, "Economic benefits available from the provision of improved potable water supplies", en *WASH Technical Report*, núm. 77, USAID, Washington, 1992.

World Bank, "Water: Save now or pay later", en *The Urban Edge: Issues and Innovations*, 15(3), 1991, pp. 1-6.

———, World Development Report, 1992, *Development and the Environment*, Oxford University Press, Nueva York, 1992.

Capítulo 5
Marco jurídico e institucional

5.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es familiarizar al lector con las instituciones, y normas jurídicas, que regulan la administración del agua en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Debido a la complejidad del problema hay un gran número de organismos dependientes de varias ramas del gobierno dedicado a esta materia. En este capítulo los problemas del agua y, en forma consecuente, las instituciones se dividen en dos subcategorías: los cuantitativos y los cualitativos. Se aborda una discusión temática de los cambios en el planteamiento de la asignación de agua que han sucedido con el giro hacia la privatización de este recurso. Los problemas específicos de la ciudad de México propiamente dichos se tratan por separado, pues originan gran número de cuestiones adicionales relativas al abastecimiento urbano eficiente en una metrópoli en expansión.

Tanto en el DF como en todo México, es perceptible un movimiento tendiente a la privatización de la asignación del agua; este movimiento se aprecia en relación con la asignación de aguas residuales, así como también, en varios de los estados comprendidos parcialmente en el Valle de México, cuando se adjudican los permisos para el aprovechamiento de aguas subterráneas como propiedad privada. Debido a la importancia de esta tendencia, a continuación se hace una breve revisión del tema de la privatización, que servirá de fondo a la discusión general.

Desde 1988, México ha emprendido una verdadera revolución en la asignación de sus recursos hídricos y en la regulación de su calidad. En toda esta política de cambio hay principios básicos claramente identificables. Por ejemplo, se incluye el requerimiento de análisis de costo-beneficio en la aplicación de normas, y la promoción de derechos privados con respecto al agua. La nueva Pro-

curaduría Federal del Ambiente refleja el sentido de que, en sí, el ambiente tiene derecho a tener una representación titular en el gobierno. Similarmente, el concepto de privatización del sistema de distribución del agua de la ciudad de México manifiesta el principio de que motivaciones privadas, rentables, pueden dar como resultado un sistema más eficiente de abastecimiento de agua. El énfasis en el reúso de agua, tratado posteriormente, tiene grandes implicaciones en la preservación del agua.

Los principios subyacentes a este cambio están tal vez mejor resumidos en un documento publicado por la Comisión Nacional del Agua en 1990, en el que se describe el nuevo rol del gobierno mexicano en la política relativa al agua. *Inter alia*, el reporte establece que, cuando haya necesidad de auxilio en problemas de esta índole, el gobierno interviene en acciones que implican:

> "...transmisión a los usuarios de la administración de ciertos sistemas nacionales de irrigación, o la creación de nuevos sistemas (por ejemplo, la cesión de instalaciones de servicio público de agua a empresas privadas). En cualquier caso, la tarea primordial del gobierno es establecer las condiciones por las cuales los sistemas, modificados o de nuevos usuarios, operen autónomamente —esto es, con la capacidad técnica, administrativa y financiera para enfrentar sus propios problemas de preservación y desarrollo."

Además, el documento explica que estas metas se pueden lograr permitiendo al gobierno:

> "Regular la interacción de los varios usuarios de sistemas dentro de un sistema hidrológico dado, esencialmente para establecer derechos a agua, resolver conflictos, y en general determinar prioridades de desarrollos de agua de acuerdo con los objetivos nacionales, regionales y locales. Asimismo, el rol del gobierno en relación con el agua debe responder a un propósito más elevado: lograr la igualdad y la justicia en el uso de un recurso nacional. El agua no ha de estar al alcance solamente de quienes tienen los medios para obtenerla, sino —por el contrario— también para satisfacer las necesidades de todos."

El reporte continúa resumiendo el nuevo rol del gobierno:

> "En suma, la tarea del gobierno no es la de administrar sistemas de usuarios, sino más bien la de aportar las condiciones bajo las cuales éstos puedan determinar su propia relación con el agua, dentro de un marco de trabajo de eficiencia, igualdad y justicia que garantice la satisfacción de las necesidades, actuales y futuras."

Con esta política en mente, el comité suministra una descripción más detallada de la implementación para lograr estas me-

tas en el contexto de distribución y calidad del agua.

5.2. Marco jurídico e institucional del suministro y propiedad del agua

5.2.1. Bases constitucionales

En México, toda regulación con respecto a los recursos naturales emana del artículo 27 constitucional. Esta premisa se hizo efectiva a partir del 1° de mayo de 1917, y a la fecha continúa vigente. Por supuesto, esta Constitución es producto de la Revolución Mexicana iniciada en 1910, en la que como parte de su tema central figuraban demandas por reformas laborales y agrarias, el reconocimiento –por parte del gobierno– de las libertades individuales y de los derechos a la tenencia de la tierra en terrenos comunales (ejidos) poseídos por congregaciones rurales, que pudieran desarrollarlas y utilizarlas al amparo de reglas de tenencia previstas en la Constitución. Comparada con los documentos constitucionales de otros países, el reconocimiento formal de algunos de estos derechos en la Constitución mexicana puede ser insólito, pues refleja las metas de la contienda armada, que se emprendió para asegurar su instauración.

El artículo 27 regula un área diversa de intereses de propiedad pública y privada; define los bienes que son propiedad exclusiva de la nación; describe procedimientos para otorgar y privar del uso de esta propiedad; distingue entre derechos de ciudadanos y no ciudadanos al usufructo de los recursos de la nación, y establece la base para la propiedad de tierras comunales por parte de campesinos mexicanos.

El párrafo quinto del artículo 27 clasifica los recursos hidráulicos dentro del país; los delimita entre privados y públicos. Las categorías enlistadas comprenden aguas: a) interiores, b) marinas territoriales sujetas a la soberanía mexicana, c) marinas apropiadas para uso doméstico, d) superficiales en suelo mexicano, e) subterráneas en subsuelo mexicano, f) privadas en terrenos de particulares individuales, y g) privadas en terrenos privados colectivos.

Establece que todas las aguas subterráneas y superficiales de la nación son inalienables y ninguna persona particular puede convertirse en propietaria de tales recursos. El párrafo quinto agrega también que el agua superficial es materia de concesión por el Poder Ejecutivo Federal, para explotación mediante construcción de obras por parte del concesionario. Puesto que las aguas propiedad de la nación subterráneas y superficiales –son exclusivamente federales, la función de su regulación recae únicamente en el Congreso Federal. En contraste, en el pequeño número de casos en que las aguas se consideran de propiedad privada, los mismos serán objeto de regulación por los gobiernos estatales.

5.2.2. Estructura organizativa

Debido a que institucionalmente la ZMVM es sumamente compleja, un análisis detallado

de sus instituciones llenaría varios volúmenes. En relación a su organización, los autores de este reporte han intentado clasificar las distintas instituciones ahí ubicadas, en orden jerárquico descendente. Empiezan con el presidente de la República, continúan con las dependencias federales, los organismos del DF, los organismos de jurisdicción estatal y, finalmente, con los consejos regionales de la cuenca.

Federación

Presidencia de la República. De acuerdo con el Artículo 80 de la Constitución, el poder ejecutivo de la nación recae en el presidente de la República. Se le elige por un término de seis años, por votación mayoritaria directa de todos los ciudadanos del país. Entre otras responsabilidades, se le asignan las de promulgación de reglamentos complementarios a las leyes aprobadas por el Congreso, designación de los varios secretarios que encabezan las dependencias federales responsables de la administración pública federal, formulación de iniciativas de ley para atender los problemas del país, y si es necesario, ejercer poder de veto respecto de las iniciativas de ley que le envíe el Congreso. Para los efectos de este reporte, el poder más significativo conferido al presidente está contenido en el párrafo quinto del artículo 27 constitucional. En esa previsión, se le otorga el poder para reglamentar la extracción y el uso de las aguas nacionales, establecer áreas de veda y, por actuación de sus subordinados, emitir reglas para conceder permisos para el usufructo de aquéllas, en los términos previstos en leyes aprobadas por el Congreso.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). En el sistema federal mexicano, los secretarios, designados por el presidente, gozan de gran poder administrativo. La dependencia clave para la asignación del agua es la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El nombramiento de su titular no requiere aprobación de ninguna de las cámaras legislativas. Ha de entenderse que el presidente, por medio de la rama administrativa, dispone de poderes plenos para asignar y regular los recursos naturales del país. Su instrumento más importante para efectuarlo es mediante la designación de los titulares de secretarías como la SARH y la de Desarrollo Social (SEDESOL). Para los fines de esta discusión, la SARH es significativa, puesto que se le ha conferido poder para reglamentar la agricultura y los recursos hídricos.

En la sección de este reporte que trata los temas sobre la calidad del agua se informa la actividad que al respecto emprende la SEDESOL.

Comisión Nacional del Agua (CNA). Por iniciativa del presidente, el Congreso mexicano creó una institución gubernamental para efectuar la asignación del agua: la Comisión Nacional del Agua. Se debe entender que, a menudo, en México la jurisdicción de muchas instituciones se traslapa con la de otras;

empero, no se entrará en los detalles de cada traslape. En vez de eso, este trabajo se enfoca exclusivamente a las instituciones principales y las leyes aplicables a cada una. La estructura institucional del organismo encargado del agua, creado por el Congreso, se ilustra en el organigrama de la figura 5.2.1.

En la cima está la Dirección General. La Comisión tiene consejeros externos, considerados técnicos, que de hecho son quienes trazan la política bajo la autoridad del presidente; son los secretarios de: 1) Hacienda y Crédito Público, 2) Desarrollo Social, 3) Contraloría General de la Federación, 4) Energía, Minas e Industria Paraestatal, 5) Agricultura y Recursos Hidráulicos, 6) Salud y 7) Pesca. El presidente del Consejo Técnico de Consultores es el titular de la SARH. El Consejo puede también invitar a sus sesiones a representantes de organismos federales y estatales, así como a municipios y grupos de usuarios.

Por debajo de la Dirección General, la CNA se subdivide en cuatro subdirecciones: 1) Planeación y Finanzas; 2) Infraestructura Hidroagrícola; 3) Infraestructura Urbana e Industrial; y 4) Administración del Agua. Esta última subdirección incluye el registro documental, la expedición de permisos, y el proceso total de asignación de agua desde el punto de vista administrativo.

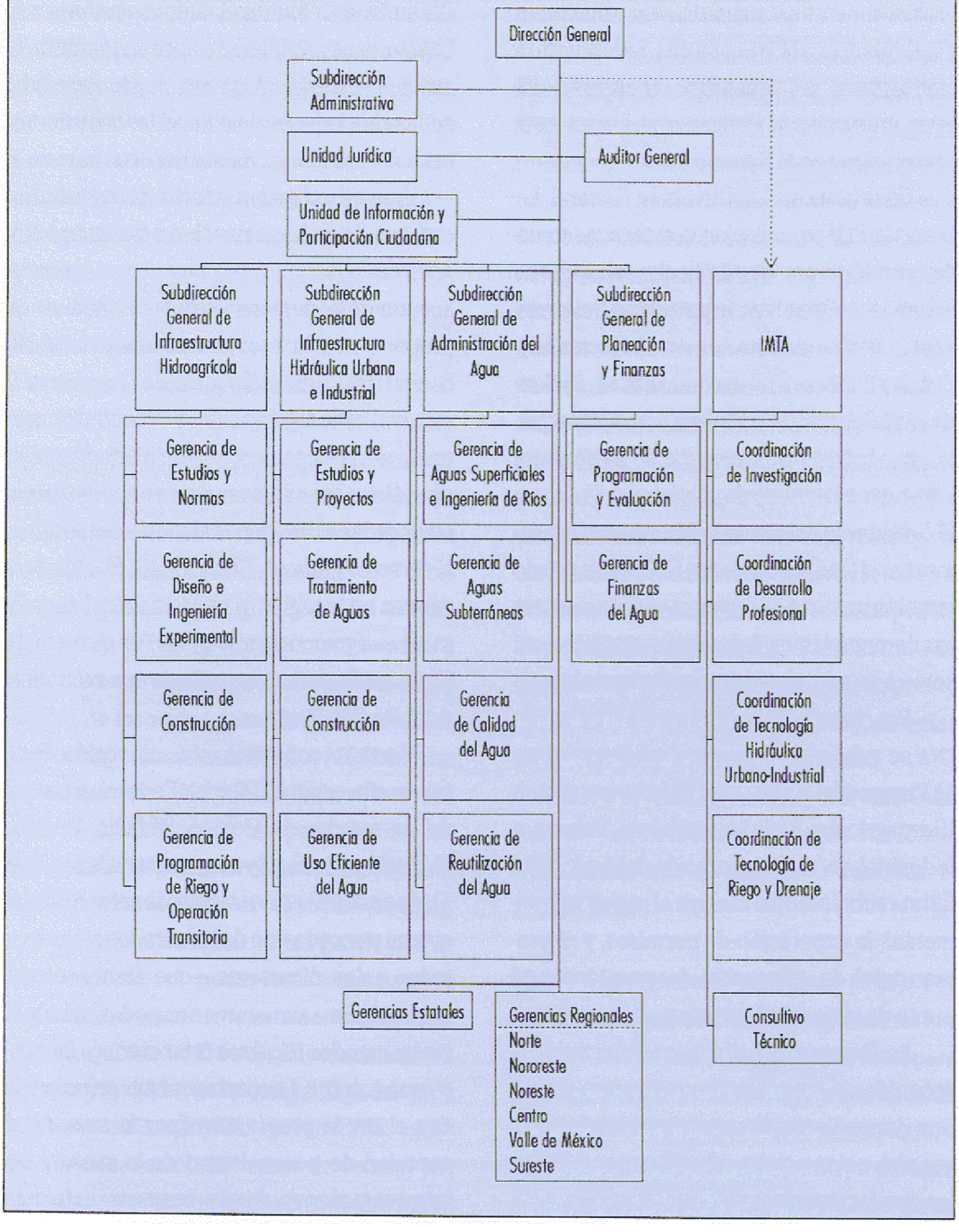
La Comisión se divide en seis regiones geográficas –las gerencias regionales–, cada una dependiente directamente del director general, quien nombra a los gerentes regionales que las encabezan. Por ejemplo, una de tales regiones, la Región Norte, comprende los estados de Aguascalientes, Zacatecas, Chihuahua, Coahuila y Durango –la Comarca Lagunera está incluida en estos dos últimos estados. También hay una rama separada dedicada a la investigación: el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Si bien los gobernadores de los estados carecen de poder formal para designar a los gerentes regionales, sí lo tienen para opinar y aceptar a la persona elegida. A ésta se la propone con la recomendación y la aprobación del Consejo Técnico de Consultores. A su vez, cada región se divide en subregiones, una o más por estado, según la unicidad o la diversidad hidrológicas del área. A los directores de las subregiones también los nombra el director general. Cuando hay más de una cuenca en la región, a cada una de ellas se le puede asignar una subregión. Por ejemplo, la Comarca Lagunera constituye una subregión de la Región Norte.

La ZMVM constituye una sola región. Dentro de ella están el Distrito Federal, y partes de los estados de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Morelos (véase mapa en la sección 1). Aunque en la ZMVM hay un director regional estatal por cada uno de los estados representados, tales directores –que tienen cierta importancia– tienen menos poder debido a los tremendos recursos financieros e institucionales del DF. Los protagonistas principales son el DF, la propia CNA (por la sustancial cantidad de pozos dentro de la ZMVM y las transvasaciones desde cuencas externas

FIGURA 5.2.1

ESTRUCTURA INSTITUCIONAL DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



hacia la capital del país) y el Gobierno del Estado de México. En un documento reciente, fechado en diciembre de 1992, se hace un resumen breve acerca de la administración de los acuíferos de esta zona, que se transcribe a continuación:

Distrito Federal

Distrito Federal. Puesto que el DF no es estado, sino solamente el asiento del gobierno federal, su regulación se lleva a cabo mediante legislación federal especial. Así, al regente de la ciudad lo nombra el presidente. Desde un punto de vista institucional, es importante entender que, cuando se alude a la ciudad de México, o más propiamente a la ZMVM, se está describiendo un grupo de personas que pueden residir en el Distrito Federal o en el Estado de México. Las partes de la ciudad localizadas dentro del DF se subdividen en subregiones llamadas delegaciones políticas.

Diversos organismos proporcionan los servicios públicos en el DF. Aunque la totali-

Bases de coordinación entre la Comisión Nacional del Agua, el Departamento del Distrito Federal y el Gobierno del Estado de México (GEM) para el manejo de cuencas hidrográficas en el Valle de México

Objetivos: *9 de diciembre de 1992*

1. Preservar las zonas de recarga al acuífero del Valle de México y controlar la erosión de suelos.

Actividades por realizar	*Responsables*
a) Preservación y mejoramiento de las zonas de recarga natural del acuífero.	SARH - CNA - DDF - GEM
b) Control de usos del suelo.	DDF - GEM
c) Construcción de estructuras de retención de agua pluvial y de azolve en cauces.	SARH - CNA - DDF - GEM

2. Delimitar las zonas federales en cauces y cuerpos receptores de agua, y estrategia para la reubicación de asentamientos humanos ubicados en estas zonas.

Actividades por realizar	*Responsables*
a) Control de usos del suelo.	DDF - GEM
b) Delimitación de zonas federales en cauces y vasos, en coordinación con el DDF y el GEM (actualización de planos).	CNA
c) Delimitación física de zonas federales en cauces y vasos, con aprobación de la CNA.	CNA - DDF - GEM
d) Vigilancia de zonas federales en cauces y vasos.	CNA - DDF - GEM
e) Reubicación de asentamientos humanos fuera de cauces y vasos.	DDF - GEM

Bases de coordinación entre la Comisión Nacional del Agua, el Departamento del Distrito Federal y el Gobierno del Estado de México (GEM) para el manejo de cuencas hidrográficas en el Valle de México (Cont.)

f) Autorización de obras en cauces y cuerpos receptores de agua, en coordinación con el DDF y el GEM — CNA

3. Construcción de colectores marginales y separación de drenajes de agua residual y pluvial.

Actividades por realizar	*Responsales*
a) Separación de drenaje pluvial y sanitario en nuevas construcciones para conservar el agua de lluvia.	DDF - GEM
b) Construcción de colectores marginales en cauces y barrancas, con autorización de la CNA.	DDF - GEM

4. Construcción y rehabilitación de presas y cauces para control de avenidas y aprovechamiento del agua pluvial.

Actividades por realizar	*Responsables*
a) Saneamiento en cauces y barrancas.	DDF - GEM
b) Elaborar estudios que permitan determinar cuáles presas se podrían usar para captar y, previa potabilización, distribuir el agua pluvial.	CNA - DDF - GEM
c) Desazolve y rehabilitación de cauces y presas.	CNA - DDF - GEM

5. Definición de políticas operables del sistema de presas y cauces del Valle de México.

Actividades por realizar	*Responsables*
a) Estudio para la modificación inmediata de estructuras (entubamientos, alcantarillas y otras) en puntos críticos que afectan el funcionamiento libre del sistema hidráulico.	CNA - DDF - GEM
b) Estudio de simulación del funcionamiento del sistema de presas del poniente.	CNA - DDF - GEM
c) Estudios para emplazamiento de nuevas estaciones pluviométricas.	CNA - DDF - GEM
d) Estudios para determinar sitios de aforo de cauces, con transmisión inmediata a los centros operativos.	CNA - DDF - GEM
e) Estudio del manejo integral de las aguas del sistema lagunario de la zona suroriental del valle.	CNA - DDF - GEM

Este documento es ejemplo de intentos recientes por coordinar funciones entre estas entidades.

dad de este cuadro está cambiando rápidamente a partir de las reformas legislativas realizadas durante el otoño de 1992, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) controla la distribución del agua y tiene a su cargo la infraestructura de la ciudad. La Tesorería del DDF efectúa el cobro de los avisos de adeudo (recibos) por consumo de agua y administra los medidores y el servicio. En la medida de sus posibilidades financieras, las delegaciones también pueden aportar infraestructura secundaria en sus subáreas respectivas.

Como se expresó anteriormente, el DF está localizado en un valle cerrado a 2,200 m sobre el nivel del mar. El área tiene casi 15 millones de habitantes. La población está distribuida entre 16 delegaciones políticas del DF y 17 municipios de la ZMVM. El consumo total de agua en estas jurisdicciones es de 62 m/s, 35 en el DF y 27 en los municipios.

La sobreexplotación del acuífero origina los riesgos de su agotamiento y provoca que continúe hundiéndose el terreno. Resolver el problema de extracción excesiva mediante la búsqueda de más fuentes externas es una opción extraordinariamente cara. Por ejemplo, la elevación del sistema Cutzamala es 1,200 m menor que la de la ZMVM y está localizado a 127 km de distancia. Los costos de la infraestructura son altos por sí mismos, y habría que añadirles los costos políticos provocados por quitar el agua a otras áreas escasas de ese recurso para satisfacer las necesidades de la metrópoli.

De acuerdo con el censo de 1990, el servicio de agua es intensivo dentro del Distrito Federal, pues 96.9% de las viviendas tienen agua potable, y 94.6% reportan que cuentan con desagte. La provisión diaria por habitante, para todos los usos, es de 360 litros, que es alta en comparación con el consumo *per capita* de algunas ciudades europeas: sólo 200 l/día.

Los funcionarios del DDF han concluido que, en parte, esto se debe a que se cobran cuotas fijas, independientes del volumen consumido. Para exacerbar aun más el problema, cierta cantidad de conexiones no están registradas en el sistema de facturación, o no tienen medidores para registrar el consumo real. Finalmente, en la red de distribución hay numerosas fugas, causadas por material antiguo, subsidencia y en ocasiones tecnología obsoleta.

Esta combinación de circunstancias ha dado como resultado el subpago y subcobro de los avisos de adeudo. De un total de 1,500,000 cuentas, sólo 500,000 se pagan de manera continua. La consecuencia es un déficit anual de 1,000 millones de nuevos pesos, en los programas de agua potable, restitución de aguas residuales y de alcantarillado. Las tarifas actuales, no determinadas por el consumo, penalizan a quienes la ahorran y premian a quienes no lo hacen. Y, como se hizo notar anteriormente, a causa del sistema inadecuado de medición y cobro, el simple cambio de la estructura tarifaria no generaría una gran cantidad de nuevas recaudaciones ni equilibrio.

Decreto de Privatización del 14 de julio de 1992, en el Distrito Federal. La situación descrita anteriormente está en vías de cambio como resultado de un decreto presidencial emitido en julio de 1992 (Diario Oficial del 14 de julio de 1992). Este notable documento crea una nueva Comisión de Aguas del Distrito Federal (CADF). Como asunto medular, tiene la meta de optimizar la eficiencia del abastecimiento de agua potable, del drenaje y de la restitución y el reúso de aguas residuales. Adicionalmente, espera promover una nueva perspectiva cultural en el DF, basada en la noción de que el agua es un recurso limitado, por el cual la gente debe pagar. También busca modernizar –de hecho, privatizar– la administración.

Como consecuencia de este decreto, la DGCOH continuará existiendo, pero muchas de sus funciones se le están transfiriendo a la nueva Comisión. La DGCOH mantendrá el control de las obras importantes, como el canal periférico, en torno de la ciudad, pero la nueva comisión se hará cargo de: a) la potabilización y el suministro del agua, b) el drenaje y c) el tratamiento de las aguas residuales. El esquema organizacional del nuevo decreto prevé esa eventual privatización de la distribución del agua, y de los sistemas de abastecimiento de agua y drenaje.

La nueva Comisión de Aguas del Distrito Federal consideró realizar un concurso entre las posibles entidades del sector privado que estarían de acuerdo en ingresar y responsabilizarse de la infraestructura, modernizarla, no elevar las tarifas y, por virtud de su operación más eficiente, obtener utilidades. El decreto previó una competencia basada en principios de servicio a menor costo. Se pidió a los concursantes que calcularan cuánta agua podrían ahorrar mediante reparación de fugas, estímulo de la preservación, instalación de nuevos medidores, y aumento del porcentaje de usuarios que paguen lo que consuman. Así, el DF ganaría porque el servicio mejoraría con tarifas basadas en el consumo, y la CNA –que la aporta desde fuentes externas– también ganaría, porque recibiría un pago superior por el agua entregada en bloque. Finalmente, las compañías privadas se beneficiarían porque obtendrían utilidades.

La parte medular de este plan es la capacidad del concesionario para: a) instalar medidores, b) impedir fugas, y c) lograr que la gente pague. A mayor eficiencia del operador, mayor rentabilidad.

Los requerimientos de la ley incluyen la obligación de medir absolutamente todas las conexiones, establecer un método de contabilizar el agua, inventariar la infraestructura, y terminar todo este trabajo en dos años. El siguiente paso importante es reparar todos los medidores que no funcionen, e instaurar un procedimiento de pago que se base en el consumo.

Se invitó a participantes del sector privado a la licitación no sólo para la operación de la infraestructura relacionada con el agua potable, sino asimismo para el tratamiento secundario de la residual. En respues-

ta a la convocatoria del 13 de noviembre de 1992, concurrieron siete consorcios, entre los cuales se incluían socios mexicanos mayoritarios, y las más grandes compañías europeas que actualmente están desarrollando tareas similares.

Al asignar los contratos para operación del sistema, se tomó una decisión en relación con el establecimiento real de éste, mediante la acción por etapas. La primera es el desarrollo de un sistema de infraestructura de medición por: a) actualización de cuentas de todos los usuarios, y b) instalación de medidores y colocación de todo el sistema en un mapa reticular por medio del cual se coordinen todos los medidores y cuentas, y se puedan accesar fácilmente todos los datos. La segunda etapa debe empezar con la operación del sistema, lectura de los medidores, facturación y cobro. La tercera sería mantenimiento operativo y rehabilitación de la infraestructura primaria y secundaria.

De acuerdo con lo estipulado en los contratos actuales, mientras se genera la información para poner las cuentas en orden e instalar medidores, a los contratistas se les pagará según el avance. Cuando se haya emplazado la infraestructura final, el pago se basará en una fórmula que establece un precio diferencial entre el agua suministrada en bloque al contratista y la tarifa que él aplica por distribución al menudeo a los consumidores, en la zona particular donde tiene su área de servicio. Los precios pagados al contratista deberán dar incentivos económicos para reparar fugas y cobrar oportunamente los avisos de adeudo.

Las licitaciones se hicieron para cuatro zonas o áreas de servicio, con aproximadamente la misma cantidad de conexiones. Éstas coincidían con los límites políticos subregionales dentro del DF. El pago por servicios se facilitó mediante un conveniente arreglo financiero con el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, que da anticipos para la construcción, con obligación de reembolso en el Distrito Federal. Los resultados favorables previstos incluyen, de 1993 a 1995, un incremento en el cobro: de N$ 500,000,000 a N$1,500,000,000. Se espera que para el año 2002 se anule completamente el déficit financiero anual del sistema. Se prevé que en un periodo de cinco años se reduzca el consumo: de 35 m^3/s a aproximadamente 25 m^3/s. Durante el transcurso de los cinco años siguientes, esta recaudación adicional generará la inversión de N$1,500,000,000 para la renovación de la red de distribución.

Bajo la ley mexicana relativa al agua, al concesionario de una planta tratadora de aguas residuales le pertenecen las aguas tratadas en ella, en tanto no las reintroduzca a las *aguas nacionales*. Así, hay potencial para la creación de un mercado de aguas residuales, para quienes operen y mantengan tales plantas.

Por supuesto, si el agua tratada se va a reintroducir en las aguas nacionales, se debe tratar de satisfacer ciertas normas, las cuales se están revisando en la actualidad y se las

discute en la sección siguiente, relativa a la calidad del agua.

Este movimiento de privatización tiene un precedente. En 1993, la DGCOH concesionó la operación de una planta tratadora de aguas residuales: la de Guadalupe. En 1994 ocurrió lo mismo en una segunda planta.

La DGCOH también regula la calidad del agua dentro del DF. No establece normas; esto lo hace la Secretaría de Salud. Sin embargo, sí tiene poder para fijar normas más estrictas a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Similarmente, la DGCOH tiene autoridad para hacer pruebas de más contaminantes que los requeridos por la ley federal (véase la sección acerca de calidad del agua, posteriormente). En el cabezal de un pozo o en la boca de un canal de la CNA, la responsabilidad de cumplir las normas federales referentes a su calidad, radica en ella.

Como se tratará con más detalle posteriormente, hay un sistema para que anualmente la Secretaría de Salud (SS) certifique que el agua del Distrito Federal satisface las normas federales. Actualmente hay un programa para pruebas rutinarias del agua en el DF. Los resultados se envían a la SS y a la CNA. Si el problema es severo, la SS puede intervenir y clausurar la fuente; si la anomalía es en un pozo o en un canal nacional, le compete también a la CNA. Finalmente, si hay un caso de urgencia que afecte la seguridad nacional, como el reciente de Guadalajara, puede intervenir la CNA.

Entidades federativas

Asignación de agua en los estados de la ZMVM. Merecen mencionarse los detalles de las instituciones relacionadas con el agua en los estados comprendidos parcialmente dentro del valle: Estado de México, Hidalgo, Morelos y Tlaxcala.

Estado de México. En la porción del valle gobernada por el Estado de México, la persona clave responsable de la distribución de agua en bloque es el director regional de la CNA. En la medida en que se suministra agua superficial, la comisión la entrega al organismo estatal de distribución: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS). Los organismos de este tipo son los responsables de aceptar el agua, tratarla y distribuirla a varias entidades menores, como los municipios. Dentro de éstos, las compañías privadas pueden también distribuirla. Constituyen, en efecto, servicios públicos regulados. Si el agua proviene de pozos, el estado, o los municipios, o las compañías, deben solicitar un permiso a la CNA (véase lo relativo a pozos, posteriormente). Los organismos estatales y locales regulan la calidad, pero a este respecto la SS tiene ascendiente sobre todos ellos, pues fija las normas y supervisa su acatamiento (véase lo relativo a calidad).

Sorprendentemente, la interacción de los organismos estatales con los del DF es mínima. Aunque existen relaciones cordiales, tienen dos sistemas separados y distintos de infraestructura. En lados opuestos de la misma calle pueden existir dos líneas

de conducción separadas: una perteneciente al Estado de México y la otra al DF.

Las entidades del Estado de México son diferentes a las del DF porque para sostenerse deben atenerse a sus propios fondos y reciben muy poco financiamiento directo. Más bien, para sufragar la construcción de la infraestructura, han de basarse en las tarifas. Cuando los usuarios no pagan, que a menudo es el caso por las razones ya mencionadas, los organismos del Estado de México no pueden retribuir a la CNA su cuota por la infraestructura total o por el agua. Así, cada año se suscita gran discusión acerca del monto del subsidio que concede la CNA por insolvencia económica. En respuesta a este problema, se están emprendiendo cierta cantidad de acciones para, al hacer más eficiente el sistema, intentar tanto proteger el acuífero como preservar el agua.

Hidalgo. En esta entidad federativa existe una "Ley Relativa a Agua y Drenaje" que se publicó en el Periódico Oficial del Estado el 25 de marzo de 1991. Con ella se crea una Comisión Estatal del Agua, con autoridad descentralizada propia, y sucursales para realizar sus funciones. Los poderes otorgados a esta comisión incluyen: a) preparación del programa estatal para agua y drenaje, mediante elaboración de planes anuales para su instauración; b) promoción de programas para tratamiento de aguas residuales; c) asesoría administrativa y financiera a las comisiones regionales o urbanas dentro del estado; d) recepción y administración de los ingresos por los servicios efectuados; e) existencia de cuentas para todos los usuarios, y f) elaboración de presupuestos anuales basados en los ingresos captados.

Morelos. El 22 de junio de 1981, en el Periódico Oficial del Estado se publicó la "Ley Reguladora del Suministro de Agua Potable y Servicios de Agua Potable y Saneamiento", la cual creó la Comisión Estatal de Agua Potable y Saneamiento de Morelos. Como en Hidalgo, tiene un *status* casi independiente, con capacidad para supervisar subdependencias operadas bajo su hegemonía. Su autoridad incluye: a) provisión de servicios de agua potable y saneamiento; b) formulación de estudios y proyectos para expander y mejorar los servicios de agua potable dentro del estado; c) construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable y saneamiento, o coordinación con las autoridades federales en la materia; d) suministro de agua en bloque a los centros de población, y e) recibir el pago para la construcción de sus obras y para construir y operar plantas para el reúso o la distribución final de aguas residuales.

Tlaxcala. En el Periódico Oficial del Estado, el 29 de julio de 1991 se publicó la "Ley de Agua Potable y Drenaje". Por un procedimiento legislativo semejante al seguido para las dos comisiones mencionadas previamente, se creó la Comisión de Agua Potable y Drenaje de Tlaxcala. Sus funciones consisten en regular, planear, programar, presupuestar, ejecutar, financiar y operar los sistemas de agua potable y alcantarillado. Asimismo, se le

faculta para formular, actualizar y cobrar las cuentas de los usuarios a quienes se les facture el servicio, y obtener financiamiento para desarrollar sus funciones.

Consejos regionales de planeación. Los *consejos de cuenca*, establecidos en el capítulo 4 de la nueva Ley Nacionalm de Aguas –y que se discutirán posteriormente–, son entes protagónicos. En esta sec ción de la ley, a la Comisión Nacional del Agua se le encarga establecer, dentro de cada cuenca hidrológica, consejos de cuenca, integrados por usuarios de todos los niveles. Su función es elaborar programas para la mejor administración de los recursos hídricos del área, desarrollar la infraestructura y preservar el agua de la cuenca correspondiente. Estas comisiones constituyen el foco administrativo principal de cada cuenca; están autorizadas para formular políticas para responder a racionamientos debidos a casos de urgencia, escasez extrema, sobreexplotación de acuíferos, y decidir sobre las reservas. La ley establece que en estas circunstancias de escasez hay prioridad para el uso doméstico.

Ciertamente, la atención dada en la Constitución de 1917 al ejido y los distritos locales de irrigación, aportan un rico precedente histórico para el desarrollo de estos grupos administrativos de las cuencas. Tales grupos de planeación de cuencas locales empezaron a fructificar en la de Lerma-Chapala, donde grupos privados y públicos están trabajando para desarrollar planes para una utilización más eficiente y equitativa de este recurso finito.

Particulares (pozos privados: autoabastecimiento)

Además del agua distribuida por los sectores federal, estatal y municipal, las industrias poseen numerosos pozos privados, inclusive en el DF. Es posible que en todo el valle haya unos 20,000. Hay una cuota que cubre la instalación del pozo, y un cargo basado en la cantidad consumida. De hecho, puesto que los usuarios industriales han cuantificado su consumo procedente de los pozos y lo pagan, en cierto sentido ellos subsidian a usuarios del sector público. En el Valle de México también hay pozos para riego cuyo consumo se cuantifica.

Como sucede en todo el mundo, se han perforado pozos sin aprobación del gobierno federal. La comisión distingue entre los ilegales y los clandestinos. De los ilegales tiene conocimiento el gobierno, pero de su consumo no se informa con precisión, o simplemente consumen más de lo permitido. De los clandestinos, el gobierno ignora totalmente su existencia. En el caso de uno ilegal, se le puede requerir que reduzca el bombeo para compensar el exceso de los años previos. En el de uno clandestino, al descubrirlo se clausura y se multa a los usuarios.

Como se verá posteriormente, todos los pozos se deben registrar ante la Comisión Nacional del Agua. La CNA posee un registro de datos relativos a profundidad, calidad, características del suelo, y la cantidad permitida

de extracción, basada en la demanda de agua para usos particulares. Se puede obtener autorización para incrementar la extracción, según la proyección futura del consumo, pero siempre sobre una base limitada.

5.2.3. Los derechos de propiedad del agua en México

En esta sección se aborda detalladamente la índole de la propiedad de las aguas de México según la Constitución Mexicana. Empieza con una discusión sobre las aguas superficiales y las residuales. Continúa con otra acerca del agua del subsuelo y la nueva ley de privatización relativa al agua subterránea.

Derechos de propiedad del agua superficial

Concesiones para el uso de aguas superficiales. Según el párrafo quinto del Artículo 27 constitucional, la CNA puede otorgar concesiones a entidades privadas para aprovechar las aguas superficiales. Toda solicitud debe contener los datos siguientes: identidad del solicitante, aguas que se pretende utilizar, lugar y propósito del uso. El permiso debe señalar cuánto tiempo se intenta usarlas, el método propuesto de derivación, las obras que se construirían, y el punto donde se les descargaría después de que se les ha utilizado. Si para la misma agua hay más de un solicitante, se puede asignar por prioridad o por el uso que se ajuste más a las necesidades de utilidad pública. Las concesiones pueden ser de 5 a 50 años, prorrogables por un periodo de tiempo igual al inicial si su uso es benéfico.

Si no se afecta a terceros, el título de la concesión es transferible, con sólo notificar a la CNA; en caso de que sí se afecten los derechos de terceros, se necesita la aprobación de dicha comisión. Si se pretende cambiar el lugar de uso de las aguas, la CNA debe aprobar tal cambio previamente.

Quienes reciban una concesión tienen las obligaciones siguientes: 1) desarrollar los medios de derivación y las obras necesarias para el uso solicitado, y utilización efectiva del agua; 2) pagar los costos implicados para el usufructo del recurso; 3) comprobar el cumplimiento de todos los reglamentos relevantes relativos a seguridad, salud y protección ambiental, y 4) permitir que personal de la CNA inspeccione las obras de derivación y el uso del agua, así como entregar reportes y documentos requeridos por la comisión.

Los derechos del concesionario incluyen: desarrollo y uso de las aguas otorgadas; transferencia a terceros de los derechos respectivos; devolución de la concesión al gobierno, si ya no se va a necesitar, y obtención de las ampliaciones que sean necesarias, para hacer un uso benéfico completo.

Las concesiones de aguas superficiales se pueden suspender o cancelar. Lo primero puede acontecer, por ejemplo, si no se hacen los pagos como lo requiere la ley. Se puede

aplicar una sanción similar si se violan las condiciones de la concesión, o si no se permiten inspecciones. Previamente a la ejecución de la suspensión, se conceden 15 días para hacer las correcciones necesarias. La cancelación procede por: a) consumo superior al permitido, b) continuación de la morosidad, después de una suspensión por ausencia de pago; c) incumplimiento en la construcción de obras de derivación previstas; d) transferencia de títulos sin autorización, o e) fallo de un tribunal judicial, que establezca la procedencia de la cancelación debido a circunstancias existentes.

Asignación de derechos de aguas superficiales a entidades gubernamentales. Según las leyes mexicanas, si las dependencias gubernamentales estatales y municipales desean usar aguas superficiales, deben recabar la asignación correspondiente de la CNA. Esencialmente, el procedimiento el mismo que el al ya descrito para los particulares.

Derechos de propiedad del agua subterránea

Como se indicó previamente, de acuerdo con el Artículo 27 constitucional se puede asignar agua del subsuelo a entidades privadas o a los municipios. Se exceptúan aquellos casos donde el poder ejecutivo ha proscrito la explotación de un acuífero (caso de veda). En la exposición siguiente se describen las últimas disposiciones legales al respecto.

Ley de Privatización del 1° de diciembre de 1992

El 1° de diciembre de 1992 se publicó una nueva ley que cambió completamente la metodología de asignación del agua en todo el país. Ésta proporciona un método para determinar cuándo una cuenca está totalmente asignada. Dispone en qué cuencas no se debe perforar un nuevo pozo ni obtener el derecho inherente. Lo que se puede hacer es comprar los derechos vigentes de otros usuarios. Así, si se intenta irrigar, se debe comprar el permiso, ya emitido, de otro irrigador. Obviamente, la efectividad de esta ley depende del conocimiento de cuánto estaba consumiendo realmente el usuario anterior, lo cual, en ausencia de medidores, es problemático. No obstante, hay una cantidad permitida y, mediante trabajos hidrográficos y otros métodos, es posible calcular el consumo retroactivamente.

El mercado creado consistirá en permisos para el uso del agua. El valor del permiso lo determinaría una combinación del bombeo anterior y los derechos de bombeo futuro. Probablemente habrá dos clases de bienes a la venta: concesiones de derechos (donde realmente se ha bombeado como consecuencia de un permiso), y concesiones de hecho. Estas últimas se dan en las circunstancias en que simplemente las personas han estado usando el agua durante mucho tiempo, para satisfacer las necesidades de una instalación industrial, y no pueden prescindir del pozo. En casos como éste, es probable que el uso se continúe.

Esta ley se aplica también para el suministro de agua potable. Antes de diciembre de 1992, cualquier proveedor de agua potable simplemente tenía que solicitar un permiso para perforar un pozo y se le otorgaba. Ahora, el solicitante tiene que salir y comprar a otros usuarios los derechos amparados por el permiso.

Cuando se compra un permiso, el adquiriente puede obtener sólo la cantidad realmente consumida. De conformidad con la antigua ley, durante cinco años se podía consumir toda el agua permitida, u obtener alguna prórroga, la cual generalmente se concedía. Según el nuevo sistema, se debe hacer uso del agua en el término de tres años. Una posibilidad podría ser vender los derechos de la cantidad usada a un nuevo usuario, y en su lugar empezar a usar el balance del volumen permitido. Como ya se hizo notar, dentro del DF la extracción se mide virtualmente en todos los pozos; empero, fuera de él, el volumen usado se tendrá que inferir del consumo la de energía eléctrica, del rendimiento de cultivos —si se trata de irrigación— o de la producción por unidad de volumen de agua.

De manera muy vaga, la ley prevé consideraciones de daños a terceros, pero no las respalda en ningún reglamento que las haga efectivas. En lo referente a interferencia de pozos, la ley antigua prohibía terminantemente el emplazamiento de un pozo en un radio menor o igual a 500 m de otro. En la nueva, el cálculo varía según los coeficientes del acuífero.

Una vez que un derecho se ha vendido a otra persona, se requiere que se registre el cambio de propietario en la CNA, pero no es requisito que se publique, ni que sea aprobado por la Comisión.

Si se desea cambiar el sitio de uso y perforar un nuevo pozo, se debe obtener la aprobación de la CNA, pero esto no es necesario para un cambio de propósito de uso.

Un cambio notable en la nueva ley es que se establece un plazo perentorio de 90 días laborables para que la CNA dictamine una solicitud. En la anterior no se establecía ningún límite. Si no se contesta oportunamente, la consecuencia puede ser que el gobierno adquiera responsabilidad legal y pueda ser enjuiciado por el solicitante.

Finalmente, la nueva ley prevé un método para transferir la infraestructura agrícola regional a los gobiernos locales, convirtiéndolos en sus propietarios y encargados de su mantenimiento. Asimismo, anticipa algo similar a un giro hacia costos marginales por suministro de agua o, por lo menos, tarifas que permitan el pago de la depreciación y el mantenimiento de las inversiones más importantes de la infraestructura. Idealmente, estos costos se transferirían al consumidor.

Esta ley entró en vigor al inicio de 1993. Actualmente, la CNA está realizando seminarios para instruir a los administradores de agua de todo el país. Hasta la fecha no se ha publicado la reglamentación de la nueva ley. Así, los seminarios que se están llevando a cabo cumplen también la función de audiencias públicas, lo cual permitirá adquirir

información que pueda incluirse en la versión final de dicha reglamentación.

Derechos de propiedad del agua residual

En muy pocas excepciones, la Constitución Mexicana confiere a la nación la propiedad de todas las aguas superficiales y subterráneas. En consecuencia, la CNA adopta la posición de que toda agua residual retornada a las de dominio público es de nuevo propiedad de la nación. Sin embargo, según se explica posteriormente, hay muchos programas según los cuales las aguas residuales pueden comercializarse y es la nueva ley la que estimula esta práctica.

5.3. Marco jurídico e institucional que rige la calidad del agua

5.3.1. Bases constitucionales

Como se hizo notar anteriormente con respecto a la asignación del agua, sin una comprensión apropiada de sus orígenes constitucionales las bases para el control de la calidad no se pueden entender. Las previsiones de la Constitución mexicana más relevantes al respecto son los artículos 4, 27 y 73.

El párrafo cuarto del Artículo 4 ordena que el gobierno "...establecerá la participación de la Federación y de las entidades federales en asuntos de salud general, de acuerdo con las previsiones de la fracción XVI, Artículo 73, de esta constitución".

La fracción y el artículo mencionados contienen material relativo a la protección gubernamental de la salud en general. En 1971 se mo dificó la Constitución, de tal manera que esta disposición otorga al gobierno amplia autoridad para reglamentar la salud pública, incluido el control de la contaminación del agua. El Artículo 73 y las previsiones siguientes de la fracción XXIX-G confieren al Congreso de la Unión la facultad para "emitir leyes que establezcan la participación del gobierno federal, los gobiernos de los estados y municipios, en las áreas de su respectiva jurisdicción, en materia de protección del ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico". En 1987 se modificó el Artículo 27, junto con otras estipulaciones, para incluir la restauración y la protección ambientales. También autoriza y ordena que para emprender esta misión ambiental haya coordinación entre el gobierno federal, los estados y los municipios.

El DF tiene una Asamblea de Representantes investida también de autoridad para emitir decretos, aprobar resoluciones y ordenanzas que protejan el ambiente, reglamenten la calidad del agua, procuren la protección de la salud, y administren los sistemas de drenaje, como se expresó con anterioridad.

5.3.2. Leyes y reglamentos de la calidad del agua

Ley ambiental de 1988

En 1988 se aprobó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (la Fig. 5.3.1 es un resumen de sus estipu-

laciones principales). La misma contiene un capítulo específico relativo a la prevención y el control de la contaminación del agua y sistemas hidráulicos; establece criterios selectivos para tal propósito, y estimula la participación de la comunidad en ese control. Está basada en el principio de que el uso del agua en actividades productivas que generan polución trae consigo la responsabilidad de proteger el agua y de abatir la infición.

El Artículo 19 de la Ley Ambiental de 1988, determina las autoridades que intervienen en el control de la contaminación del agua. Otorga facultades a la (SS) para fijar normas de calidad del agua, pero confiere al super organismo ambiental SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología), hoy SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), la autoridad para implementar las normas establecidas por la SS. La figura 5.3.2 es una descripción esquemática de la SEDESOL. La ley estipula la relación de trabajo intersecretarial de la SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), la SEDESOL y la SS. Colectivamente, sus responsabilidades incluyen: a) establecimiento de normas técnicas para el uso de aguas residuales; b) reglamentación y control de nuevas plantas industriales que puedan generar aguas de esta índole, y c) asignación de responsabilidades para restituir esas aguas para reúso. También tienen a su cargo la evaluación y el establecimiento de normas para la regulación de aguas industriales provenientes de áreas urbanas y utilizadas en agricultura, y normas para la reducción de la nocividad de las descargas en los sistemas fluviales.

A la SARH se le confiere autoridad para regular los permisos para asignación y descarga de aguas residuales. A este respecto, se le ordena establecer normas que sean consistentes con las de la Secretaría de Salud, y se delega autoridad a los estados y municipios para establecer y aplicar multas si los efluentes no cumplen las normas requeridas.

La ley define las descargas prohibidas procedentes de uso industrial, uso municipal, agricultura y actividades mineras, además de otras actividades que produzcan el mismo efecto en el ecosistema. Reglamenta también la polución indirecta de los acuíferos y ríos por aplicación de fertilizantes, sustancias tóxicas, basureros y actividades superficiales similares. Su principio general no es diferente al de la "Clean Water Act" de los Estados Unidos: sin autorización específica del gobierno, ni tratamiento adecuado para proteger al ambiente, nada se debe descargar en aguas de la nación.

La ley protege los acuíferos en su interrelación con los sistemas hidrológicos, del mismo modo que con otros sistemas ecológicos. Da protección especial a los sistemas destinados a consumo doméstico, de ahí que cuando una descarga amenaza a uno de estos sistemas, sea posible suspenderla de inmediato. Para entidades federales como Pemex y la Comisión Federal de Electricidad hay estipulaciones especiales. La SEDESOL, la SARH

FIGURA 5.3.1
LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE

Título	*Capítulo*	*Sección*
Primero Disposiciones generales	I. Normas preliminares	
	II. Concurrencia entre la federación, entidades federativas y los municipios	
	III. Atribuciones de la Secretaría y coordinación entre las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal	
	IV. Política ecológica	
	V. Instrumento de la política ecológica	1. Planeación ecológica 2. Ordenamiento ecológico 3. Criterios ecológicos en la promoción del desarrollo 4. Regulación ecológica de los asentamientos humanos 5. Evaluación del impacto ambiental 6. Normas técnicas ecológicas 7. Medidas de protección de áreas naturales 8. Investigación y educación ecológicas 9. Información y vigilancia
Segundo Áreas Naturales protegidas	I. Categoría, declaratorias y ordenamiento de áreas naturales protegidas	
	II. Sistema nacional de áreas protegidas silvestres y acuáticas	

FIGURA 5.3.1 (CONT.)

Tercero	
Aprovechamiento nacional de los elementos naturales	I. Aprovechamiento racional del agua y de los ecosistemas acuáticos
	II. Aprovechamiento racional del suelo y sus recursos
	III. Efectos de la explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico
Cuarto	I. Prevención y control de la contaminación de la atmósfera
	II. Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos
	III. Prevención y control de la contaminación del suelo
	IV. Actividades consideradas riesgosas
	V. Materiales y residuos peligrosos
	VI. Energía nuclear
	VII. Ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica, olores y contaminación visual
Quinto (único)	
Participación social	
Sexto	I. Observancia de la ley
Medidas de control y de seguridad	II. Inspección y vigilancia
	III. Medidas de seguridad
Sanciones	IV. Sanciones administrativas
	V. Recursos de incorformidad
	VI. Delitos de orden federal
	VII. Denuncia popular

y la SS, establecen normas para estas empresas paraestatales.

Esta ley obliga a emprender estudios de los sistemas hidrológicos, y a establecer datos básicos de referencia y programas de tratamiento y uso del agua. Hace énfasis en que los estudios se deben basar en los mejores datos científicos disponibles. Finalmente, prohíbe el uso agrícola de aguas residuales municipales no tratadas.

A las tres secretarías que acabamos de mencionar se las hace responsables del desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua, y se les ordena coordinar su trabajo con los municipios.

El artículo 29 de la ley ambiental de 1988 es aplicable a proyectos gubernamentales. El gobierno está obligado a evaluar las consecuencias ambientales de los proyectos relativos al agua de todas las plantas industriales federales y de otras obras hidráulicas.

Reglamentos ambientales

Aunque esta importante ley ambiental se aprobó en 1988, se han promulgado pocos reglamentos nuevos. Así, la anterior ley de protección de recursos hídricos de 1971, y sus reglamentos, continúan vigentes. Dicha ley se aplica a todas las modalidades de contaminación del agua. Contiene una lista de desechos descargables prohibidos, clasificados por subcategorías, y varias normas técnicas. Estas son revisables cada cinco años, si la demografía lo requiere, excepto si –por supuesto– se presentan grandes daños para la salud, en cuyo caso las reformas se pueden hacer antes de ese plazo. Además contiene un capítulo que estipula sanciones y procedimientos para hacerlas cumplir, incluyendo multas.

También la ley ambiental de 1988 considera varias multas, que son mayores si, en agua suministrada en bloque al público, la descarga daña a gran cantidad de personas. El artículo 185 prevé penas de prisión por efectuar descargas no autorizadas.

Nueva Ley Nacional del Agua

El 1° de diciembre de 1992, el Congreso aprobó la nueva Ley Nacional del Agua, ya mencionada, que contiene también estipulaciones relativas a la calidad. Una curiosidad legal interesante es que, la nueva ley asevera que el derecho de controlar aguas residuales está basado en el Artículo 15 de la Constitución de 1917. Sin embargo, dicho artículo no contiene referencia alguna a aguas de esta índole. Por lo tanto, no está totalmente claro el aserto constitucional sobre la propiedad de estas aguas.

Según la ley de 1992, la CNA tiene la obligación de promulgar reglamentos para proteger y mejorar la calidad del agua en sistemas fluviales y en acuíferos. Además, debe considerar los problemas del agua a medida que surjan, en su contexto tanto cuantitativo como cualitativo.

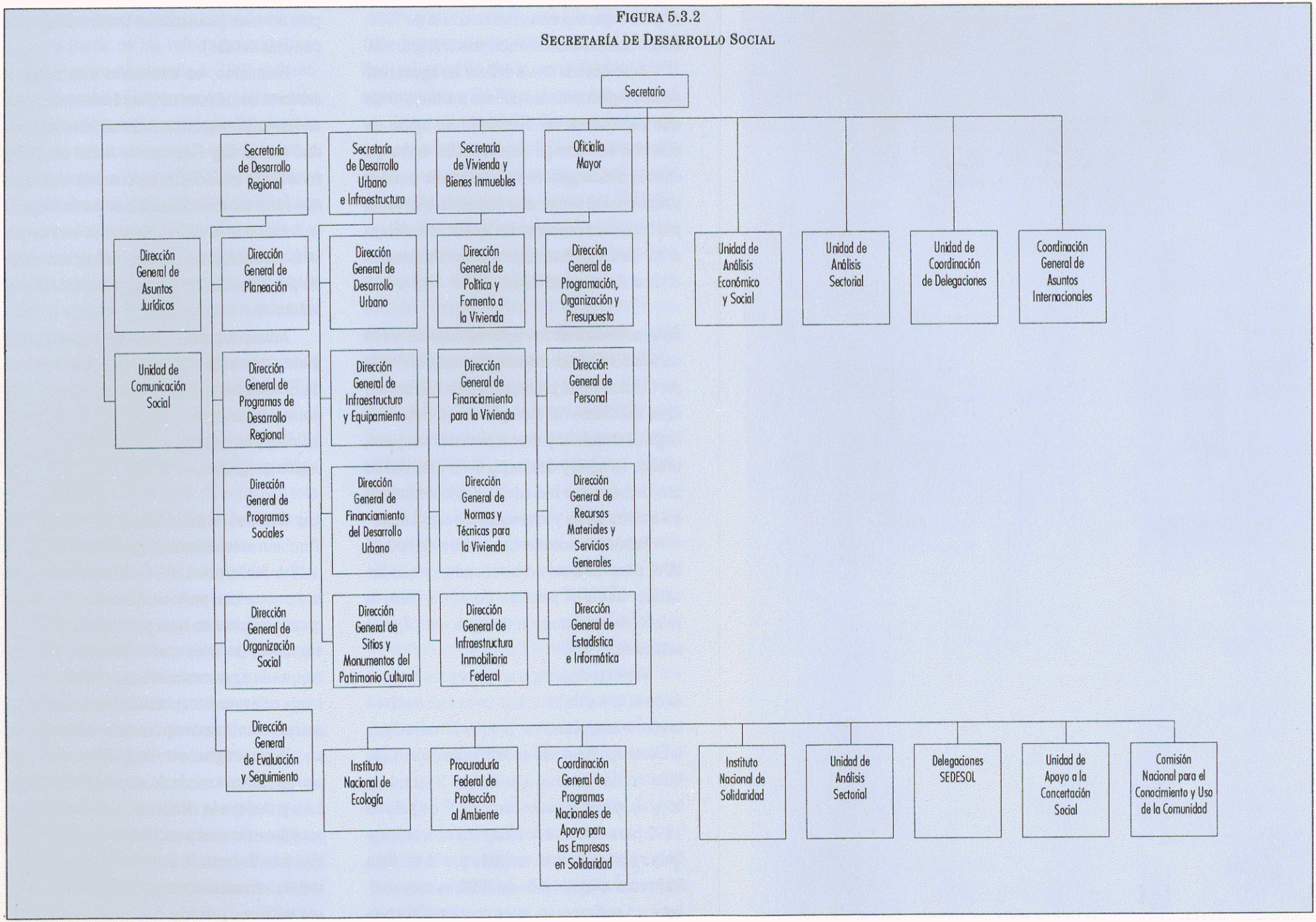
Se le encarga la tarea de hacer cumplir los reglamentos en casos particulares de descarga de aguas residuales, como en enclaves federales, y donde sea aplicable, también ha de ajustarse a la ley ambiental de 1988.

Ordena una supervisión para asegurarse que quienes producen agua para consumo doméstico y eliminan las aguas residuales cumplan las normas federales. Además se le encarga proteger los acuíferos y las corrientes superficiales de fuentes de contaminación superficial: basureros, aceite y otras descargas similares en la superficie del terreno.

En ciertos puntos, esta ley otorga bastante autoridad a la Comisión; empero, cuando

FIGURA 5.3.2

SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL



requiere que sea consistente con la de 1988, en secciones subsecuentes, puede retirársela.

Autoriza a la CNA a definir las aguas residuales reglamentadas por ella misma, y exige que para todas las descargas de aguas de desecho se obtenga permiso. Sin embargo, ciertos descargadores *de minimis* pueden simplemente avisar a la Comisión que están por hacer una descarga. La ley también delega autoridad a los municipios para continuar el control de esta actividad.

Operatividad de la reglamentación de la calidad del agua: un caso hipotético. Puede ser útil ilustrar la protección de la calidad del agua mediante un ejemplo. Si un individuo llega al Estado x y desea perforar un pozo, utilizar su agua y descargar la de desecho de uso doméstico e industrial, debe confrontar las instituciones y los requisitos siguientes.

Primero necesita un permiso de la CNA. Si el pozo está en un municipio, puede necesitar también permiso de éste (véase lo referente a asignación de agua, en páginas anteriores).

Para las descargas debe obtener permiso de la CNA y de SEDESOL. La SARH establece las normas cualitativas, por medio de la CNA y la Comisión Nacional de Normalización. También se ha de consultar la Ley Federal de Metrología y Normalizacion del 1° de julio de 1992, para determinar si hay una norma aceptada nacionalmente, exigible por la SS. Esta importante ley, de julio de 1992, es muy similar a un reglamento, pues contiene sus propias normas (adelante se tratará sobre ella con más detalle).

Asimismo, es necesario demostrar a SEDESOL que el pozo no traerá consecuencias ambientales negativas. Además, de conformidad con la Ley General de Salud de 1984, reformada en 1991, cuando se extraiga agua que otros puedan consumir se ha de avisar a la Secretaría de Salud. En teoría esta secretaría está obligada a someter el agua a análisis por laboratorios municipales, estatales y federales.

Adicionalmente, se debe pagar un impuesto por consumo de agua, que depende de la zona regulatoria correspondiente a la ubicación del pozo. La tarifa está establecida en la ley y en los reglamentos, y varía según la región geográfica.

Ley General de Salud de 1984

También es relevante la Ley General de Salud del 7 de febrero de 1984. Conforme a ella, la SS tiene autoridad para establecer máximos de contaminantes en agua para bebida. Existen secciones de la ley que se refieren al tratamiento de aguas residuales. Se prohíbe su descarga en áreas de captación de agua potable, así como la venta de agua para uso doméstico.

Hay un reglamento de 1988 que define al agua potable como la destinada al consumo. La ley incluye la eliminación de bacterias y establece normas para el agua potable. Autoriza a la Secretaría de Salud a reglamentar toda la infraestructura para distribuir el agua, sea pública o privada.

Esta reglamentación define las partes responsables de la purificación del agua y confiere a la SS autoridad para promulgar criterios para descargas específicas, así como normas generales para evitar riesgos al público en general siempre que se distribuya agua al sistema doméstico público, sea gubernamental o privado. Esta ley es particularmente importante porque de modo virtual todas las leyes estatales y municipales incorporan las normas y los requisitos contenidos en ella.

Códigos civiles federales y estatales

Finalmente, en el Código Civil Federal y en los respectivos códigos estatales, hay secciones relativas a derechos privados al agua. Estas secciones estipulan que toda persona que construya obras y derive aguas tiene derecho a ellas. Con respecto a la perforación de pozos, no hay responsabilidad por daños a terceros, excepto si no se hizo para beneficio propio, sino para perjudicar a otra persona.

Estas estipulaciones son aplicables en disputas privadas acerca del agua. Sin embargo, ellas quedan anuladas por la nueva ley del agua al menos en lo concerniente a permisos para pozos. Los derechos de cualquier miembro del sector privado son reclamables ante un juzgado. Es muy interesante ver que esta ley convierte los derechos al agua de acuíferos en derechos de propiedad. No obstante, a diferencia del sistema de códigos civiles, no señala juez competente para resolver disputas. Hasta ahora no está claro cómo habrá de funcionar todo esto.

En los códigos también hay estipulaciones que estimulan el uso benéfico del agua y que sugieren las posibilidades de compensas a los usuarios más anti guos frente a los nuevos. Esta tradición de equilibrio de intereses puede ser relevante para los interpretadores de la nueva ley. También hay una sección que otorga derecho de vía para drenaje y alcantarillado. Irónicamente, en esta ley de 1928 hay una estipulación que establece que si se emite agua insalubre y afecta a terceros, la persona que la genere debe limpiarla. Así, los principios de la nueva ley encuentran sus raíces en los códigos civiles de 1923.

Procuraduría Federal de Protección del Ambiente

Una institución adicional que puede desempeñar un papel clave es la nueva Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. El artículo 38 del reglamento interior de la SEDESOL, instituye esta oficina como parte del gobierno federal (la figura 5.3.3 es una representación esquemática de ella).

Inter alia (entre otras cosas), las tareas de esta oficina incluyen el hacer cumplir las normas para la protección ambiental cuando no haya conflicto con las funciones de otras dependencias al respecto. También comprenden la promoción de la participación en los niveles regional y local de los afectados por tales normas. Se le ordena que reciba quejas

y analice problemas donde individuos o instituciones violen las normas, y promueva la coordinación entre todos los organismos que pretenden hacer cumplir los reglamentos. En efecto, el rol de esta oficina es la representación del ambiente en los sistemas federal y local, y el enjuiciamiento de quienes podrían intentar dañarlo.

Normas nacionales relativas a la calidad del agua

Otra pieza clave de la legislación es la nueva Ley Federal sobre Metrología y Normalización, aprobada el 1° de julio de 1992. Según esta ley, las Normas Técnicas Ecológicas y las Normas Técnicas Sanitarias, elaboradas por la Secretaría de Salud, se declararon caducas el 15 de octubre de 1993, salvo aquellas que se apoyen en un análisis de costo-beneficio. Según lo aplicable en cada caso, este análisis requiere de una base científica para la norma basada en la protección del consumidor, una lista de los beneficios de la norma, que incluya los intangibles no cuantificables, que no son determinables monetariamente, una descripción de los efectos adversos de la norma, y una cuantificación de estos costos en términos económicos. Finalmente, debe haber una explicación de por qué la norma es la posibilidad preferida para el logro de resultados positivos, en vez de incentivos económicos, educación, o alternativas para la obtención de los mismos objetivos.

La nueva ley establece nuevos criterios y métodos para acreditar laboratorios, y para la medición de la calidad del agua con el fin de determinar el cumplimiento de las normas. También establece que la Comisión Nacional de Metrología y Normalización es la institución responsable de supervisar la adaptación de otras entidades a las nuevas normas, que se establezcan. En la elaboración de normas deberán participar subcomités consultores, integrados por miembros de la industria, la comunidad académica y miembros de la sociedad que sean sujetos de las mismas. El correspondiente a la protección del ambiente se estableció el 29 de marzo de 1993. Seguramente, en el futuro esta comisión y los subcomités ejercerán una función vital en la protección de la calidad del agua en México.

5.4. Marco jurídico e institucional del servicio de agua y drenaje

5.4.1. En el Distrito Federal

En el DF diversos organismos efectúan los servicios gubernamentales. Aunque todo este cuadro está cambiando rápidamente debido a nuevas condiciones legislativas imperantes desde el otoño de 1992, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) controla la distribución del agua y tiene a su cargo la infraestructura de la ciudad. La Tesorería del Departamento del Distrito Federal realiza el cobro, la medición y el servicio.

En la medida de sus posibilidades financieras, las delegaciones locales pueden también aportar infraestructura secunda-

ria en sus subáreas (más adelante se trata este tema).

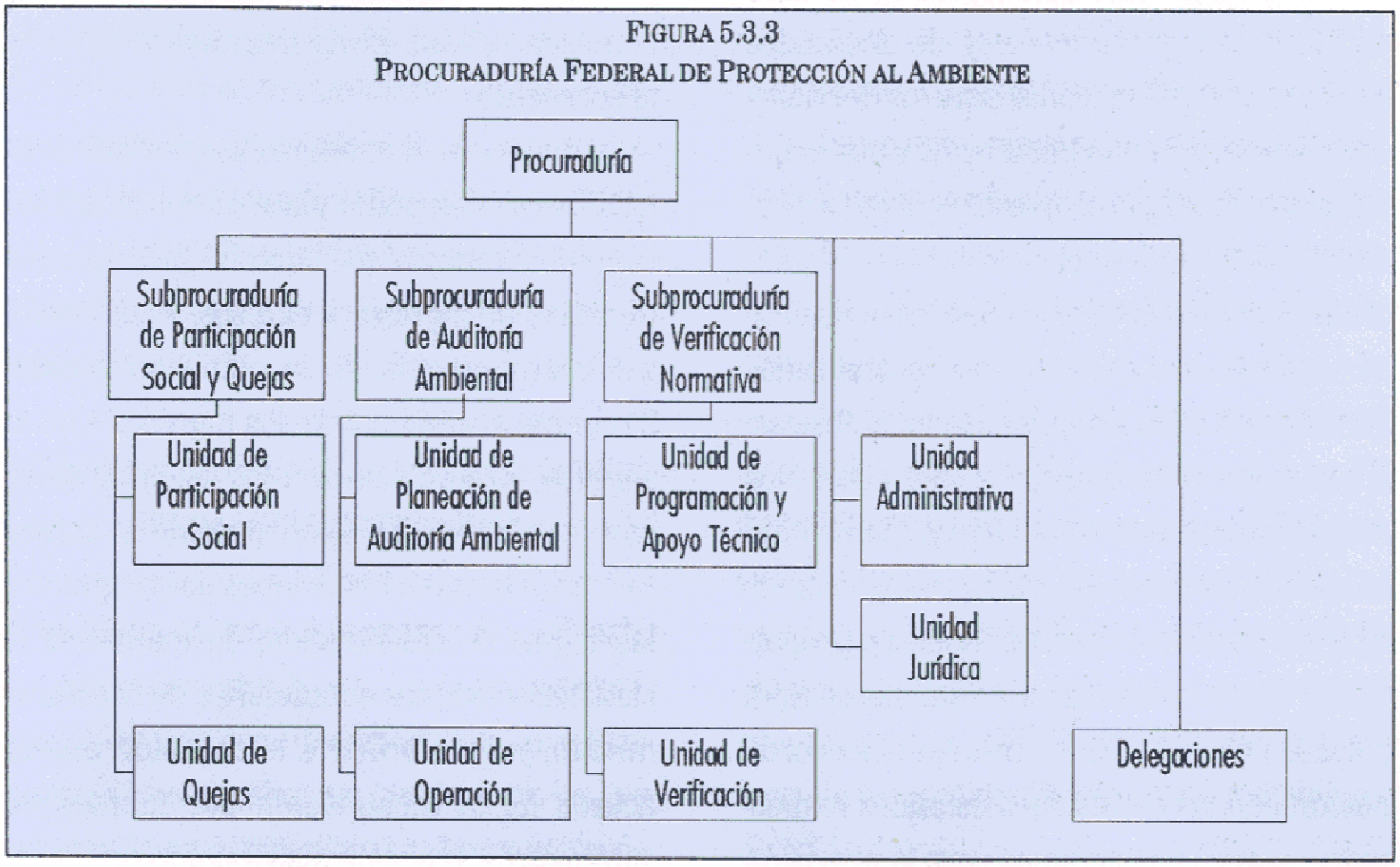
5.4.2. En los estados de la ZMVM

La discusión siguiente describe los métodos principales para el servicio de agua en todo el Valle de México en los estados de Hidalgo, México, Morelos y Tlaxcala. Estos estados, así como los municipios de México, tienen la potestad para suministrar agua potable por mandato de la Constitución mexicana, según la fracción III del Artículo 115, que establece: "Los municipios, con la participación de los estados cuando fuere necesario, y determinado por la ley, tendrán a su cargo los servicios públicos siguientes: [...]agua potable y alcantarillado". El inciso C de la fracción IV del Artículo 115 determina que por mandato constitucional los municipios pueden recibir los ingresos por provisión de servicios como agua y drenaje.

Así, cada estado, conjuntamente con sus municipios respectivos, debe decidir hasta qué grado ejerce el control de los recursos hídricos y hasta dónde delega esta responsabilidad a las alcaldías.

Hidalgo. Su ley estatal previene que esta entidad federativa puede reglamentar el desarrollo y la provisión de los servicios de abastecimiento de agua potable, remoción de las residuales y de las pluviales por medio de alcantarillas y drenes, así como la restitución y el reúso de las residuales. Además expresa que, de conformidad con el Artículo 115 de la Constitución mexicana, tiene derecho a: a) proporcionar los servicios de agua

Figura 5.3.3
Procuraduría Federal de Protección al Ambiente



y drenaje, por sí mismo o mediante empresas privadas; b) implementar estos programas, y c) desarrollar programas para restitución de aguas, y de desagüe. Esta función la realiza a través de la Comisión de Agua y Alcantarillado estatal.

A nivel municipal, este trabajo lo efectúan las comisiones de la especialidad. Estas comisiones son parcialmente estatales y también en parte municipales, puesto que integran aportaciones de ambas categorías políticas. Están autorizadas para –dentro de su jurisdicción– planear, programar, estudiar, proyectar, presupuestar, construir, renovar, expander, operar, administrar y mejorar los sistemas de agua potable, así como proporcionar el servicio de agua a todas las personas con derecho en su jurisdicción.

México. En este Estado, el 9 de octubre de 1991, se publicó la "Ley de Entidades Públicas Descentralizadas para los Servicios de Provisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento". Su propósito es la reglamentación de la base y el procedimiento para crear, estructurar, operar y facultar a las entidades públicas municipales descentralizadas que realizan tales servicios. Como entes casi autónomos, se les autoriza a administrar los recursos, incluidos los hídricos, dentro del área de su jurisdicción. Comprende la facultad para planear, construir, operar y proporcionar mantenimiento a los sistemas de agua potable y alcantarillado, formula –en coordinación con las comisiones estatales respectivas– planes y programas para la provisión de los servicios, y recibir agua en bloque de las fuentes de abastecimiento para distribuirla a los centros de población, demarcaciones y particulares.

Morelos. La "Ley para la Regulación y Provisión de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Morelos" expresa que los servicios locales de agua potable y saneamiento se administren de dos maneras: 1) directa, mediante la Comisión del Agua de Morelos, y 2) indirecta, cuando la distribuye una comisión local.

En el caso 1) la comisión estatal designa un administrador y el personal necesario para emprender el trabajo. En el caso 2) se debe integrar un(a) consejo/comisión local, compuesta por un presidente, un secretario y un tesorero; los usuarios eligen al primero y al tercero, sujetos a la aprobación de la comisión estatal. El Ayuntamiento nombra al secretario.

Cualquiera que sea el caso, los administradores tienen poder para: 1) con ayuda de la junta municipal, formular un presupuesto tentativo de ingresos y egresos, y someterlo a la consideración de la comisión estatal; 2) cobrar y administrar los ingresos por el servicio; 3) suministrar a los usuarios servicios confiables de agua potable y saneamiento; 4) imponer sanciones por violación a las reglas de distribución; 5) mantener el sistema en buenas condiciones de funcionamiento, y 6) informar a la comisión estatal acerca de la recaudación por fuentes de suministro y redes de distribución por áreas

regionales, condominios y complejos residenciales.

Tlaxcala. El artículo 51 de la "Ley de Agua Potable y Alcantarillado", del estado de Tlaxcala, expresa que se establece una Comisión de Agua Potable y Alcantarillado con el fin de sustentar el programa general para proporcionar estos servicios y, si es necesario, asegurarse de construir, renovar, expander, preservar, mantener, operar y administrar los sistemas de agua potable y alcantarillado y de restitución de aguas residuales.

El artículo 59 de la misma ley requiere que "de acuerdo con las necesidades del servicio, y en cumplimiento de un programa de descentralización, el tema aludido en el artículo 51[...] puede ser descentralizado en favor de las entidades públicas municipales, con capacidad legal propia para operar en esta área, que se denominará 'Comisión de Agua Potable y Alcantarillado' del municipio respectivo". Estas entidades se crean por órdenes del ejecutivo (gobernador) del estado, quien les otorga poderes cuyo límite es el previsto en la ley.

5.5. Marco jurídico e institucional en materia tributaria

La nueva ley relativa al agua, de 1991 –tratada en páginas anteriores– requiere que la explotación, el uso o el desarrollo de las aguas nacionales superficiales o subterráneas, ya sea para abastecimiento o para recepción de descargas de desecho, pague *derechos*, según lo previene la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales. El término *derechos* no se usa en el sentido tradicional de la jurisprudencia de los EUA (*rights*). Más bien significa que, cuando alguien ejerce su derecho a utilizar un recurso público como es el caso del agua, debe pagar una contribución por hacerlo. A continuación se discute esa estipulación específica.

En el capítulo VIII del título II, la nueva ley fija los montos de las tarifas por derechos de extracción que se deben pagar por el consumo o la secuencia para el aprovechamiento de las aguas de la nación. El artículo 222 dispone que todos los individuos y corporaciones que emprendan estas actividades deben pagar tales tarifas, ya sea que capten el agua directamente por virtud de concesión, asignación, autorización u otra modalidad de permiso. La tarifa de extracción se basa en la designación de la zona aplicable según lo estipulado en el artículo 231. Las dependencias federales y el Distrito Federal están ubicados dentro de la zona de extracción número uno.

Los estados y el DF reciben el agua por asignación; por lo tanto, deben pagar la tarifa mencionada. La ley expresa que asignatarios como los organismos federales, municipios, estados, entes estatales –privados y municipales– privados o empresas concesionarias, paguen la cantidad especificada en su zona de extracción. En el caso de la zona 1, es de N$6/$m^3$.

5.5.1. Ley de Impuestos por Consumo y Descarga de Aguas de 1991

Una ley aprobada en octubre de 1991 y modificada el 18 de diciembre de 1992 fija un impuesto por consumo de agua. Por disposición de esta ley, toda persona que use bienes públicos tales como agua, acuíferos, o sistemas fluviales, debe pagar un impuesto o tarifa por su consumo. Asimismo, ha de cumplir las normas aplicables para descarga de aguas o pagar el impuesto. Así, adicionalmente a todas las otras normas, el usuario que genere efluentes inficionados debe ajustarse a parámetros que están explícitos en la propia ley. Dichos parámetros se refieren a rubros tales como sólidos suspendidos y contenido de oxígeno. Hay un volumen mínimo para el cual no se aplica la ley; rebasado este mínimo, su aplicación es rigurosa. La Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y la CNA establecen las normas y aplican los impuestos, y es la misma CNA la que los cobra.

Esta ley se elaboró para obligar, a quienes contaminan el agua, a pagar no sólo por el derecho a descargarla, sino también por el costo de hacer cumplir la ley. Así, las recaudaciones que hace la CNA por este concepto son para compensar los gastos tanto para hacerla cumplir como para monitoreo. Si alguien hace descargas de manera inconsistente con esta ley, paga no sólo el impuesto, sino además el daño ambiental y multas.

Los usuarios agrícolas, sin incluir las agroindustrias, están exentos de este impuesto. También se exceptúan los usos domésticos, las minas y muchos más. Esta ley contiene fuertes medidas para evitar fraudes e incluye multas considerables a quienes traten de evadir los impuestos.

Toda descarga que sea superior a 3,000 m^3/mes es gravable. En ausencia de alguna otra norma promulgada por cualquiera otra dependencia, se aplican las referentes a sólidos disueltos totales y a oxígeno. Quienquiera que rebase tales cifras, debe pagar impuestos. Si existe una norma establecida para una substancia en particular, el exceso implica tal pago.

Las tarifas por descarga son extremadamente altas, lo cual genera la necesidad de tratar el agua de desecho, ya sea por contrato o estableciendo planta propia. El impuesto se paga trimestralmente, en los bancos. Si se carece de medidor, las autoridades hacen una estimación cuantitativa de la descarga, o el usuario puede hacer una declaración, que luego se evalúa. Generalmente, la cantidad estimada considera una concentración muy elevada, lo cual motiva a los industriales a instalar medidores. En la zona 1, la tarifa es de N$420 por descarga de agua residual, N$270 por kilogramo de DQO (demanda química de oxígeno), y N$480 por kilogramo de SST (sólidos suspendidos totales).

En caso de descargas intencionales, no permitidas, el gobierno calcula los daños al público, y cobra el costo total. Si se logra demostrar que éste es menor, se puede reducir la multa. En efecto, toda nueva instalación industrial debe establecer su propia planta de

tratamiento. Una recomendación práctica es que también se separe el desagüe pluvial de los otros desagües, puesto que con aquél se podría rebasar el límite permitido, y exponerse a sanciones. Los municipios también pagan estos impuestos, cuyos costos se prorratean entre los usuarios. El inicio de la vigencia de la ley se difirió a enero de 1993; como ya se hizo notar, tiene el doble propósito de obligar a construir plantas de restitución y de reúso del agua; con tales tarifas, probablemente se obtendrá el efecto deseado.

Resumen biográfico de los miembros del Comité

El **Dr. Charles T. DuMars** obtuvo su licenciatura en psicología en la Universidad Estatal de Oregon y su doctorado en Derecho en la Universidad Estatal de Arizona. Es miembro de la barra de abogados de los estados de Nuevo México y Arizona. Actualmente es profesor en la Universidad de Nuevo México, en donde imparte cursos de derecho del agua, derecho minero, derecho constitucional y derecho comparativo internacional privado. Ha trabajado en el "Western States Water Council" y en el "Bureau of Land Management Advisory Board" del estado de Nuevo México. De este último estado, es investigador del "Natural Resources Law Center" en relación con proyectos de transferencia de agua. El Dr. DuMars también fue miembro del "Committee on Irrigation-Induced Water Quality Problems" del "National Research Council".

El **Dr. Ismael Herrera Revilla** es matemático –con amplia formación en matemáticas básicas– dedicado a las aplicaciones de las matemáticas: ingeniería civil, geofísica y recursos hidráulicos, principalmente. Obtuvo su doctorado en la División de Matemáticas Aplicadas de la Brown University –después de realizar estudios en química, física y matemáticas en la UNAM. Su trabajo científico incluye tanto contribuciones metodológicas como aplicaciones específicas.

Ha publicado alrededor de 150 artículos de investigación. Los temas de su actividad han sido ecuaciones diferenciales parciales –es editor de "Numerical Methods for Partial Differential Equations: An International Journal" (John Wiley, Nueva York)–, principios variacionales, dinámica de fluidos, viscoelasticidad, propagación y difracción de ondas elásticas, e ingeniería sísmica. En años recientes ha prestado especial atención a la modelación numérica –métodos numéricos de las ecuaciones diferenciales,

incluyendo los métodos de Trefftz y de adjunto localizado (LAM), que él introdujo, y procedimientos de paralelización de los modelos numéricos.

Bajo su supervisión se han realizado un gran número de aplicaciones en diferentes regiones de México –tales como, modelos computacionales para la planta geotérmica de cerro Prieto y el Sistema Hidráulico Subterráneo de la ciudad de México.

Fue organizador y fundador del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y es ex-director del Instituto de Geofísica de la UNAM. También, es ex-presidente tanto de la Academia Nacional de la Investigación Científica como de la Academia Nacional de Ingeniería. Ha recibido los tres premios científicos más importantes que se ofrecen en México. Su actividad internacional incluye responsabilidades editoriales y puestos consultivos de diversas sociedades y universidades. En la Universidad de Princeton, fue miembro del "Advisory Council" (Ingeniería Civil e Investigación de Operaciones), durante ocho años. En la actualidad, es catedrático Patrimonial de excelencia (CONACYT) e investigador emérito de la UNAM (Instituto de Geofísica).

La **Dra. Irina Cech** recibió su maestría en hidrología en la Universidad de Moscú y obtuvo su doctorado (Ph.D.) en ciencias de salud ambiental en la Universidad de Texas. Actualmente es profesora de salud ambiental e hidrología en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en Houston, Escuela de Salud Pública. Sus áreas de interés incluyen: salud ambiental, hidrología y salud internacional. Sus investigaciones se ocupan del estudio de acuíferos y del desarrollo de fuentes de alimentación hidráulica de los acuíferos, geoquímica y efectos sobre la salud del uso de fuentes inadecuadas y contaminadas.

La Dra. Cech ha llevado a cabo investigación de campo, enseñanza y diseño de planes de estudio en salud ambiental en México, Honduras y en el Comité de Planeación del Grupo de Estudio sobre el Calentamiento Global y Recursos Acuíferos. Como miembro del Comité de Ciencia e Ingeniería del Congreso ha trabajado como asistente especial en el Subcomité de Planeación e Investigación del Comité de Energía y Comercio. Es Consultora de la Organización Mundial de la Salud y de la Organización Panamericana de la Salud.

La **Dra. Cristina Cortinas de Nava** obtuvo su licenciatura en biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el doctorado en ciencias naturales en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París, Francia. Fue investigadora en la Clínica de Génetica Médica del Hospital Infantil de París, durante 6 años. En México fue investigadora del IMSS, en donde estuvo a cargo del Departamento de Biología de la Nutrición. En 1971 ingresó al Instituto de Investigaciones Biomédicas en donde actualmente sigue colaborando como investigadora y en donde fundó el La-

boratorio de Genética Toxicológica y la Unidad de Investigación en Salud Ambiental. En tres ocasiones ha colaborado con el Gobierno de la República a través de la Comisión Nacional de Ecología del DDF, en donde estuvo a cargo de la Subdirección de Impactos del Ambiente en la Salud. Fue directora general de Salud Ambiental en la Secretaría de Salud (1989-1991). Asesora del Instituto Nacional de Ecología (1992 a la fecha). Es investigadora nacional. Durante los dos últimos años representó al Instituto de Ecología como observadora en las reuniones de medio ambiente de la OCDE y preparó el ingreso de México a la misma en lo relativo a las cuestiones ambientales.

Actualmente es investigadora del Instituto de Investigaciones Biomédicas en el Departamento de Genética y Toxicología Ambiental. Es coautora de varios libros sobre impacto ambiental sobre residuos industriales y monografías sobre residuos peligrosos.

El **Dr. José Ramón Cossío Díaz** es licenciado en derecho por la UNAM. Obtuvo su maestría en derecho constitucional y administrativo en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Derecho de la UNAM. Realizó su especialidad en derecho constitucional y ciencia política en el Centro de Estudios Constitucionales de Madrid, obteniendo el premio anual al mejor trabajo de derecho constitucional. Su doctorado lo obtuvo en la Facultad de Derecho de la Universidad Complutense de Madrid. Dentro de sus actividades académicas el Dr. Cossío ha ocupado los siguientes cargos: investigador asociado C de tiempo completo en el Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM; asesor de la presidencia de la Comisión de Derechos Humanos de la H. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión; secretario particular del Dr. Jorge Carpizo, como ministro de la Suprema Corte de Justicia de la Nación; asesor especial del Dr. Jorge Carpizo, presidente de la Comisión Nacional de Derechos Humanos; secretario de estudio y cuenta del Lic. Ulises Schmill Ordóñez, ministro de la Suprema Corte de Justicia de la Nación; coordinador de asesores del Mtro. Ulises Schmill Ordóñez, presidente de la Suprema Corte de Justicia de la Nación; profesor de derecho constitucional I, en la licenciatura en derecho del ITAM; profesor de "Presupuesto, contabilidad y gasto público", de la maestría en políticas públicas del ITAM; profesor del Seminario de teoría del derecho I, en la licenciatura en derecho del ITAM; profesor de la materia "Ideas e Instituciones de México"; profesor en el curso de Derecho y economía de la maestría en gobierno y asuntos públicos de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO), sede México. Es autor de los siguientes artículos de investigación: "Poder legislativo y planeación en México"; "Estudio social y derecho procesal"; "Reforma del Estado y derecho"; "La legitimación del ministerio público para interponer el recurso de revisión en amparo contra leyes";

"La representación del presidente de la República en los juicios de amparo"; "Las atribuciones legislativas del pleno de la Suprema Corte de Justicia"; "Algunos aspectos de la responsabilidad de los servidores públicos del Poder Judicial de la Federación"; "Estado de derecho y lucha contra la impunidad; Constitutional Regime of Mexican International Waters. El Dr. Cossío ha publicado los siguientes libros: *Estado social y derechos de prestación* (1989); *Las atribuciones no jurisdiccionales de la Suprema Corte de Justicia* (1992); compilación y presentación de los *Estudios sobre derecho y lógica* (1993). Dentro de otras de sus actividades y cargos el Dr. Cossío es editor del *Boletín del Instituto Iberoamericano de Derecho Constitucional* de la UNAM; es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1989; miembro del Comité Organizador del Seminario Internacional de Estados sobre teoría y filosofía del derecho de Eduardo García Maynez, bajo el patrocinio del ITAM y la Escuela Libre de Derecho (1993); miembro del Consejo Consultivo del Instituto de Administración Pública del estado de Colima (1992); miembro regular de la Academia de la Investigación Científica, A. C.

El **Dr. Randall Crane** obtuvo la licenciatura en historia en la Universidad de California, Santa Bárbara. La maestría en planeación urbana, en la Universidad Estatal de Ohio y su doctorado en estudios de planeación urbana del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Actualmente es profesor asistente de análisis y diseño ambiental en el Programa de Ecología Social en la Universidad de Irvine, California. Sus intereses en investigación y docencia incluyen desarrollo y crecimiento urbano, suministro y demanda de agua en países en vías de desarrollo, administración pública, uso del suelo y análisis costo-beneficio. Ha sido profesor visitante en el Centro de Estudios Económicos y en el Colegio de México, en la ciudad de México, en donde enseñó y llevó a cabo una investigación sobre crecimiento urbano y desarrollo en la ciudad de México.

El **Dr. Robert N. Farvolden** obtuvo su licenciatura y maestría en la Universidad de Alberta y su doctorado (Ph.D.) en hidrogeología en la Universidad de Illinois. El Dr. Farvolden es fundador del Programa de graduados en hidrología de acuíferos en la Universidad de Waterloo, donde actualmente es profesor de hidrología regional en el Departamento de Ciencias de la Tierra. Sus principales intereses en investigación están en relación con la investigación de recursos acuíferos, relaciones entre el agua superficial y subterránea y la contaminación del agua subterránea. Desde 1983 ha estado haciendo investigación de campo en hidrogeología física, calidad del agua e hidrología isotópica en el Valle de México. Actualmente es co-director del proyecto Net en relación a seis proyectos sobre agua subterránea, iniciado por el Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo. El Dr. Farvolden ha participado en innumerables comités de

asesoría tanto en los Estados Unidos como en Canadá.

El **Dr. Richard S. Engelbrecht** obtuvo su licenciatura en la Universidad de Indiana; su maestría y doctorado (Sc.D.) del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Ha trabajado en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, desde 1954. Actualmente es profesor de ingeniería ambiental y lleva a cabo investigación en el campo de contaminación y control de calidad del agua. El Dr. Engelbrecht es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería, ha sido director del Comité de Reciclado, Reúso y Conservación del Agua en Zonas Áridas del National Research Council (1986). Fue director del Comité para la Evaluación Nacional de la Calidad del Agua de 1988 a 1990 y fue miembro fundador del Water Science and Technology Board del NRC.

La **Dra. Helen Ingram** obtuvo su licenciatura en estudios gubernamentales en el Colegio Oberlin y su doctorado en derecho y gobierno en la Universidad de Columbia. Actualmente es directora del Centro Udall de Estudios de Administración Pública y es profesora del Departamento de Ciencias Políticas. Los campos de interés de la Dra. Ingram son la formación e implementación de políticas de gobierno, políticas de administración de recursos acuíferos, políticas sobre el medio ambiente y el estudio de la relación México-Estados Unidos. Ha llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones sobre los aspectos de recursos acuíferos, incluyendo administración del agua, y es autora de libros y artículos sobre la administración de los acuíferos. Trabajó en la National Water Commission y fue Investigadora en el Comité de Recursos para el Futuro. La Dra. Ingram ha participado en varios Comités del NRC y fungió como Miembro del Water Science and Technology Board.

El **Dr. Jesús Kumate Rodríguez** cursó estudios de médico cirujano en la Escuela Médico Militar. Realizó su residencia en el Hospital Central Militar; su doctorado en ciencias, en la Escuela Nacional de Ciencias Biomédicas del Instituto Politécnico Nacional.

Ha pertenecido al PRI desde 1983 y desempeñado cargos administrativos en el Gobierno Federal como director del Hospital Infantil de México, SSA, coordinador de los Institutos Nacionales de Salud, subsecretario de Servicios de Salud y secretario de Salud.

Entre sus actividades académicas están las de profesor en la Escuela Médico Militar, en la UNAM y en el IPN, investigador en el Hospital Infantil de México, e investigador nacional en la Secretaría de Educación Pública y miembro de El Colegio Nacional desde 1974.

Es autor de los siguientes libros: *Temas selectos de infectología pediátrica*, México, 1977; *Manual de infectología*, 1973-1992, 13 eds.; *Abscesos hepáticos amibianos en los niños*, 1974; *Inmunidad e inmunizaciones*, 1977; *Antibióticos y quimiobióticos*, 1979; *La salud de los mexicanos y la medicina en México*, 1977; *Investigación*

clínica, UNAM, 1986. *Salud para todos: Utopía o realidad*, 1989, *Información en salud: la salud en cifras*, 1993; *Vericuetos en la investigación y desarrollo de las vacunas*, México, 1993; *Cólera, endemias, epidemias y pandemias*, 1993; y *Sistemas de salud en las Américas*, 1994.

Ha fungido como presidente de la Academia Nacional de Medicina, 1975; y de las Sociedades Mexicanas de Bioquímica, de Infectología, de Inmunología y de Investigación Pediátrica.

También ha recibido los siguientes premios y condecoraciones Premio Carnot, 1962; Medalla Federico Gómez, 1964; Premio Nestlé, 1967; Legión de Honor, Francia, Caballero, 1978; Oficial, 1988; Premio Balmis, 1970 y 1982; Premio Varela, 1984; Servicios Distinguidos, Secretaría de la Defensa Nacional, 1985; Premio Soto, 1988; Premio Rosenkranz, 1989; Doctor Honoris Causa, Universidad de Nuevo León, 1990; Orden Francisco Hernández, Costa Rica, 1991, Orden Rodolfo Robles, Guatemala, 1993; Miembro Honorario, Academia Nacional de Medicina, Argentina 1992, Miembro Honorario, Academia Mexicana de Cirugía, 1993 y presidente del Consejo Ejecutivo de la Organización Mundial de la Salud, 1994-1995.

La Dra. Lucrecia Lozano García maestra en historia del arte por la Universidad Iberoamericana, en la ciudad de México. Obtuvo su doctorado en sociología en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM. Durante el periodo 1988-1992, fue Coordinadora del Centro de Estudios Latinoamericanos (CELA), de la UNAM. La Dra. Lozano es autora y coautora de libros y ensayos sobre América Latina y sobre la crisis centroamericana en los años ochenta, editados en México, Venezuela, Puerto Rico y Estados Unidos. Como panelista y conferencista, ha participado en más de 60 seminarios, congresos y encuentros en países de América Latina, en España y en Estados Unidos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1989. Desde agosto de 1993, es directora del Departamento de Relaciones Internacionales del Campus Monterrey del Instituto Tecnólogico y de Estudios Superiores de Monterrey, en el cual se desempeña como profesora titular.

Juan Manuel Martínez García es egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde recibió el título de ingeniero civil, en 1958. Posteriormente, en 1959, obtuvo el posgrado en ingeniería sanitaria y ambiental en la misma facultad.

Dentro de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) fue Coordinador del Programa de Colonias Populares entre 1978 y 1980; subdirector y director de operación en 1981-1984; y Director general de la DGCOH de 1984 a 1985.

Entre 1986 y 1988 fue subdirector regional de los módulos 5 y 6 del Programa Emergente Renovación Habitacional Popular en el Distrito Federal. Director ejecuti-

vo y delegado fiduciario especial de Vivienda, Desarrollo Social y Urbano del Distrito Federal, de abril a diciembre de 1988. De 1988 a 1994, fue director general de Construcción y Operación Hidráulica.

El Ing. Martínez García es miembro de las siguientes asociaciones gremiales, técnicas y docentes: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria, Asociación Mexicana Indigenista, Sociedad Mexicana de Ingenieros, American Water Works Association, Water Environment Federation; es socio vitalicio del Colegio de Ingenieros Civiles de México y de la Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Sociedad Mexicana de Hidráulica, y de la Generación de Ingenieros de 1954, fundador de la Ciudad Universitaria de México, habiendo fungido como tesorero y presidente en sus Consejos Directivos, unión Mexicana de Asociaciones de Ingenieros, actualmente preside el Comité de Ecología Water Pollution Control Federation.

Desde 1973 es profesor de los diferentes cursos de ingeniería sanitaria y ambiental, y redes de agua potable y drenaje de la División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, vicepresidente del Colegio de Ingenieros Civiles de México 1992-1993 y presidente de la Sociedad Mexicana de Ingenieros del Distrito Federal 1993-1996.

El **M. en C. Rubén Martínez Guerra** obtuvo su licenciatura en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, en 1965. Ha trabajado en la empresa privada en relación a la hidrología de acuíferos en Socorro, Nuevo México. En 1970 obtuvo la maestría en geofísica e hidrología en el Instituto de Minas y Tecnología del Estado de Nuevo México. Desde 1970 a la fecha se ha desempeñado como consultor privado en geohidrología en más de 300 estudios regionales en México. Es profesor de la UNAM desde 1972, e inició estudios de Doctorado en 1986. Desde 1988 colabora con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y es Miembro Técnico Consultivo de la Comisión Nacional del Agua.

El **Dr. Carlos Vélez Ocón** obtuvo su maestría y doctorado (Ph.D.) en ingeniería nuclear en la Universidad de Michigan. Fue director general del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), hasta el año de 1994. Es miembro de la Sociedad Nuclear Americana, de la Academia Nacional de Ingeniería, de la Academia Mexicana de Ingeniería, de la Academia Mexicana de Física y de la Sociedad Mexicana Nuclear. Ha sido asesor en Ingeniería Nuclear en la Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal; profesor visitante en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales en la Universidad Politécnica de Madrid, director general adjunto de la Agencia Internacional de Energía Atómica en Viena y jefe del Departamento de Energía Nuclear de la Comisión Federal de Electricidad.

El **Dr. David Wilk Graber** obtuvo el grado profesional de licenciatura en arquitectura

en la Universidad Autónoma Metropolitana en la ciudad de México; su maestría en planeación regional y urbana, y su doctorado en planeación medio ambiental en la Universidad de Berkeley, California. Actualmente es consultor independiente en la ciudad de México donde coordina varios proyectos incluyendo diversos programas del Banco Mundial para valoraciones medio ambientales rápidas y planeación medio ambiental; un plan maestro medio ambiental para San Pedro Sula, Honduras, y programas de reforma federal en el Distrito Federal. Previamente el Dr. Wilk fue profesor en el profesor en el Centro de Investigación y Docencia Económicas, A. C., y ha ocupado numerosos cargos como consultor. El Dr. Wilk disfrutó de una beca Fullbright habiendo participado en el México-U.S. Mutual Educational Exchange program at U.C., Berkeley. Sus intereses en investigación incluyen los impactos de las reglamentaciones ambientales y los efectos de los incentivos económicos, el uso de sistemas de información geográfica, y aspectos de crecimiento urbano. Ha publicado varios reportes a través del Banco Mundial y ha sido ponente invitado en numerosos simposios profesionales.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Fig. 1.1. La Cuenca del Valle de México y su localización.

Fig. 1.2. Los lagos precortesianos.

Fig. 1.3. Cuencas que son fuentes potenciales de abastecimiento para la Zona Metropolitana del Valle de México.

Fig. 1.4. Plano Base.

Fig. 1.5. Mapa topográfico.

Fig. 1.6. Mapa hidrológico de la Cuenca de México. Tomada de las referencias 4 y 5 del capítulo.

Fig. 1.7. Distribución mensual de la lluvia.

Fig. 1.8. Crecimiento de la ZMVM 1940-1990. Tomada de la referencia 17 del capítulo.

CAPÍTULO 2. ABASTECIMIENTO Y DRENAJE

Fig. 2.1.1. Mapa Topográfico.

Fig. 2.2.1. Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y las áreas de servicio del Distrito Federal y el Estado de México, para el suministro y drenaje de agua. Tomada de la referencia 48 del capítulo.

Fig. 2.2.2. Fuentes y cantidades de agua que ingresan en la ZMVM. Tomada de las referencias 46, 52, 54 a 56 del capítulo.

Fig. 2.2.3. Las cinco zonas asociadas a la distribución de agua potable en el área de servicio del Distrito Federal.

Fig. 2.2.4. Ubicación de los campos de pozos que suministran aguas subterránea a la ZMVM: (1) Sur, (2) Metropolitano, (3) Este, y (4) Norte. Tomada de las referencias 54, 55, y 59 del capítulo.

Fig. 2.2.5. Áreas del sistema de drenaje del Distrito Federal. Tomada de la referencia 51 del capítulo.

Fig. 2.2.6 Sistema general de drenaje. Tomada de la referencia 61 del capítulo.

Fig. 2.3.1. Sismoestratigrafía del Valle de México. Tomada de la referencia 45 del capítulo.

Fig. 2.3.2. Sección geológica del modelo conceptual (N-S). Tomada de la referencia 45 del capítulo.

Fig. 2.3.3. Sección geológica del modelo conceptual (O-E). Tomada de la referencia 45 del capítulo.
Fig. 2.3.4. Sistema de flujo. Tomada de la referencia 34 del capítulo.
Fig. 2.4.1. Mapa de ubicación de los principales campos de pozos del ZMVM.Tomada de las referencias 54, 55 y 59 del capítulo.
Fig. 2.4.2. Crecimiento de la población *vs.* pozos municipales y gastos de bombeo. Tomada de la referencia 1 del capítulo.
Fig. 2.4.3. Isobatas de niveles estáticos, septiembre de 1987. Tomada de la referencia 70 del capítulo.
Fig. 2.4.4. Evolución del nivel estático en el periodo 1986-1992. Tomada de la referencia 34 del capítulo.
Fig. 2.4.5. Hundimiento de la Catedral y la Alameda. Tomada de la referencia 75 del capítulo.
Fig. 2.4.6. Declinación anual del nivel estático en el acuífero de Chalco (1978-86). Tomada de la referencia 73 del capítulo.
Fig. 2.4.7. Subsidencia del terreno en Chalco (1984-89). Tomada de la referencia 73 del capítulo.
Fig. 2.4.8. Comparación del hundimiento en Chalco y el centro de la ciudad de México. Tomada de la referencia 73 del capítulo.
Fig. 2.4.9. Concentración total de sólidos disueltos en el acuífero principal, 1986. Tomada de la referencia 67 del capítulo.
Fig. 2.4.10. Cambios en la calidad del agua. Tomada de la referencia 67 del capítulo.

CAPÍTULO 3. CALIDAD Y SALUD PÚBLICA

Fig. 3.2.1. Sistema lacustre. Tomada del Atlas de la ciudad de México, DDF. Colegio de México.
Fig. 3.2.2. Uso del suelo en la ZMVM.
Fig. 3.4.1. Organigrama del Laboratorio Central de Control.
Fig. 3.5.1. Incidencia de enfermedades diarreicas por jurisdicción sanitaria, en el Valle de México (1991).
Fig. 3.5.2. Mortalidad por enfermedades diarreicas por jurisdicción sanitaria, en el Valle de México (1991).

Capítulo 4. ADMINISTRACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZMVM

Fig. 4.3.1. Tarifas bimestrales, sin medidor, como función del diámetro del tubo [DDF, 1992 b].
Fig. 4.3.2. Relación de viviendas con suministro de agua en el interior de la ZMVM en 1990, por delegación y municipio [INEGI, 1991].
Fig. 4.3.3. Evolución del porcentaje de viviendas con suministro en el interior, 1960 a 1990.
Fig. 4.3.4. Evolución del porcentaje de viviendas conectadas al drenaje o con fosas sépticas, 1960 a 1990.
Fig. 4.3.5. Inequidad social en el acceso al agua en ambos Nogales (octubre, 1993).

CAPÍTULO 5. MARCO JURÍDICO E INSTITUCIONAL

Fig. 5.2.1. Estructura institucional de la Comisión Nacional del Agua.
Fig. 5.3.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
Fig. 5.3.2. Secretaría de Desarrollo Social.
Fig. 5.3.3. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1. División política de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Tabla 1.2. Población de la ciudad de México (1742-1990).

Tabla 1.3. Zona Metropolitana del Valle de México: población relativa y tasa de crecimiento medio anual, 1950, 1970 y 1990. Tomada de la referencia 20 del capítulo.

Tabla 1.4. Zona Metropolitana del Valle de México: población, superficie y densidad, 1950, 1970 y 1990. Tomada de la referencia 20 del capítulo.

CAPÍTULO 2. ABASTECIMIENTO Y DRENAJE

Tabla 2.1.1. Lagos precortesianos y sus profundidades.

Tabla 2.2.1. Características de las áreas de servicio y de consumo de agua suministrada por el Distrito Federal y el Estado de México.

Tabla 2.2.2. Fuente y cantidad de agua cruda abastecida al Distrito Federal y a las áreas del Estado de México (ZMVM). Tomada de las referencias 54 a 56 del capítulo.

Tabla 2.2.3. Campos de pozos dentro del Valle de México y sus tasas de extracción de agua. Tomada de la referencia 60 del capítulo.

Tabla 2.2.4. Puntos principales de entrada de agua potable al sistema de distribución del área de servicio del Distrito Federal. Tomada de la referencia 54 del capítulo.

Tabla 2.2.5. Número de pozos dentro del área de servicio del Estado de México que no cumplen las Normas de Agua Potable. Tomada de la referencia 55 del capítulo.

Tabla 2.2.6. Plantas de tratamiento de agua dentro del área de servicio del Distrito Federal. Tomada de las referencias 46 y 54 del capítulo.

Tabla 2.2.7. Resultados del censo de 1990. Tomada de la referencia 48 del capítulo.

Tabla 2.2.8. Características de las aguas de desecho del Gran Canal a la salida del Valle de México.

Tabla 2.2.9 Plantas de tratamiento de aguas residuales dentro del área de servicio del Distrito Federal. Tomada de la referencia 46 del capítulo.

Tabla 2.2.10. Plantas de tratamiento de aguas residuales dentro del área de servicio del Estado de México. Tomada de las referencias 49 y 52 del capítulo.

Tabla 2.4.1. Fuente y cantidad de agua cruda abastecida al Distrito Federal y a las áreas del Estado de México (ZMVM). Tomada de la referencias 54 a 56 del capítulo.
Tabla 2.4.2. Pozos en operación –según el censo de 1990– por uso y tasa de extracción.
Tabla 2.4.3. Promedio anual de abatimiento del nivel freático durante los años 1988 a 1991.
Tabla 2.4.4. Evolución del hundimiento.
Tabla 2.4.5. Balance del acuífero de la ZMVM. Adaptada de la referencia 34 del capítulo.
Tabla 2.4.6. Estimación del volumen almacenado en el acuífero principal. Tomada de la referencia 34 del capítulo.
Tabla 2.5.1. Agentes infecciosos representativos potencialmente presentes en aguas municipales residuales. Tomada de la referencia 79 del capítulo.
Tabla 2.5.2. Tipos y rangos representativos de densidad de microorganismos en aguas residuales brutas. Tomada de la referencia 81 del capítulo.
Tabla 2.5.3. Composición típica del agua municipal residual en bruto (no tratada). Tomada de la referencia 81 del capítulo.
Tabla 2.5.4. Operaciones y procesos unitarios para remoción de los contaminantes principales contenidos en aguas municipales residuales. Adaptada de la referencia 81 del capítulo.
Tabla 2.5.5. Eficiencia general de remoción de contaminantes específicos por operaciones y procesos unitarios varios. Adaptada de la referencia 82 del capítulo.
Tabla 2.5.6. Aplicación de aguas municipales de desecho e implicaciones. Adaptada de la referencia 81 del capítulo.
Tabla 2.5.7. Criterios acerca de agua restituida para irrigación en el estado de California. Adaptada de las referencias 81 y 83 del capítulo.
Tanbla 2.5.8. Factores para desarrollar pautas de recarga de agua subterránea. Tomada de la referencia 81 del capítulo.

CAPÍTULO 3. CALIDAD Y SALUD PÚBLICA

Tabla 3.2.1. Sitios principales donde se disponen los desechos sólidos municipales en el Distrito Federal (1992). Modificado del Informe General en Materia de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente 1991-1992 (SEDESOL-INE, 1993).
Tabla 3.2.2. Clasificación de las empresas industriales en la ZMVM según su tamaño.
Tabla 3.2.3. Tipos principales de industrias en la ZMVM.
Tabla 3.3.1. Evolución de la calidad del agua en el Distrito Federal. Tomada de: DGCOH, 1994.
Tabla 3.3.2. Fugas de agua potable eliminadas en las redes primaria y secundaria de agua potable. Tomada de: DGCOH, 1992.
Tabla 3.4.1. Colonias y cruceros existentes por delegación política en el Distrito Federal.
Tabla 3.4.2. Porcentaje de muestras en la red de distribución conforme a la Norma en 1993.
Tabla 3.4.3. A Porcentaje de lecturas de cloro conforme a la Norma en 1993.
Tabla 3.4.3. B Porcentaje de instalaciones con calidad de agua satisfactoria. Tomada de: DGCOH-DDF, 1994.
Tabla 3.5.1. Población delegacional del Distrito Federal estimada en 1992. Tomada de: DGCOH-DDF, 1992.

Tabla 3.5.2. Estimación de la población de la Zona Metropolitana conrubada, 1993. Tomada de: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento, 1993.

Talbla 3.5.3. Diez causas principales de mortalidad general en los Estados Unidos Mexicanos, 1991. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.4. Diez causas principales de mortalidad general en el Estado de México. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.5. Diez causas principales de mortalidad general en el Distrito Federal, 1991. Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.6. Diez causas principales de mortalidad infantil en los Estados Unidos Mexicanos, 1991. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.7. Diez causas principales de mortalidad infantil en el Estado de México, 1991. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.8. Diez causas principales de mortalidad infantil en el Distrito Federal, 1991. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.9. Incidencia y porcentaje de enfermedades diarreicas por jurisdicción sanitaria en el Distrito Federal, 1991. Tomada de: Infome Semanal de Casos Nuevos de Enfermedades, SS-EPI-SSA.

Tabla 3.5.10. Incidencia y porcentaje de enfermedades diarreicas por jurisdicción sanitaria conurbada; Estado de México, 1991.

Tabla 3.5.11. Jurisdicciones sanitarias con morbilidad alta por diarreas, 1991. Tomada de: Información epidemiológica de morbilidad por jurisdicción sanitaria, 1991.

Tabla 3.5.12. Jurisdicciones sanitarias con morbilidad baja por diarreas, 1991. Tomada de: Información epidemiológica de morbilidad por jurisdicción sanitaria, 1991.

Tabla 3.5.13. Mortalidad y porcentaje de enfermedades diarreicas por jurisidicción sanitaria en el Distrito Federal, 1991.

Tabla 3.5.14. Jurisdicciones sanitarias con mortalidad alta por diarreas. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

Tabla 3.5.15. Distribución etaria de las muertes por diarrea. Tomada de: Tabulaciones de defunciones, SPP-INEGI, 1991b.

CAPÍTULO 4. ADMINISTRACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZMVM.

Tabla 4.2.1. Inversión en el sector hídrico. Tomada de: SNA, 1992.

Tabla 4.3.1. Consumo de agua por sector en el DF en 1982 y 1992. Tomada de: Bläsig y Juárez, 1990; y DDF, 1992b.

Tabla 4.3.2. Tarifas para el año de 1992, usuario no doméstico. Tomada de: DDF, 1992b.

Tabla 4.3.3. Tarifas para el año de 1992, usuario doméstico. Tomada de: DDF, 1992b.

Tabla 4.3.4. Fuentes de agua en viviendas en la ZMVM, 1990. Tomada de: Censo de población, 1990 (INEGI, 1991).

Tabla 4.3.5. Viviendas con servicio de agua y drenaje en 1960-1990 en la ZMVM por unidad político-administrativa. Tomada de: Censo de población de 1960, 1970, 1980 y 1990 (INEGI, 1991).

El agua y la ciudad de México, se terminó de imprimir en febrero de 1995 en los talleres de Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A. de C.V. Emma 126, Col. Nativitas, México 03500, D.F. La edición consta de 500 ejemplares.

Diseño y cuidado editorial:
Carolina Herrera

Tipografía y formación:
Ocelote, S.A. de C.V.

Corrección:
Ana Segovia

El futuro del suministro de agua a la ciudad de México, como a muchas otras ciudades del mundo, es incierto. Su caso presenta problemas extremos que habrán de encararse en muchos otros lugares.

Por estas razones, la complejidad del problema y la posibilidad de generar experiencias útiles para muchas otras partes, las academias de investigación científica e ingeniería de México –Academia de la Investigación Científica, A.C. y la Academia Nacional de Ingeniería, A.C.–, conjuntamente con el National Research Council de la U.S. National Academy of Sciences, de los Estados Unidos, seleccionó el estudio de las experiencias y los problemas de suministro de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México, para abordarlo conjuntamente como parte de una colaboración binacional, no gubernamental, que han establecido.

El suministro de agua a la ciudad de México representa un desafío formidable. El acuífero que subyace a la ciudad, que en la actualidad constituye la fuente principal de abastecimiento, almacena un gran volumen, pero su utilización está severamente restringida por el hundimiento del suelo que produce su explotación. Otras fuentes, aunque se utilizan, son sumamente costosas, tanto por la distancia a que se encuentran como por las diferencias de nivel que hay que vencer.

Este libro presenta los resultados principales obtenidos en el proyecto. Además de abordar cuestiones técnicas, se tratan aspectos sociales, económicos y de administración pública. Está dividido en cinco capítulos y un resumen ejecutivo que contiene las conclusiones y recomendaciones. Se abordan cuatro grandes aspectos del problema: abastecimiento y drenaje; calidad y salud pública; administración de la demanda; y marco jurídico e institucional.

Aunque un estudio de esta naturaleza no puede hacer recomendaciones detalladas, se establecen lineamientos que, de seguirse, aumentarán la sustentabilidad del suministro de agua a la ciudad de México. Se espera que los conceptos contenidos aquí sean útiles no solamente para quienes toman las decisiones, los investigadores y el público interesado en el agua de la ciudad de México, sino también para quienes se involucran en esta clase de problemas en otras regiones del mundo.

