



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“RIESGOS HIDROGEOLÓGICOS MÁS IMPORTANTES QUE
AFECTAN A LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

MARTÍN HUERTA CHÁVEZ

VICTOR GABRIEL DURÁN TOLENTINO



DIRECTOR DE TESIS: M. en I. HUGO S. HAAZ MORA

MEXICO, D.F.

2005

m. 344009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A MI MADRE

Por todo el cariño y amor inconmensurables que me has otorgado, por el apoyo y esfuerzo inmensos para conmigo y por ser una persona que se subleva ante cualquier adversidad, este logro es tuyo. Gracias Mamá.

A RAFAEL

Por el apoyo a lo largo de todos estos años a pesar de todas las dificultades.

A MI FAMILIA

Por su confianza y apoyo incondicional, a los que están y a los que se encuentran en otro lugar.

A MIS AMIGOS

Por estar cerca de mí, en los buenos y malos momentos, por su amistad, que es uno de mis más preciados tesoros.

A MIS MAESTROS.

Por todo el conocimiento transmitido a lo largo de los años, y en especial al M. en I. Sergio Hugo Hazz Mora por su desinteresado apoyo.

A LA UNIVERSIDAD

Por haberme otorgado todos los recursos para que esto fuera posible.....

GRACIAS

VICTOR

A MI MADRE

A ti madre, la señora, toda una gran señora, que me diste la vida y no conforme con eso, me enseñaste lo bueno y lo malo de la misma, este logro es solo tuyo mamá, ya que yo sólo utilice las herramientas que tu me otorgaste y no tengo palabras para expresar lo grandiosa que has sido para conmigo y todo el amor que me has demostrado a lo largo de estos 28 años. Gracias muchas gracias por tu filosofía de vida, que no solo me ha enseñado a mi sino a muchas otras personas que han estado a tu lado, gracias por mostrarme que no se necesitan cosas materiales para ser feliz, que basta con el cariño, la unión y una gran valentía para conseguir los objetivos en la vida, gracias mamá.

A VIANNEY

Por todo tu cariño y apoyo en los momento difíciles, fuiste la única persona que toco mi lado débil, que me quitaste la armadura y me enseñaste a vivir sin ella, ya que sin ella me cobijaste con tu amor y tu comprensión, eres la persona que amo y le agradezco mucho a la vida el haberte conocido y por supuesto un agradecimiento especial a tu familia, Manuel, Meli y Leticia, por haberme apoyado en todo desde que los conozco ya que ellos también me han dado todo su cariño, gracias a todos. Gracias Vianney, la angelita tragoncita.

A MIS AMIGOS.

Gracias a cada uno de ustedes, porque de ustedes y con ustedes pasamos y aprendimos muchas cosas, gracias por enseñarme lo bello y lo emocionante que es la amistad y todo eso quedará grabado en mis recuerdos, pero sobre todo en mi corazón.

A MIS MAESTROS.

Por todas y cada una de sus enseñanzas, desde mi primera maestra, maestra Bety gracias, hasta el último el Dr. Gabriel Echavez, gracias.

AL M. en I. SERGIO HUGO HAAZ MORA

Por todo el apoyo que nos brindo a Víctor y a mi, cuando más desesperados estábamos, gracias.

A MIS HERMANOS

Este es un agradecimiento especial a aquellos que en algún momento formaron o son parte de mi vida, y que me acompañaron en desvelos, enojos, tristezas, y me enseñaron que el amor si existe. A Tana (algún día regresaras), Callejera, Puchy, Dolby, Rocky, Rambo, Mirruña, Buck, Capi, Tucita, Daysi, Candy, Gamucita, Camila, y en especial a Dulce.

GRACIAS

MARTIN

*Wir Lassen nie vom Suchen ob
Und doch, am Ende allen unseren suchens,
Sind wir am Ausgangspunkt zurück,
Und werden diesen Ort zum ersten
Mal erfassen.*

T.S. Eliot.

*NO CESAREMOS DE EXPLORAR
Y EL FINAL DE TODA NUESTRA EXPLORACIÓN
SERÁ LLEGAR AL PUNTO DE PARTIDA Y
RECONOCER EL LUGAR POR PRIMERA VEZ.*

T.S. Eliot

*LO CONOCIDO ES FINITO, LO DESCONOCIDO INFINITO;
DESDE EL PUNTO DE VISTA INTELLECTUAL ESTAMOS
EN UNA PEQUEÑA ISLA EN MEDIO DE UN OCEANO
ILIMITABLE DE INEXPLICABILIDAD.*

*NUESTRA TAREA EN CADA GENERACIÓN ES
RECUPERAR ALGO MÁS DE TIERRA.*

T.H. HUXLEY, 1887

ÍNDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES	3
1.1 Desarrollo urbano e industrial	4
1.2 Abastecimiento de agua	6
1.3 Disponibilidad y consumo de agua	7
CAPITULO II. MARCO GEOGRÁFICO	11
2.1 Localización	11
2.2 Subdivisión Hidrográfica de la Cuenca del Valle de México	15
2.2.1 Distribución y recursos hídricos superficiales de las subcuencas hidrográficas del Valle de México	16
2.2.2 Sistema hidrográfico que comprende la Ciudad de México	19
2.2.3 Etapas evolutivas de los lagos de la Cuenca del Valle de México	20
2.2.4 Crónica de las principales obras hidráulicas en la Cuenca del Valle de México	22
2.3 Características climatológicas	25
CAPITULO III. MARCO GEOLOGICO	28
3.1 Geología regional	28
3.1.1 Características geológicas	33
3.1.2 Marco geológico general de la cuenca del Valle de México	34
3.1.3 Marco paleoclimático	36
3.1.4 Marco vulcanológico	38
3.2 Estratigrafía	40
3.2.1 Depósitos del lago	44
3.2.2 Depósitos de transición	50
3.2.3 Depósitos de lomas	53

CAPITULO IV. MARCO HIDROGEOLOGICO	57
4.1 Antecedentes hidrogeológicos	57
4.1.1 Tipos de acuífero y su comportamiento	58
4.1.2 Nivel piezométrico	62
4.1.3 Parámetros hidrogeológicos característicos	63
4.2 Características hidrogeológicas de los terrenos y los tipos de acuíferos de la Cuenca del Valle de México	64
4.3 Identificación Geológica e Hidrodinámica del sistema acuífero de la Cuenca del Valle de México	69
4.4 Esquematación del sistema acuífero de la Planicie de México	73
4.5 Extracción de los acuíferos de la Planicie de México	76
4.6 Recursos hídricos subterráneos de la Cuenca del Valle de México	77
CAPITULO V RIESGOS EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	80
5.1 Diagnóstico de Riesgos	80
5.2 Tipos de riesgo	81
5.2.1 Riesgos geológicos	81
5.2.1.1 Sismicidad	82
5.2.1.2 Volcanes	92
5.2.1.3 Hidrogeológicos	102
5.2.1.4 Inestabilidad de laderas	121
5.2.2 Hidrometeorológicos	129
5.2.2.1 Inundaciones	129
5.2.3 Químicos	141

CAPITULO VI CASO HISTORICO, ZONA DE SANTA CATARINA	147
6.1 Descripción de los factores que intervienen en la formación de lixiviados	147
6.2 Daños causados por lixiviados	151
6.3 Marco Geológico	152
6.4 Situación Hidrogeológica	155
6.5 Consideraciones sobre la vulnerabilidad de la Subcuenca de Chalco	158
6.6 El basurero de Santa Catarina	159
CAPITULO VII CONCLUSIONES	
7.1 Riesgos	163
7.1.1 Riesgo sísmico	163
7.1.2 Riesgo vulcanológico	165
7.1.3 Inundaciones	165
7.1.4 Riesgo hidrogeológico	168
7.1.4.1 Zonas apropiadas para recarga	171
7.1.4.2 Disponibilidad de agua para recarga	172
7.1.4.3 Recarga con agua tratada	172
7.2 Recomendaciones	182
BIBLIOGRAFIA	183



INTRODUCCION

El Valle de México representa uno de los más complejos ecosistemas del Mundo latinoamericano. La antropización del Valle, iniciada en tiempos prehispánicos, estuvo probablemente relacionada con motivaciones socio-religiosas inducidas por la necesidad objetiva y espiritual del elemento "agua", culturalmente con las poblaciones aztecas y sucesivas. Desde entonces hasta hoy México ha superado los 20 millones de habitantes llegando a ser el polo industrial más desarrollado del País.

El "ambiente" del Valle une a su majestuosa belleza una serie de características que teóricamente limitarían el pleno disfrute de dichos territorios por parte del hombre. En el Valle de México la interacción entre hombre y ambiente es exasperada por una especie de precariedad de este último. Ello significa que dicha área está sujeta a un conjunto de riesgos naturales inducidos por la antropización sobre un territorio que a menudo posee elevados índices de peligrosidad. El Valle de México está ubicado, en efecto, en una de las zonas sísmicamente más activas del mundo; entre otras cosas las características geológicas de los primeros centenares de metros por debajo de la superficie son tales que constituyen un óptimo amplificador de ondas sísmicas. El Valle está también ubicado, en el centro de un importante conjunto volcánico todavía en actividad, el Eje Neovolcánico Transmexicano, que atraviesa el País desde el Pacífico hasta el Golfo de México por varios centenares de kilómetros. Además, la especial morfología de la cuenca endorreica construida por el desarrollo de los edificios volcánicos, sumada a las elevadas precipitaciones concentradas en breves periodos de tiempo típicas de las fajas intertropicales, hace que dichas áreas sean a menudo objeto de aluviones e inundaciones.

La necesidad de encontrar cada día mayores cantidades de agua (se calcula que para las necesidades civiles e industriales son necesarios unos 65 m³/seg lleva a un incremento de la explotación de las mantos acuíferos presentes por debajo de las numerosas cuencas que componen todo el Valle. Por la especial naturaleza de los acuíferos y su excesiva explotación lleva necesariamente a provocar fenómenos de hundimientos, a menudo muy acentuados. Por último las numerosas actividades humanas agudizan el problema de la "contaminación" tanto de los mantos acuíferos como de la atmósfera.



El ambiente del Valle de México podría llevar a varias consideraciones muy contrastantes. Ciertamente que el territorio, ya de por sí, está expuesto a una serie de "fenómenos naturales" que incrementan su índice de peligrosidad, en que el elemento hombre eleva los valores de "riesgo" a niveles frecuentemente superiores a los umbrales de seguridad.

Por otra parte la actividad humana, aun constituyendo un factor negativo en la evaluación de los riesgos, también está dirigida a la atenuación del riesgo, a través de la prevención y la gestión de las emergencias. No cabe duda que en esa dirección han empezado a proceder las administraciones centrales y locales junto con los organismos técnicos y científicos del sector. Parece superfluo observar cuán enormes son las dificultades de análisis y gestión de dichos problemas, que en los últimos años se han incrementado de una manera alarmante, aun en países tecnológicamente adelantados y con concentraciones urbanas muy inferiores a las que se presentan en el Valle de México.

El objetivo del presente trabajo de tesis es el de proporcionar una fuente de información de los riesgos más importantes que aquejan a la Cuenca del Valle de México, en especial el riesgo hidrogeológico, tratando sus causas, consecuencias y algunas alternativas de solución.



CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

La Cuenca del Valle de México, el mítico Valle de Anáhuac, ha sido y es la zona más importante del país para los mexicanos. Para los aztecas ya constituía " *EL OMBLIGO DEL UNIVERSO*", lugar predestinado, por los dioses del Parnaso Azteca, para el establecimiento del imperio prehispánico más poderoso de Norteamérica. El agua siempre ha estado presente en la historia del pueblo de México. La señal que indicaría el sitio idóneo para la fundación de la gran Tenochtitlán fue un águila, posada en un nopal, devorando una serpiente. Nopal que debería estar en medio de un lago. La lógica más pueril indica que este sería el lugar menos apropiado para el establecimiento de una urbe que dominaría el universo. Tenochtitlán se fundó en condiciones inhóspitas y su crecimiento estuvo rodeado de situaciones adversas. Figura 1.1



Figura 1.1 La gran Tenochtitlan

Antes de la llegada de los tenochcas a la Cuenca, ya había florecido en ésta, Teotihuacán, la Ciudad de los Dioses. El agua, también ocupa un lugar especial en esta cultura. Bajo la pirámide del Sol se encontraba un manantial. La compleja red de drenaje de la misma nos habla de un pueblo con alto desarrollo en ingeniería y preocupado por la salud de sus habitantes.

La omnipresencia de, Tláloc, dios de la lluvia en los pueblos de la Cuenca hace referencia a la relevancia que a este vital elemento conferían las culturas mesoamericanas. Desde esa época el abastecimiento de agua, para más de 300 000 habitantes, constituía un reto a resolver. La separación de agua dulce de agua salobre por medio del bordo de Nezahualcoyotl constituye la primera gran obra hidráulica de la Cuenca.



Desde antes de la Conquista por los españoles, el creciente desarrollo urbano requirió de nuevas fuentes de abastecimiento de agua. Los manantiales de la zona noroeste y sur de la Cuenca, como el de Chapultepec, fueron la solución a este problema. La conducción de agua se resolvió con el ingenio mexicano, surgiendo los acueductos que tanto nombre dieron a la Ciudad. Surgía de esta forma una cultura del agua. Nezahualcoyotl, rey de Texcoco, se erige como pionero en la ingeniería hidráulica en México. El exceso de agua en la época de lluvias constituyó el otro gran reto al que se enfrentaron los gobernantes tenochcas. La primera medida contra las inundaciones fue la construcción de un albaradón (dique) de 16 kilómetros con un ancho de entre 7 y 10 metros que iba de sur a norte del Cerro de la Estrella al Peñón de los Baños.

Al occidente de la Subcuenca de Chalco, se desarrolló lo que sería el preámbulo de la acuacultura. Zonas pantanosas del Sur de la Cuenca fueron transformadas en áreas cultivables separadas por canales navegables. Dada la escasez de terreno firme se crearon las llamadas chinampas, las cuales son islotes artificiales flotando en el sistema de canales. En el poniente de la zona ecológica de la Subcuenca de Chalco aun sobrevive una restringida área chinampera.

Al caer la gran Tenochtitlán, surge lo que sería la capital del virreinato de la Nueva España, la Ciudad de México. Su crecimiento durante los siglos XVII y XVIII, propició el cambio de canal a calzada, incrementando el número de las ya existentes y la urbanización de antiguas áreas lacustres. Las inundaciones continuaron sobre todo en las márgenes de algunas corrientes de agua que desembocaban en el vaso del Lago de Texcoco. Los manantiales continuaron siendo la más importante fuente de abastecimiento.

1.1 Desarrollo urbano e industrial

Como ya se ha mencionado, la Cuenca del Valle de México ha sido sede de los sistemas de gobierno desde antes de los aztecas. Los virreyes de la Nueva España no cambiaron el carácter político, centralista de la Capital. Los gobiernos posteriores a la Independencia (1810) continuaron con este mismo esquema. Al crearse la Federación de Estados en 1824, entre ellos el Distrito Federal, éste se convierte en sede de los poderes federales. Sus límites actuales son definidos en 1898. La Revolución



Mexicana afirma la posición política de la Ciudad; es después de este movimiento que el país entra en una etapa de franco desarrollo, acelerando la expansión urbana de la Ciudad de México. Hasta esta época la problemática relacionada con el agua y su manejo era muy semejante a la que enfrentaron los pobladores de la gran Tenochtitlan.

El marcado centralismo de las esferas gubernamentales del País contribuye al crecimiento poblacional. La Ciudad se convierte en el eje del comercio nacional, lo cual implica un aumento relativo en la población vinculada con esta rama económica. Por esta misma razón, se inicia el establecimiento de la fuerza industrial del País en la Cuenca, generando fuertes corrientes migratorias hacia la creciente urbe. En los primeros años de la década de los 50' s, la zona metropolitana rebasó los límites urbanos del Distrito Federal, avanzando, inicialmente hacia el municipio de Tlalnepantla, floreciente zona industrial. Para 1960, la mancha urbana abarcaba ya cuatro nuevos municipios del Estado de México.

Para la década de los 70's, la Ciudad ya contaba con 8 millones de habitantes, empezando a figurar en la lista de las diez ciudades más grandes del planeta. La densidad habitacional era de más de 20,000 hab/km en Iztacalco y Azcapotzalco. El naciente municipio de Nezahualcoyotl contaba ya con 500,000 habitantes. Su violento crecimiento rebasó los incipientes programas de planeación urbana. La periferia de la Metrópolis fue la que más sufrió por la carencia de servicios. La administración de la Metrópolis ha venido sufriendo una serie de modificaciones a lo largo de su historia; en 1929 se crea el Departamento del Distrito Federal. La división política de esa época contempla la Cd. de México y 13 delegaciones políticas. Para 1970 se cuenta ya con 16 delegaciones, dos de las cuales Xochimilco y Milpa Alta son de un marcado carácter rural.

Para finales de la década de los 80's se tiene que englobar la población del DF y de los municipios conurbados en el Área Metropolitana, llegando ésta a 20 millones de habitantes. Esta cantidad se ha tomado como representativa, ya que no existen criterios de suficiente validación.



1.2 Abastecimiento de agua

El que la mancha urbana se desarrollaba sobre la antigua región lacustre no implicaba únicamente problemas desde el punto de vista hidrogeológico. Las necesidades de abastecimiento de agua potable rebasaron los caudales disponibles de los manantiales desde el siglo XVII. A partir del siglo XVIII, se inicia la explotación de formaciones acuíferas someras por medio de norias (pozos sin equipar de gran diámetro). No es hasta principios del siglo XX que se pasa de norias a pozos profundos (mayores de 50 m). Para los años 50's la profundidad de los pozos alcanza los 100m. Los flujos requeridos para los 60's hacen alcanzar la profundidad de 200 m. Hacia finales de los 60's se estimaba un caudal de 32.1 m³/s de los cuales 13 corresponden al Sistema Lerma.

El régimen de extracción trae como una primera consecuencia negativa la subsidencia de los terrenos de área lacustre lo que obliga a las autoridades hidráulicas a establecer baterías de pozos que exploten ya no la formación lacustre somera (acuífero semi-permeable), sino acuíferos más profundos. Estos pozos, denominados *profundos* llegan a rebasar los 400 metros.

El abatimiento del nivel piezométrico, en algunos sectores de la Cuenca, es de alrededor de 3.5 m/año; esto ha provocado una subsidencia, cuantificada en 30 cm/año, con consecuencias negativas sobre el sistema de drenaje subterráneo y superficial.

Una consecuencia no menos grave de la explotación de algunos acuíferos, es la contaminación del agua subterránea debido a las precarias condiciones higiénico-sanitarias relacionadas con procesos de rápida urbanización, en algunos sectores de la Cuenca.

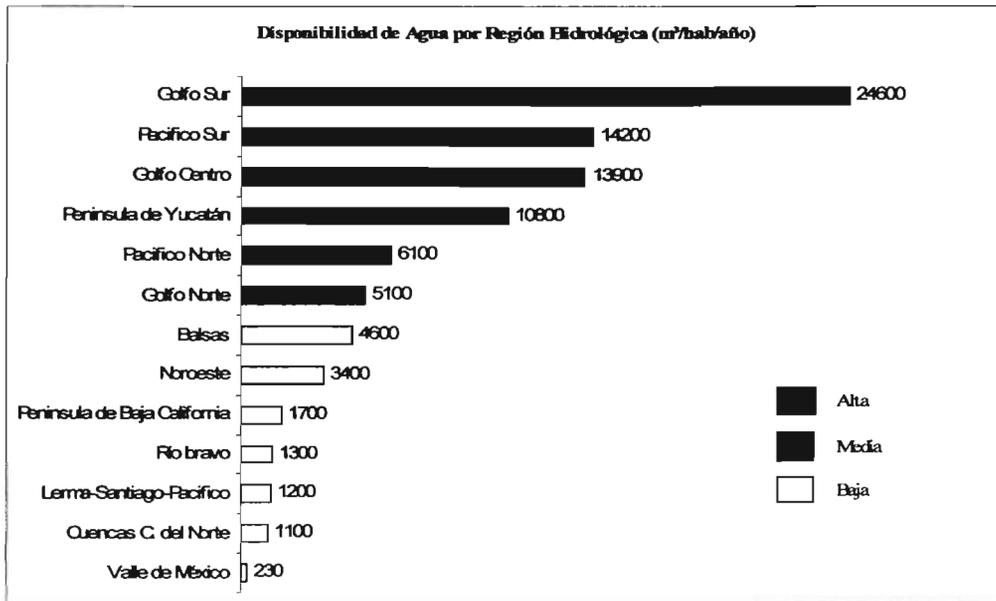
El área metropolitana de la Ciudad de México, con una población en continuo crecimiento, requiere de grandes volúmenes hídricos cuyas estimaciones varían de 57 a 73 m³/s.

Los acuíferos de la Cuenca del Valle de México abastecen sólo cerca del 70 % de las necesidades de sus habitantes, el restante 30% proviene de sistemas hídricos externos tales como el Sistema Lerma y Cutzamala presentando una notable relación con la complejidad administrativa del sistema y sus instalaciones.



1.3 Disponibilidad y consumo de agua

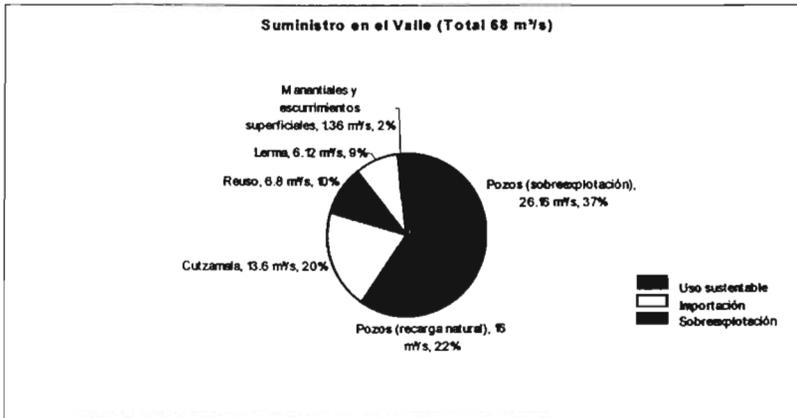
Los parámetros de disponibilidad hidrológica ilustran la situación real de escasez de agua, ya que establecen una relación entre la oferta natural (escurrimientos y recarga de acuíferos) y la población. La disponibilidad hidrológica de la región del Valle de México es notoriamente la más baja del país; no rebasa los 230 metros cúbicos anuales por habitante, Gráfica 1.1. Contrasta con las regiones del Golfo y del Pacífico sur, donde los valores sobrepasan la decena de miles de metros cúbicos. Cabe mencionar que según clasificaciones internacionales, las regiones que muestran datos por debajo de los 1,000 metros cúbicos anuales por habitante, tienen una disponibilidad muy baja o incluso crítica del recurso. Tal es el caso de la ZMCM.



Gráfica 1.1 Fuente CNA. 1999. op. Cit.



El suministro total a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México oscila alrededor de 68 metros cúbicos por segundo, de los cuales 35 metros cúbicos por segundo corresponden al Distrito Federal y 33 metros cúbicos por segundo al Estado de México, Gráfica 1.2

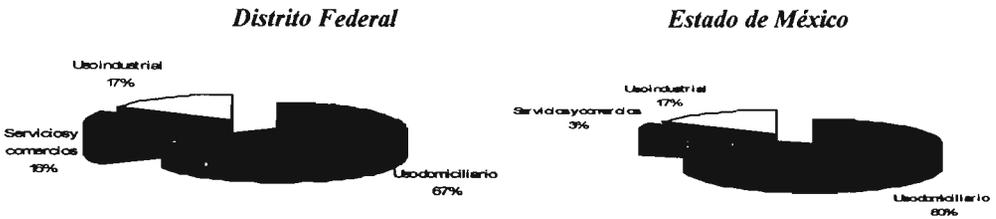


Gráfica 1.2

Con referencia a condiciones de sustentabilidad, existe un déficit de dos terceras partes del volumen consumido, que se resuelve a través de la sobreexplotación de los acuíferos propios (37%) e importando agua de otras regiones (29%), tal como lo muestra la gráfica anterior. El uso sustentable del líquido representa menos del 35% del total. El sector doméstico es el mayor consumidor del líquido en la ZMCM, seguido por el industrial y en último lugar por el sector de servicios urbanos y comerciales. El consumo de los sectores varía entre el Distrito Federal y el Estado de México. En esta última entidad federativa se incrementa notablemente la proporción destinada al consumo del sector doméstico, debido en gran parte a la elevada tasa de crecimiento demográfico registrada en algunos de los municipios conurbados, como Chalco y Chimalhuacán donde alcanza el 9.2% y 9.8%, respectivamente, Gráfica 1.3. En promedio los municipios conurbados crecen al 3.31%, lo cual contrasta con la tasa de crecimiento del Distrito Federal, de 0.54%.



Consumo de agua por tipo de uso ZMCM

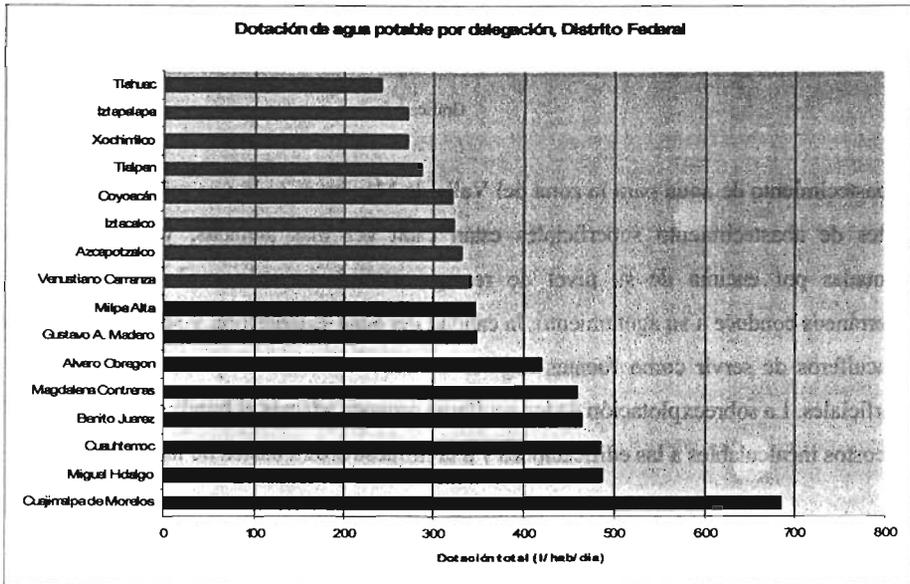


Fuente National Research Council, et al., a1995.

Gráfica 1.3

1.4 Patrones de uso de agua

Como ya se mencionó, al Distrito Federal se le dotan o suministran 35 metros cúbicos por segundo de agua. El suministro de agua potable percapita es de 362 litros diarios para el Distrito Federal, aunque las variaciones entre las delegaciones son grandes. El mayor volumen de dotación se presenta en Cuajimalpa con 686 litros por habitante por día, mientras que la delegación Tláhuac es la que muestra el nivel inferior, Gráfica 1.4.



Fuente INEGI 1999

Gráfica 1.4



Consumo de agua

De la dotación o suministro total de agua se consume un porcentaje y el resto (volumen no medido) se considera como pérdidas físicas del caudal. El consumo de agua potable para fines domésticos satisface primero la demanda de evacuación del inodoro o excusado (40%), en segundo término la regadera (30%), y después el lavado de ropa (15%). Los utensilios y el agua para beber emplean respectivamente 6% y 5%, Gráfica 1.5.



Gráfica 1.5

El abastecimiento de agua para la zona del Valle de México es cada vez más complicado ya que las fuentes de abastecimiento superficiales están cada vez más alejadas, y las subterráneas están explotadas por encima de su nivel de recarga natural. La sobreexplotación de los acuíferos subterráneos conduce a su agotamiento, la calidad del agua se deteriora, y se arriesga la capacidad de los acuíferos de servir como fuentes seguras de abastecimiento en periodos de escasez de aguas superficiales. La sobreexplotación de los acuíferos provoca además el hundimiento desigual del suelo, con costos incalculables a las edificaciones y a la infraestructura básica de la cuenca.



CAPITULO II

MARCO GEOGRÁFICO

2.1 Localización

La mayor parte del territorio mexicano está constituido por un gran altiplano de forma casi rectangular, que se alarga de noreste a sureste por casi 2000 km, y está delimitado respectivamente por las Sierras Madre Oriental y Occidental. El término altiplano es poco adecuado: esta región es en realidad un conjunto de tierras altas interrumpidas por pequeños sistemas montañosos atravesados por depresiones a veces profundas y de cuencas endorreicas, generalmente rellenas, principalmente, por antiguos y/o recientes materiales efusivos o sedimentos aluviales o lacustres.

La cuenca del Valle de México está situada en el límite meridional de la altiplanicie mexicana, dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano (ENT) Figura 2.1, una extraordinaria estructura volcánica de 20 a 70 kilómetros de ancho, que cruza México, desarrollada entre los paralelos 18-22 de latitud Norte, de la desembocadura del Río Grande de Santiago, en el Pacífico, hasta los Tuxtlas, en las proximidades de la costa del Golfo de México. La longitud de esta faja volcánica es de cerca de 900 km, cubriendo un área de casi 105 000 km², que se extiende parcial o totalmente en algunos estados de la Republica y el Distrito Federal. El ENT se caracteriza por un sistema de grandes fracturas ortogonales que controlan el ascenso de magma a la corteza, donde se formaron los primeros fenómenos volcánicos que rigen la formación de fosas y pilares a lo largo de toda su extensión.

Dentro de esta franja volcánica se encuentran los grandes volcanes del país y centenares de pequeños aparatos volcánicos, complejos de calderas, conos cineríticos, cráteres de explosión, asociados a coladas lávicas y depósitos piroclásticos. Tan sólo en la Cuenca del Valle de México se ubican más de 220 conos volcánicos monogenéticos de composición andesítico-basáltica.

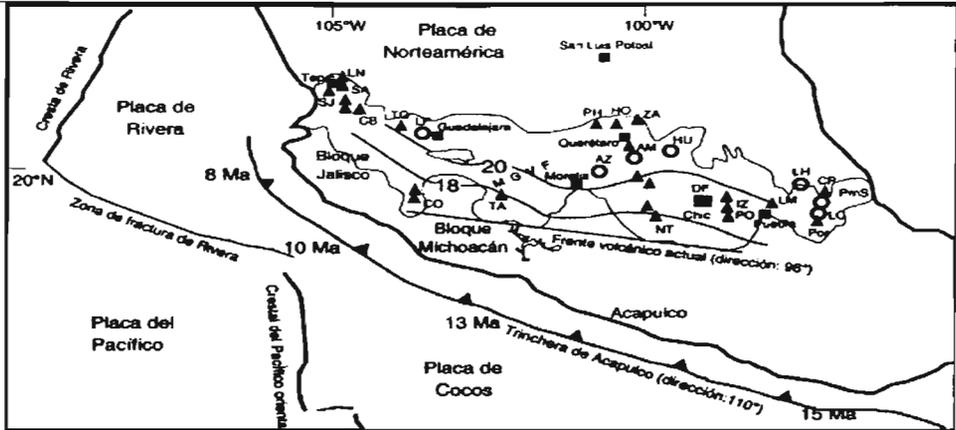


Figura 2.1 Entorno tectónico y principales centros volcánicos de la Faja volcánica Transmexicana. Los triángulos indican los principales estrato-volcanes: LN = Las Navajas; SA = Sangangüey; SJ = San Juan; CB = Ceboruco; TQ = Tequila; CO = Volcán de Colima; TA = Tancitaro; PH = Palo Huérfano; HO = La Joya; ZA = Zamorano; NT = Nevado de Toluca; IZ = Iztaccihualt; PO = Popocatepetl; LM = La Malinche; CP = Cofre de Perote; Por = Pico de Orizaba; Los círculos indican las Calderas: LP = La Primavera; AZ = Los Azufres; AM = Amealco; HU = Huichapan; LH = Los Humeros; LC = La Cumbre;. Los principales campos volcánicos son MGVF = Campo volcánico Michoacán-Gto; Chic. = Sierra Chichináutzin; PmS = Chiconquiaco- Palma Sola.

El ENT presenta una inclinación general hacia el oeste; la altura media es de 2300 m, en su porción oriental, así como de 1600 y 1000 m en sus porciones central y occidental, respectivamente.

Precisamente en el ENT se tienen los relieves más elevados de todo el país, elevándose entre 1500 y 3500 m sobre el nivel del valle, como por ejemplo los grandes volcanes mexicanos; el Citlaltépetl (2720m), el Popocatepetl (5540m), el Iztaccihualt (5200m) y La Malinche (4400m). Entre los mayores cursos de agua que drenan esta región se pueden citar los ríos Lerma y Pánuco, cuyas cuencas hidrográficas son de las más extensas de México.

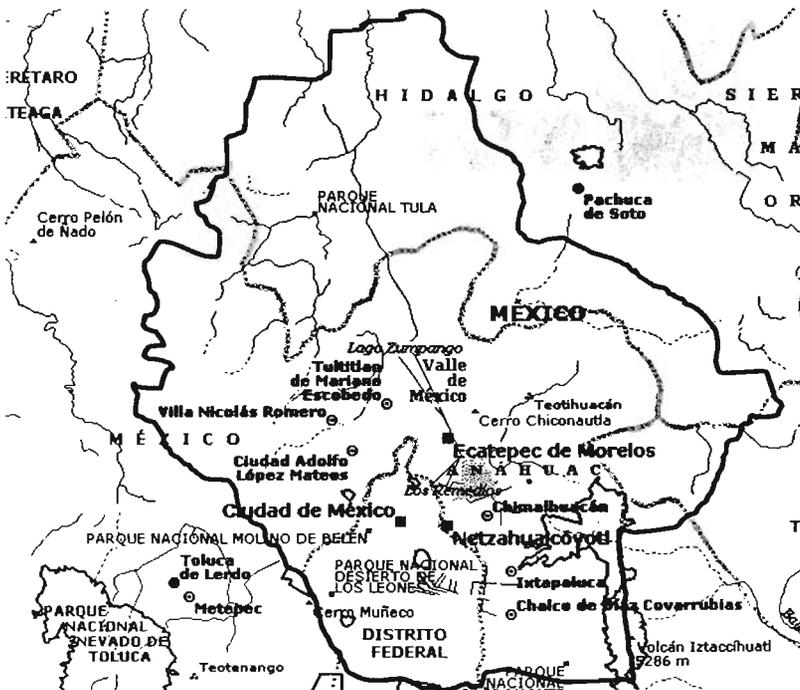
Otras características fisiográficas relevantes de esta región son las cuencas lacustres ubicadas entre los relieves montañosos; las más importantes son: las de México, Toluca, Puebla y Chapala. En algunas de ellas se encuentran todavía remanentes de antiguos lagos: Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro y los de la Cuenca de México son algunos ejemplos.

La Cuenca del Valle de México se caracteriza por ser una cuenca endorreica de carácter lacustre, donde la corteza terrestre ha estado sometida a grandes esfuerzos produciéndose un intenso fracturamiento



debido a fases volcánicas cuaternarias que modificaron su relieve con la formación de una barrera montañosa (La Sierra de Chichinautzin) hace unos 700,000 años y culminaron con el cierre de la cuenca, desarrollándose un sistema de grandes lagos que propició el relleno de la cuenca con materiales aluviales.

Esta cuenca se encuentra ubicada a una altitud promedio de 2000 m.s.n.m. Desde el punto hidrológico, el parteaguas de la Cuenca del valle de México establece una vasta extensión, distribuida en 5 estados de la federación (Edo. de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Distrito Federal), de alrededor de 9600 km², de los cuáles más de 2400 corresponden al área urbana.



Figuras 2.2 y 2.3 Localización general de la Cuenca del Valle de México, así como una toma satelital de la misma, tomada por DOSSIER.



RIESGOS HIDROEOLÓGICOS MÁS IMPORTANTES QUE AFECTAN A LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.





Se encuentra limitada al Sur y Este por las cabeceras del Río Balsas y al Norte y Oeste por las cuencas de Toluca y Tula. Las estribaciones más grandes de la Cuenca del Valle de México las constituyen al Sureste, los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y al sur la Sierra de Chichinautzin y la Cordillera del Ajusco. A partir de ellas, están otras formaciones montañosas: por el Este, la Sierra Nevada y la de río Frío y al oeste la Sierra de las cruces, que le confieren las características de un enorme “contenedor” con sus partes bajas hacia el Norte. Las elevaciones topográficas están constituidas, en su mayor parte, por rocas volcánicas de comportamiento permeable que funcionan como zonas de recarga natural para el acuífero.

2.2 Subdivisión Hidrográfica de la Cuenca del Valle de México.

El sistema hidrográfico del Valle de México, y principalmente la zona donde se encuentra ubicada la Ciudad de México, ha sido modificado, en el transcurso de los últimos siglos, de manera irreversible.

El actual sistema hidrográfico superficial se debe a las diversas y numerosas obras hidráulicas realizadas por el desecamiento de los diversos lagos que existían en el Valle de México. Muchos de los cursos de agua, que actualmente escurren hacia el valle, sufrieron drásticas desviaciones con la intención de evitar las continuas inundaciones que sufría la Ciudad. Muchas de estas obras, han servido también para descargar aguas residuales de origen doméstico e industrial de la Ciudad.

Entre los principales ríos podemos mencionar: el Río Churubusco, Magdalena, de los Remedios y el Río Hondo, entre otros.

En los lagos existentes (Texcoco, Xochimilco y Zumpango), (Fig. 2.4) se están realizando procesos de rehabilitación.

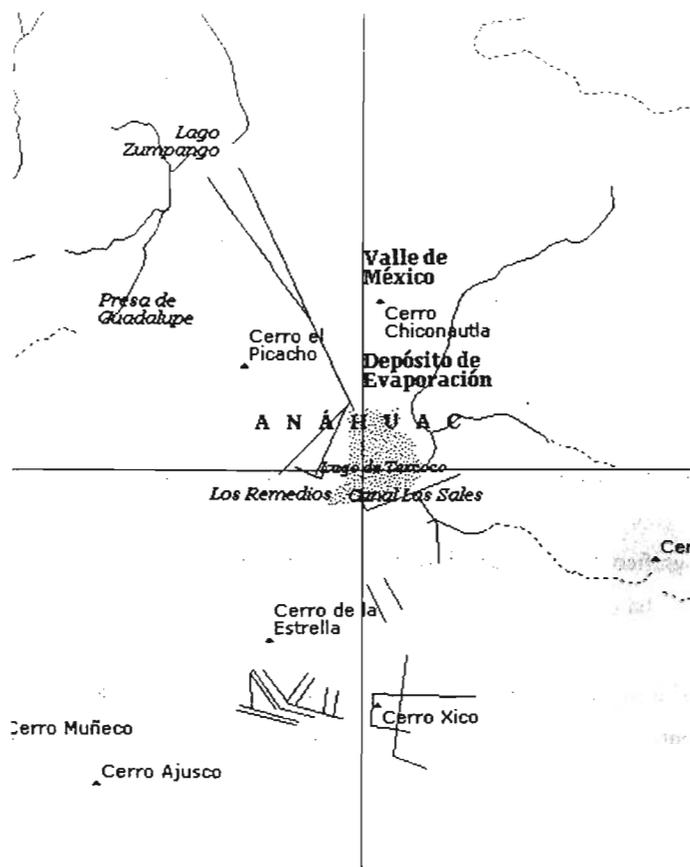


Fig. 2.4 Lago de Zumpango, Xochimilco y Texcoco

2.2.1 Distribución y recursos hídricos superficiales de las subcuencas hidrográficas del Valle de México.

En la Cuenca del Valle de México existen 11 zonas hidrológicas, que caracterizan otras tantas subcuencas dentro del sistema hidrográfico existente (Fig. 2.5).

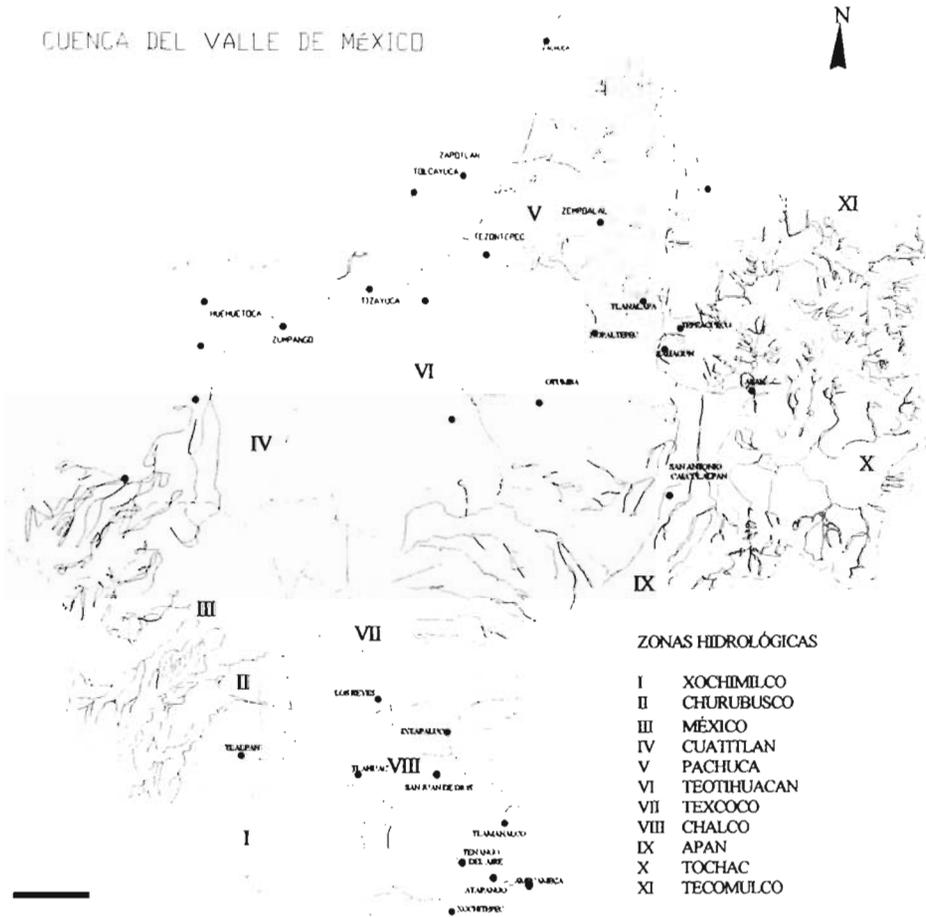


Fig. 2.5 – Subdivisión hidrográfica de la cuenca del Valle de México.

Zona I (Xochimilco)

Caracteriza los sectores suroccidentales de la Cuenca, pertenecientes a la sierra de Chichinautzin donde se tienen las máximas lluvias de toda la región.

Zona II (Churubusco)

Está integrada con el sistema hidrográfico del Río Churubusco, en la parte suroccidental del área urbana de la Ciudad de México, recogiendo los aportes de los ríos Eslava y Magdalena.



Zona III (Ciudad de México)

Es drenada por el sistema hidrográfico que cubre la mayor parte de la zona urbana de la ciudad de México.

Zona IV (Cuautitlán)

Encierra las subcuencas de los ríos Tepoztlán y Cuautitlán. Este último, importante por el volumen de agua que contiene.

Zona V (Pachuca)

Comprende las cuencas hidrográficas del Río de las Avenidas de Pachuca y otros cursos menores.

Zona VI (Teotihuacan)

Esta zona corresponde a la cuenca hidrográfica del Río San Juan Teotihuacan.

Zona VII (Texcoco)

Encierra el área perteneciente al Lago de Texcoco y todas las cuencas orientales tributarias directas de éste.

Zona VIII (Chalco)

Corresponde al área más meridional de toda la Cuenca del Valle de México y constituye una de las zonas más importantes, respecto al volumen de reservas hídricas subterráneas y por ser estratégica para el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México.

Zona IX (Apan), Zona X (Tochac), Zona XI (Tecomulco)

Estas zonas originalmente no formaban parte de la Cuenca del Valle de México, pero pasaron a formar parte de ella después de la realización de las diversas obras de ingeniería hidráulica efectuadas en el curso del último siglo.



La Tabla 2.1, reporta los valores medios de los volúmenes de agua superficial de las once zonas hidrológicas. Los valores totales anuales estimados de dichos volúmenes de todo el Valle de México, son iguales a $413,188 \times 10^3 \text{ m}^3$, mientras que el volumen efectivo de agua superficial es de $400,591 \times 10^3 \text{ m}^3$. Las zonas más ricas en volúmenes de agua superficial son las occidentales: la III (Cd. de México), la IV (Cuautitlán), la VII (Tecomulco) y la II (Churubusco) mientras que las más pobres, son las meridionales, es decir la I (Xochimilco) y las zonas septentrionales V (Pachuca) y VI (Teotihuacan).

ZONAS HIDROLOGICAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	VOLUMEN MEDIDO O ESTIMADO	VOLUMEN DE AGUAS SUPERFICIALES
	miles de m ³	
I - XOCHIMILCO	1,212.0	1,212.0
II - CHURUBUSCO	32,964.0	32,853.0
III - MEXICO	142,055.0	140,793.0
IV - CUATITLAN	127,389.0	116,215.0
V - PACHUCA		514.0
VI - TEOTIHUACAN	6,078.0	4,609.0
VII - TEXCOCO	33,685.0	36,802.0
VIII - CHALCO	19,419.0	19,408.0
IX - APAN	13,821.0	13,821.0
X - TOCHAC	22,902.0	22,618.0
XI - TECOMULCO	12,471.0	11,746.0
TOTAL DEL VALLE	413,188.0	400,591.0

Tabla 2.1. Recursos hídricos superficiales de las zonas hidrológicas de la Cuenca del Valle de México

2.2.2 Sistema hidrográfico que comprende la Ciudad de México

La Ciudad de México recibe el aporte de numerosos cauces de agua que en el periodo de lluvias contribuyen a la recarga de los acuíferos presentes en el subsuelo. La metrópoli constituye un aparato receptor de gran número de cauces de agua, sobretodo de aquellos que se encuentran en la Sierra Chichinautzin, al suroeste y al poniente de la Ciudad. En las estribaciones septentrionales, el sistema hidrográfico es más reducido, debido al bajo aporte en estas zonas.

En general, se puede afirmar que la red hidrográfica que comprende la planicie lacustre donde surge la Ciudad de México ha sido entubada y no contribuye al proceso de recarga. El área que ocupa la Ciudad de México está dividida en 4 zonas hidrológicas:



- La zona occidental limitada por los ríos Eslava y Magdalena al Sur y por el Río Tepotzotlan al Norte.
- La zona meridional, del Río San Buenaventura al Río Ameca,
- La zona oriental, del Río de la Compañía al Río San Juan Teotihuacan,
- La zona norte y noreste, donde el único curso de agua por considerar es el Río las Avenidas de Pachuca.

Los fenómenos de hundimientos que comprenden la planicie de México han requerido establecer barreras masivas en los cursos de agua que la drenan y luego, visto también el enorme desarrollo urbano de la metrópoli, la entubación de los mismos. En tales condiciones se encuentran cauces principales como: el Río Churubusco, que recibe aportes de cauces menores, del Río Eslava y Magdalena al Río Mixcoac; el río de la Piedad, donde se unen los cauces de agua, Becerra y Tacubaya; el Río Consulado, que recoge las aguas de cauces menores que van de Dolores a Tornillo y el Río de los Remedios, cuya cuenca se extiende del Río Hondo, al Sur, al Río san Javier, al Norte.

En la zona de la planicie, más baja morfológicamente, y urbanizada completamente, los cauces de agua se encuentran enlazados a los colectores pluviales de la ciudad o a los afluentes de los ríos que descargan en el Lago de Texcoco o en el Gran Canal.

También se ha desarrollado un sistema de intersección, que consiste en una serie de presas, con la finalidad de regular la descarga de agua, en otros cuerpos receptores (lagos de Texcoco y Zumpango, canales o cursos de agua mayores) o fuera de la Cuenca.

Actualmente todo el sistema de represas está afectado por graves problemas causados sobretodo por obstrucciones, por lo cual es necesario un continuo mantenimiento del sistema.

2.2.3 Etapas evolutivas de los lagos de la Cuenca del Valle de México.

Durante el pleistoceno superior, en el periodo del cierre del Valle de México, las aguas superficiales, no encontraron desagüe hacia el exterior, es decir hacia los sectores meridionales del Valle, crearon una



serie de lagos entre los cuales podemos mencionar el de México en la parte central, el de Zumpango al norte, el de Texcoco al Este y al Sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban en aquel periodo, un solo lago (Fig. 2.6).

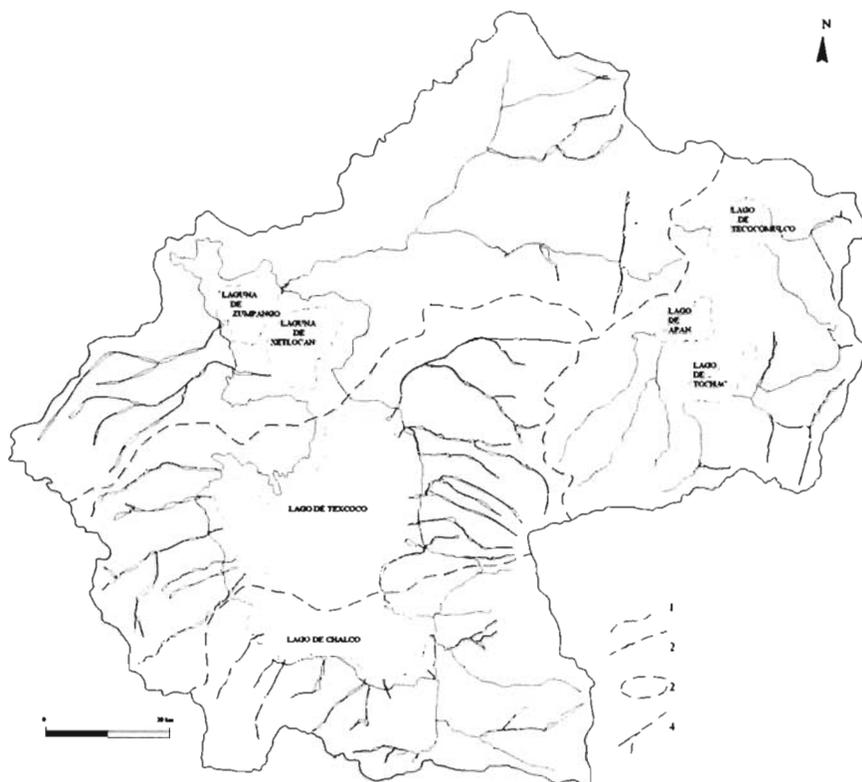


Fig. 2.6 –Sistema hidrográfico hipotético de la Cuenca del Valle de México en el Pleistoceno superior –Oloceno. 1) Límite topográfico de la cuenca; 2) Límite de las subcuencas; 3) Límite hipotético de los lagos pleistocénicos; 4) Cursos de agua mayores.

En el periodo azteca, durante la época de avenidas el nivel superficial de agua de éstos lagos se elevaba, formando un gran lago con una extensión estimada de casi 2000 km² y profundidad variable entre los 15 y 20 metros, en sus partes más profundas. En esta extensa superficie de agua, se elevaban como islas la antigua Tenochtitlan y Tlaltelolco.



En la época colonial, se inician las labores de desecamiento de algunas de las zonas lacustres citadas. Los remanentes actuales de los antiguos lagos son tres: Zumpango, Texcoco y Xochimilco, éste último constituido simplemente por estrechos canales que reciben los aportes de los Ríos san Juan de Dios y Buenaventura. (Fig. 2.7)

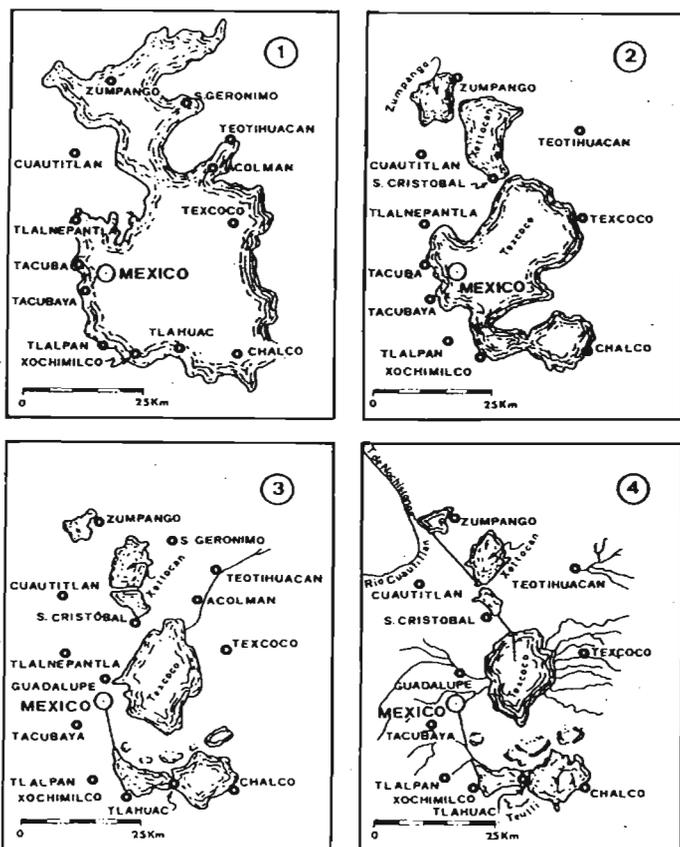


Fig. 2.7 – Evolución De los lagos en la cuenca del Valle de México. (1) los límites aproximados durante la época diluvial; (2) a comienzos del siglo XVI; (3) a comienzos del siglo XIX; (4) en el año 1889.

2.2.4 Crónica de las principales obras hidráulicas en la Cuenca del Valle de México

A partir del siglo XVII, se inician las labores de desecamiento del Lago de México (1607) en un intento por evitar los daños ocasionados en la Ciudad por las continuas inundaciones. El proyecto inicial, previa la desviación del Río Cuautitlán, principal responsable del aumento del nivel de las aguas del lago.



La obra de desviación hidráulica alcanzó la longitud de 6600 m y una sección de 10.5 m², pero ello no fue considerado suficiente para evitar el peligro de inundaciones, sobre todo a causa de los daños que sufrieron las obras posteriormente.

Las decisiones definitivas, para limitar los daños después de la grave inundación en 1622, fueron tomadas en 1629. Fue construida la presa El Rey, que controlaría el Río de las avenidas de Pachuca; al mismo tiempo, se prosigue el desecamiento de Huhuetoca y se repara la trinchera que intersectaba el Río Cuautitlán.

Hacia la mitad de aquel año las labores realizadas bloquearon la descarga del Río Cuautitlán cuyas aguas se distribuyeron en los lagos de Zumpango, San Cristóbal y México inundando la Ciudad. Se pensó entonces en la idea de cambiar de lugar la Ciudad, mientras una comisión de expertos decidía continuar las obras hidráulicas en la Cuenca.

En el siglo XVIII existieron numerosas inundaciones, algunas memorables, como las de 1707 y 1714. Con respecto a tales acontecimientos y debido a los efectos de un terremoto, que destruyó muchas obras hidráulicas ya realizadas, se pensó entonces en establecer las soluciones definitivas al problema global de la Cuenca del Valle de México. En 1747, se iniciaron diversas obras que consistieron en la construcción de calles, puentes y el reforzamiento de la estructura de la presa y la reconstrucción de drenajes. En 1767, se continuaron las labores del Tajo de Nochistongo (Fig. 2.8) y el desecamiento general de la Cuenca.



Fig. 2.8 Tajo de Nochistongo, 1607-1789



Obras a finales del siglo XIX

1) La obra de Tequizquiac

Después de tres siglos de iniciativas, en 1884 se empieza, la etapa final de los trabajos realizados en la Cuenca del Valle de México. El túnel de Tequizquiac, una de las obras finales realizadas (Fig. 2.9), semejantes al Tajo de Nochistongo, debería trasladar las aguas del lago de Chalco y Xochimilco a las atarjeas de la Ciudad de México, comunicando así dichos lagos con el Tajo de Nochistongo. Así se completa la conexión hidráulica de Chalco a la vertiente del Golfo de México, por el río Pánuco, al cual el Tajo de Nochistongo envía aguas de la Cuenca del Valle.



Fig. 2.9 Túnel de Tequizquiac, Edo. de México

2) El gran Canal del Desagüe.

Esta obra se realizó entre 1883 y 1895. Sin embargo surgieron grandes problemas técnicos a causa de los daños generados, sobretodo en la zona donde el canal se unía al túnel de Tequizquiac.

Realizaciones del siglo XX.

El túnel de Tequizquiac comenzó a adquirir inestabilidad por el año 1930, razón por la cual en 1937 se inicia la segunda excavación de otro túnel inaugurado en 1948. Seis meses después, el túnel presentaba graves daños.

Las obras realizadas en la primera mitad del siglo XX fueron:



- La remodelación de dos túneles en Tequizquiac
- Reforzamiento de los muros que limitaban el lago de Texcoco.

La obra hidráulica más importante realizada en la mitad del siglo es la del drenaje profundo, que consiste de dos canales subterráneos que fueron puestos en funcionamiento en 1982 (Fig.2.10). Para finalizar se presenta una tabla con la cronología del agua en el ciudad de México. (Fig. 2.11)

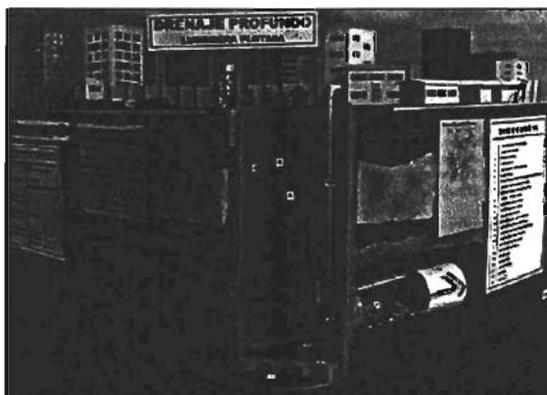


Fig. 2.10 Maqueta del Drenaje Profundo, Museo de la Ciudad de México

2.3 Características climatológicas

El clima del Valle de México es de tipo sub-tropical de altura, templado, semiseco, sin una temporada invernal bien definida.

La temperatura media de las zonas de llanura de la Cuenca oscila entre los 15 y los 16° C. En la Ciudad de México la temperatura media anual oscila alrededor de los 15° C y por causa de la contaminación atmosférica en los últimos 90 años se ha registrado un aumento de temperatura de 2° C.

La precipitación pluvial en la cuenca en cada una de sus zonas hidrológicas. En su parte Norte y Noreste se producen escasas lluvias, encontrándose que la precipitación media anual es de 700 mm

La evaporación anual (900-2100mm) sobrepasa el valor de la precipitación pluvial media anual. Sus máximos se dan en las partes altas de las sierras, del Sur, Este y Oeste, en donde su rango oscila entre 1700 y 2100mm.



CRONOLOGÍA DEL AGUA EN LA CIUDAD DE MEXICO

ÉPOCA PREHISPÁNICA

50 millones de años. Duración del periodo de intensa actividad volcánica en el que se forma la Cuenca de México.

6000-750 a.C. Ocupación de Zohapilco, asentamiento que como otros de su época se benefició de la riqueza biológica de la zona lacustre. Posclásico (900-1521 d.C.). La cuenca incluía siete lagos de diferentes propiedades, altimetría y tamaño: Apan, Texcaco, Texcocomulco, Zumpango, Xaltocan, Texcoco y Chalco-Xochimilco.

1300 d.C. (ca.). Se construye la calzada de Tenayuca, que, como otras levantadas posteriormente, también funcionaba como dique. En estas fechas también se construye la calzada de Nonoalco.

1325 d.C. Se funda la ciudad de México-Tenochtitlan.

1382 d.C. La isla es presa de inundaciones.

1429 d.C. Se termina la calzada de Tepeyac.

1432 d.C. (ca.). Tras la caída de Azcapotzalco, los mexicas construyen la calzada de Iztapalapa.

1435 d.C. El río Cuauhtitlan es canalizado artificialmente.

1439 d.C. México-Tenochtitlan sufre inundaciones.

1449 d.C. Se construye el Albarrón de Nezahuacóyotl, que separa al lago de Texcoco del de México.

1466 d.C. Bajo la dirección del gobernante texcocano Nezahuacóyotl, se construye el acueducto que iba de Chapultepec a la isla de México-Tenochtitlan.

1499 d.C. Se construye el Albarrón de Ahuizotl, con el fin de evitar más inundaciones de la isla de México.

ÉPOCA COLONIAL

1555, 1580, 1607, 1615 y 1623. En estas fechas, la ciudad de México padece inundaciones. 1536. Construcción del acueducto que salía del pueblo de Santa Fe y llegaba a la fuente de Mariscala.

1555. Primera gran inundación durante la Colonia en la ciudad de México. Se intenta restaurar el albarrón construido en la época prehispánica.

SIGLOS XVII Y XVIII

En estos siglos, los acueductos de arcos fueron la principal fuente de agua potable para la ciudad de México.

1607-1608. El destacado científico Enrico Martínez dirige las obras en Nochistongo, el primer desagüe artificial de la Cuenca de México.

1620-1790. Se construye el acueducto de Arcos de Belén.

1623. El socavón de Nochistongo es clausurado por órdenes del virrey conde de Gelves.

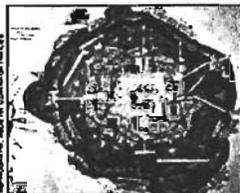
1629. Tiene lugar en la ciudad de México una de las peores inundaciones de su historia, que se prolonga por cinco años.

1640 (ca.). Se reanuda los trabajos en Nochistongo para convertir la galería en un tajo a cielo abierto.

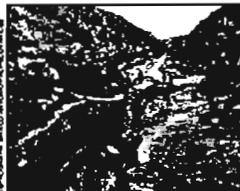
1789. Se concluye la salida de Nochistongo, a tajo abierto y con más profundidad.



La formación de la Cuenca de México, obra de Miguel Covarrubias. Museo de la Ciudad de México.



Mapa de México-Tenochtitlan atribuido a Hernán Cortés. Nuremberg, 1524.



Tajo de Nochistongo. Único resto que se conserva del túnel construido por Enrico Martínez.



El canal de la Viga. Fotografía de Hugo Brehme. Museo de la Ciudad de México.

SIGLO XIX

1857. El gobierno federal otorga un premio a Francisco de Garay, quien presentó un proyecto que proponía aprovechar la sobreabundancia de agua para generar transporte, canalización e irrigación, así como lograr la plena desecación de los lagos.

1878. Comienzan los trabajos de un nuevo sistema de drenaje para la Cuenca de México, conformado por el Gran Canal del Desagüe y el Túnel de Tequitquiac.

1886-1900. Se construye el Gran Canal, el Túnel de Tequitquiac y otras obras a fin de evitar las inundaciones en la ciudad de México.

Fines de siglo. Comienzan a utilizarse caños de barro cocido, plomo, fierro y piedra para la distribución y abastecimiento de agua potable.

1879. Empieza a funcionar el primer abastecedor de agua potable subterráneo de la ciudad.

SIGLO XX

1900. Se inaugura el Túnel de Tequitquiac.

1906. Comienza la construcción del acueducto que transportaría agua de los manantiales de Xochimilco a la ciudad de México. Se cava en Nativitas el primer pozo profundo de la ciudad, que alcanza los nueve metros de profundidad.

Década de 1920. La ciudad vuelve a inundarse. 1927. Se excavan pozos con bombas en los manantiales de San Luis Tlaxiactemalco.

1930. Se extraen agua de 350 pozos profundos.

1936. Se perforan los primeros 18 pozos profundos, de entre 100 y 200 m, lo que marca el comienzo de la explotación intensiva del manto acuífero.

1937-1942. Se construye un túnel adicional al de Tequitquiac.

1950. Los pozos de los que se extraía agua llegaban a 700.

Década de 1950. La ciudad experimenta graves inundaciones provocadas por las intensas lluvias.

1951. Se inaugura el Sistema Lerma.

1952. Se crea la Comisión Hidrológica del Valle de México, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

1953. Se establece la Dirección General de Obras Hidráulicas del Distrito Federal.

1967. Comienzan los trabajos del drenaje profundo de la ciudad de México.

1956. Se concluye el sistema de pozos Chiconautla, al norte de la ciudad.

1975. Comienza la construcción del Drenaje Profundo.

1976. Empiezan los trabajos del Sistema Cutzamala.

1980. La pendiente del Gran Canal, que permitía el escurrimiento de las aguas, ha pasado de los 19 cm/km que tenía en 1910 a 0 cm/km.

SIGLO XXI

2010. La Ciudad de México requerirá de 43 metros cúbicos de agua por segundo.

Fig. 2.11 Cronología del agua, tomada de la revista Arqueología



El período lluvioso comprende los meses de Mayo a Octubre, con el 80-90% de precipitación anual. Antes del crecimiento desorbitado de la gran Metrópoli la precipitación pluvial se infiltraba en las partes altas de las sierras y a lo largo de sus laderas que actuaban como zonas de recarga o escurría hacia los grandes lagos donde se almacenaba temporalmente para después evaporarse manteniendo un ciclo hidrológico en equilibrio.

En su origen natural fue una cuenca cerrada, alterada artificialmente, la que posteriormente se abrió para desalojar los crecientes volúmenes de aguas residuales. Primeramente se construyó el Canal de Tajo de Nochistongo, le siguieron el Túnel de Tequizquiác, el Canal del Desagüe y el Sistema de Drenaje Profundo, cuyas descargas son aprovechadas, parcialmente, para riego en los estados de México e Hidalgo. El Río Moctezuma sirve de drenaje natural hacia la cuenca del Pánuco en el Golfo de México.

El ciclo hidrológico se ha visto alterado por la desecación de los lagos, la excesiva explotación de los acuíferos y su contaminación antropogenia. La tala inmoderada y el crecimiento irracional de la mancha urbana, entre otros problemas, han alterado de manera considerable el régimen natural de recarga.



CAPITULO III

MARCO GEOLOGICO

3.1 Geología regional

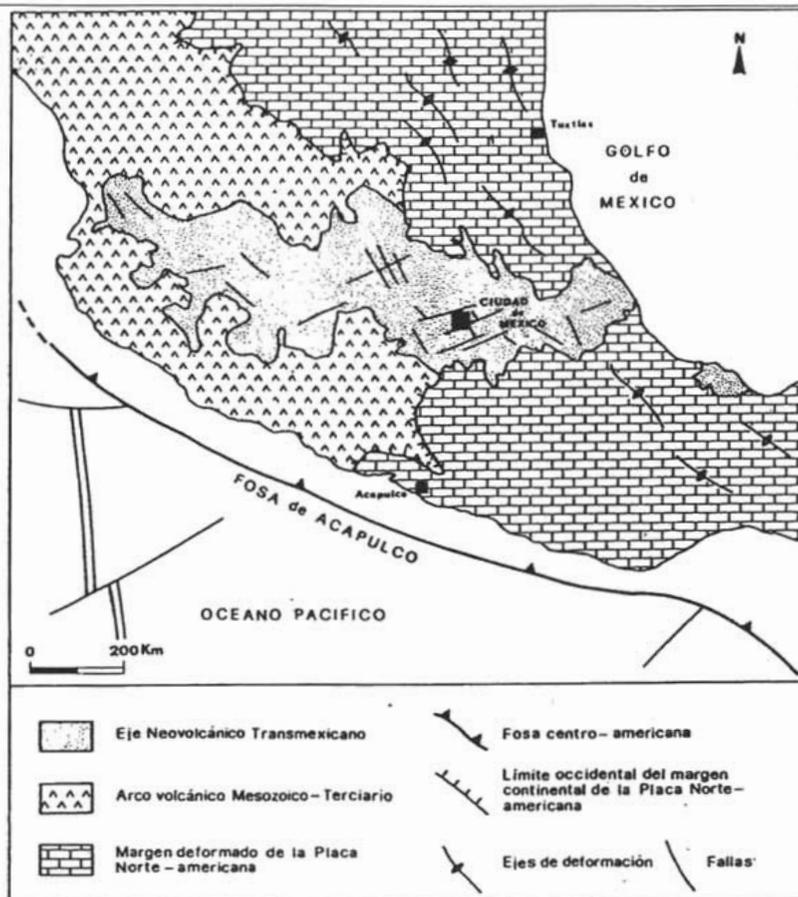
La región centro-meridional de México representa una zona de notable interés geológico, porque deriva de fenómenos cinemáticos relacionados con la evolución de la litosfera. Actualmente, constituye el extremo suroccidental de la Placa Norteamericana, en contacto con las placas Pacífica, de Rivera y Cocos, a lo largo de la Fosa Mesoamericana de Acapulco y con la Placa del Caribe, a lo largo del sistema transformante de Motagua (sistema de fallas, ubicado en la zona Sureste de Chiapas, marca el desplazamiento entre las placas del Caribe y de Norteamérica). La corteza de tipo continental, con espesores variable de 25 a 40 km, formada ya en el Paleozoico mediante procesos de acreción (aumento de masa) en sus márgenes con formaciones de un sistema de cordilleras.

Arriba de la placa oceánica del pacífico en obducción (movimiento continente-océano) hacia el NE son identificables al menos tres elementos principales de la actual placa deformada norteamericana en la región de estudio (Fig. 3.1).

- a) Terrenos de acreción, principalmente constituidos de rocas volcánicas y plutónicas de composición química preferentemente andesítica. Estas comprenden secuencias magmáticas de arco que van del Mesozoico inferior al Cenozoico medio.

El principal sistema de deformación frágil, comprende fallas con dirección WNW-ESE a NW-SE en parte unidas con los sistemas transformantes del Golfo de California.

- b) Terrenos meso-cenozoicos de las "márgenes continentales". Están constituidos principalmente de secuencias sedimentarias (carbonatadas y terrígenas), depositadas en una serie de plataformas y cuencas. Afloran en lugares sobre el antiguo basamento, en la Sierra Madre Oriental y en la Sierra Madre de Chiapas, hasta la Península de Yucatán.



La "soldadura" entre los terrenos incrementados y los que están en el margen continental se encuentra principalmente sepultada por debajo de las formaciones volcánicas cenozoicas y cuaternarias.

La deformación frágil, de tipo tensional, posee una orientación media de NWSE a N-S equivalente a los sistemas de fallas de Estados Unidos.



- c) "Eje Neovolcánico Transmexicano" compuesto de formaciones volcánicas principalmente calco-alcalinas y subordinadamente alcalinas del Plio-cuaternario. Se extiende, en dirección WNW-ESE, a lo largo del paralelo 19°, por casi 1800 km, del Pacífico al Caribe con un ancho máximo de casi 180 km.

La subducción activa de la Placa de Cocos del Pacífico bajo la Placa Norteamericana a lo largo de la Fosa de Acapulco sigue un vector de movimiento orientado al NW con una velocidad hipotizada de unos 6 cm/año, y ha sido bastante bien dibujada por la imponente sismicidad presente en el borde continental. Se considera, que la Placa de Cocos se hunde con una pendiente de 15°-20° aproximadamente llegando a la profundidad de 75-80 km bajo el límite meridional del Eje Neovolcánico Transmexicano.

La distribución de hipocentros, con profundidad hasta de 150 km, tiende a hacerse paralela al Eje Neovolcánico Transmexicano. En general, se trata de eventos sísmicos con magnitud elevada (5) que algunas veces alcanzan valores superiores a 7 (Fig. 5.2).

El Valle de México ocupa el área centro-meridional de la mitad oriental del Eje Neovolcánico Transmexicano. En este último, se encuentran presentes aparatos volcánicos con altura superior a los 5000 m (Pico de Orizaba, 5675 m, Citlaltépetl, 5720 m, Popocatepetl, 5450 m, e Iztaccíhuatl 5200 m).

Los altiplanos tienen un elevación media de 2300 m en la porción oriental, 1600m en la porción central y cerca de 1000 m al occidente.

El Eje Neovolcánico Transmexicano presenta numerosos estratovolcanes poligenéticos, volcanes monogenéticos, conos cineríticos (conos compuestos de material piroclástico), complejos de calderas y cráteres de explosión, con lavas y productos piroclásticos.

Las unidades magmáticas plio-cuaternarias del ENT están constituidas por basaltos, andesitas, dacitas y riolitas que se apoyan, generalmente sobre un sustrato constituido por una unidad magmática cenozoica compuesta de lavas riolíticas, andesíticas, dacíticas y coberturas ignimbríticas.



Desde el punto de vista morfoestructural, se pueden identificar tres regiones principales (occidental, central y oriental), en las cuales se puede manifestar el predominio de un sistema, estructural respecto a otro. Las direcciones principales tienen convergencia en la Placa de Cocos y Norteamericana.

El Valle de México tiene un desarrollo de un centenar de kilómetros en dirección NNE-SSW y una treintena de ancho. Está limitado, al Norte por la Sierra de Pachuca, al oriente por la Sierra del Río Frío y de la Sierra Nevada, al Sur por la Sierra de Chichinautzin y al poniente por el Volcán Ajusco y la Sierra de las Cruces.

La Cuenca de México es una cuenca endorreica desecada artificial que se formó como resultado de la obstrucción del antiguo Valle de México por actividad volcánica cuaternaria (andesítico-basáltica) que edificó la Sierra de Chichinautzin, al Sur de la Ciudad de México.

Casi todo el vulcanismo cuaternario es de tipo monogénico y está caracterizado por centenares de conos cineríticos y numerosos domos con coladas lávicas asociadas. La composición varía de basáltica a dacítica. A esta fase magmática son atribuidos los aparatos finales de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl como también el imponente complejo volcánico de la Sierra de Chichinautzin.

Las interrupciones del drenaje, hacia el Sur del Valle de México, son debidas a la presencia de los productos de la Sierra de Chichinautzin que modificó profundamente la morfología del Valle en los últimos 700 000 años (Vázquez y Jaimes, 1989).

La diversa morfología, adquirida por el área, favorece a las formaciones de sedimentos lacustres y depósitos clásticos, localmente cubiertos y/o interdigitados con productos volcánicos provenientes de la actividad volcánica contemporánea.

Estas secuencias de relleno, constituidas por materiales aluviales, lacustres y volcánicos varían de espesor con respecto a la paleomorfología, pero generalmente aumentan de espesor, de Norte a Sur, llegando, en la porción meridional de la Cuenca de México, a un espesor de casi 600 m.

El material lacustre está constituido esencialmente por limos, arenas y arcillas formadas en aguas



tranquilas por la alteración de brechas y cenizas volcánicas. Localmente estas arcillas contienen lentes de turba.

El Valle de México, está integrado por un complejo sistema de deformación frágil, a veces activa, que ha sido estudiada siguiendo diferentes metodologías de diversos autores (De Cserna et al., 1988; Vázquez y Jaimes, 1989).

Se han identificado centenares de volcanes monogenéticos cuaternarios, cuya distribución está relacionada con las principales orientaciones de las fracturas.

En la Cuenca del Valle de México se presentan tres campos volcánicos recientes:

- a) campo volcánico Chichinautzin, con 132 conos monogenéticos
- b) campo volcánico Tezontepec, al noroeste de Teotihuacán, con 66 aparatos volcánicos
- c) campo volcánico de la porción inmediatamente al Sur de la Ciudad de México, caracterizado por la presencia de 20 conos volcánicos.

En la Fig. 3.2 se presenta un resumen de los principales lineamientos tectónicos resaltando el predominio de los orientados en dirección NE-SW, respecto a los de orientación NW -SE. De Cserna et al. (1988), han seleccionado 14 fallas mayores que atraviesan la Cuenca de México, y que están relacionadas con una zona de cizallamiento de desplazamiento lateral izquierdo, con orientación NE-SW. Es muy probable que la sismicidad local, especialmente la superficial, sea afectada en su mayor parte por las fallas descritas. El esquema de deformación mencionado, llamado en la literatura "Zona de cizallamiento Tenochtitlan" está conectado con el proceso de subducción oblicua", de la Placa de Cocos (en dirección N 35°-45° E) bajo la Placa Norteamericana a lo largo de la Fosa Mesoamericana (con dirección N 70° W aproximadamente).

De lo expuesto, como esquema regional del Valle del México, en el más amplio contexto del México centro meridional, es evidente la complejidad de la reconstrucción geológica de esta región y de su historia geodinámica y cinemática, que en el intervalo de al menos un centenar de millones de años ha producido la configuración actual a través de la evolución de una margen continental de las más interesantes del Pacífico Oriental.

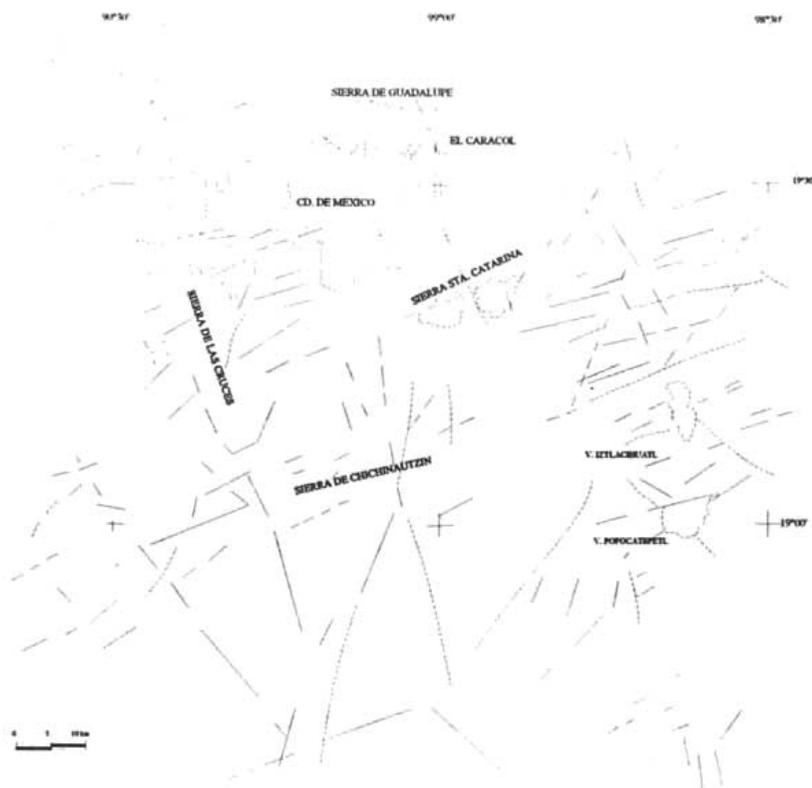


Fig. 3.2 – Mapa de los principales lineamientos en la región circundante a la Cuenca del Valle de México.

3.1.1 Características geológicas

En la zonificación del subsuelo se observa cómo se ha podido precisar la compleja estratigrafía de la zona poniente de la Ciudad gracias a los sondeos y experiencia de construcción de la Línea 7 de Metro. En cuanto a las zonas del lago y de transición, la exploración del subsuelo con el cono eléctrico ha permitido la definición de perfiles estratigráficos más precisos.

En relación con las propiedades mecánicas de los suelos, particularmente en las zonas del lago y de transición, ocurre una constante evolución, observándose una disminución de la compresibilidad y un



aumento de la resistencia al esfuerzo cortante, fenómenos que ocurren en pocos años, y aun en meses, a consecuencia de:

- a) el bombeo profundo para el abastecimiento de agua potable,
- b) el efecto de sobrecarga de antiguos rellenos superficiales,
- c) el peso de las estructuras,
- d) el abatimiento del nivel freático por bombeo superficial para la construcción de cimentaciones y mantenimiento de sótanos.

Todo esto hace que la información previa sobre las propiedades mecánicas de los suelos únicamente deba tomarse como una guía, y que siempre será necesario actualizar el conocimiento del subsuelo mediante estudios geotécnicos confiables. .

Cualquiera que intente comprender la naturaleza geológica de los depósitos sobre los que se edifica la Ciudad de México, deberá partir de tres marcos de referencia: el geológico general, el paleoclimático y el vulcanológico.

3.1.2 Marco geológico general de la cuenca del Valle de México

La cuenca del Valle de México asemeja una enorme presa azolvada: la cortina, situada en el sur, está representada por los basaltos de la sierra de Chichinautzin, mientras que los rellenos del vaso están constituidos en su parte superior por arcillas lacustres y en su parte inferior por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes (fig 3.3).

El conjunto de rellenos contiene además capas de ceniza y estratos de pómez producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante el último medio millón de años o sea en el Pleistoceno Superior, que es aproximadamente el lapso transcurrido a partir del inicio del cierre de la cuenca.

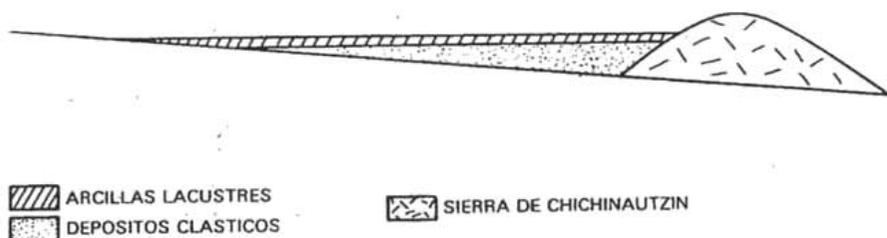


Fig. 3.3 Esquema geológico general del Valle de México

También se reconocen en el citado relleno numerosos suelos, producto de la meteorización de los depósitos volcánicos, fluviales, aluviales y glaciales; estos suelos, hoy transformados en paleosuelos, llevan el sello del clima en el que fueron formados, siendo a veces amarillos, producto de ambientes fríos, y otras veces cafés y hasta rojizos, producto de ambientes moderados a subtropicales.

Sobre este complejo relleno ha crecido la Ciudad de México. Desde la fundación de Tenochtitlan, hará 600 años, los pobladores del lugar han tenido que enfrentarse a las características difíciles del relleno; hacia la mitad de este siglo, sus edificios y obras se fueron desplantando sobre los rellenos correspondientes al borde de la planicie, compuestos por sedimentos transnacionales (Figs 3.4 y 3.5), y en lo que va de la segunda mitad de la centuria, la Urbe se ha extendido aún más, rebasando los límites de la planicie y subiendo a los extensos flancos occidentales de la cuenca, espacio cubierto por los abanicos volcánicos de la sierra de las Cruces, conocido como Las Lomas. Sus depósitos clásticos difieren en mucho de los depósitos arcillosos superficiales del centro de la cuenca.

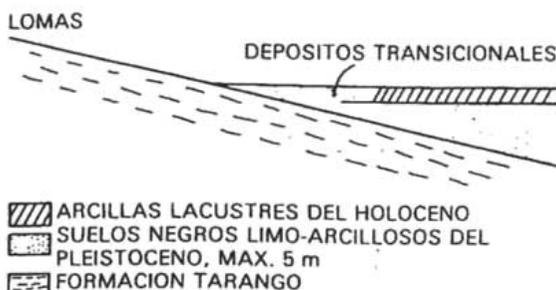


Fig 3.4 Esquema geológico general de la transición Lomas-planicie de un "delta" aluvial.



Fig 3.5 Esquema geológico general de la transición Lomas-planicie fuera de un "delta" aluvial.

3.1.3 Marco paleoclimático

El clima uniformemente cálido y a menudo desértico del Plioceno, en las latitudes de la Meseta Central mexicana, cedió a climas cambiantes y extremosos del Pleistoceno.

Las causas de esta mutación, que afectó a toda la Tierra hace dos millones de años, aún se desconocen. Principió el cambio con ligeras oscilaciones de periodos calurosos a fríos, los que se fueron acentuando hasta hace un millón de años (tabla 3.1), cuando se inició una primera gran glaciación (Nebraska), con una duración aproximada de 100 000 años. Siguió un lapso de clima caluroso, el cual cedió renovada mente a un segundo periodo de glaciación prolongada (Kansas). Entonces se produjo un lapso extenso de clima caliente de unos 200 000 años.

Este intervalo se denomina en Norteamérica el Yarmouth o el Gran Interglacial; imperó hace 400 000 a 600000 años en todo el orbe.

Siguió un tercer periodo glacial (Illinois), para el cual se han podido determinar dos avances separados por un periodo con clima moderado. Esta tercera glaciación terminó al desarrollarse de nuevo un clima relativamente cálido a lo largo de 100 000 a 80 000 años; se le conoce como el Tercer Interglacial o Sangamon en Norteamérica. De nuevo se fue enfriando el clima, imponiéndose la cuarta glaciación, caracterizada por tres oscilaciones y dos estadales de clima moderado; terminó hace 10000 años aproximadamente.



Años antes de hoy	Periodo
10^4	Holoceno.reciente
$80-10 \times 10^3$	4ª glaciación Wisconsin 3 avances
$80-100 \times 10^3$	3er interglacial Sangamon
$100-300 \times 10^3$	3ª Glaciación Illinois 2 avances
$300-400 \times 10^3$	Gran interglacial Yarmouth
¿?	2da glaciación Kansas
¿?	1er interglacial
$400-900 \times 10^3$	1ª glaciación Nebraska

Tabla 3.1 Periodos glaciales e interglaciales

Es entonces que principió el Holoceno o Reciente, periodo climático moderado, tendiente a caliente, o sea el actual.

De lo anterior se deriva que la cuenca de México, desde su cierre en el sur por los basaltos de la sierra de Chichinautzin, ha pasado por dos periodos de glaciación, el Illinois y el Wisconsin y dos interglaciales, el Yarmouth y el Sangamon, tal como se describe en la tabla 3.1

Investigaciones recientes han permitido comprobar en el espacio de Las Lomas, depósitos formados por glaciares pertenecientes al Illinois. Debajo de las arenas azules de Santa Fe, especialmente en la mina Totolapa, se descubrieron restos inconfundibles de roca atribuidas exclusivamente a la acción glacial, en pequeños domos formados en el Pleistoceno Medio. Estos indicios de glaciación son anteriores a 170000 años (Illinois Inferior). Aún más, arriba de las mismas arenas azules hay otras morrenas más jóvenes que se asignan al avance del Illinois Superior.

Las profundas barrancas de la Magdalena, de Santa Rosa y de la Cañada, caracterizadas por su sección clásica en U, se han podido identificar como productos de erosión glacial. Representan estas tres barrancas avances del Illinois Tardío, pues sus depósitos morrénicos y los pulimentos y estrías en sus



paredes aparecen cubiertos localmente por suelos rojizos arcillosos, atribuidos al Tercer Interglacial, o sea el Sangamon.

Hay que señalar que todas las manifestaciones glaciales descritas sobreyacen a secuencias de suelos rojos del tipo Interglacial o sea el Yarmouth. Este horizonte indicador paleoclimático define los fenómenos de origen glacial como pertenecientes a la Tercera Glaciación. Uno de los productos típicos acompañado de la existencia de glaciares son los suelos eólicos.

Las llamadas brisas del valle y de montaña que se desarrollan hoy en día en la cuenca, deben haberse acentuado extraordinariamente durante los climas glaciares, trasformándose en vendavales. Es casi seguro que estos fuertes vientos acarreaban importantes volúmenes de partículas finas de polvo volcánico alterado al Valle.

Al precipitarse este polvo -llamado loess- en el lago, se hidrataba fácilmente creando las conocidas arcillas lacustres del valle; por este fenómeno se interpreta hoy que las arcillas son producto principal de la alteración de loess glacial. .

3.1.4 Marco vulcanológico

Todo material contenido en los depósitos de la cuenca del valle de México es directa o indirectamente de origen volcánico.

De origen volcánico directo son, por ejemplo, las lavas de los domos pliocénicos del cerro de Chapultepec y del cerro del Tepeyac. Lo son también las lavas, brechas, tezontles y cenizas del Peñón del Marqués, así como las de la sierra de Santa Catarina con su hilera de conos escoriales juveniles rodeados de lavas, y las coladas recientes del Pedregal de San Angel originadas en el Xitle. Los productos de estos derrames volcánicos menores no compiten en variedad y volumen con los de un volcán grande, como lo es el cerro San Miguel, que se eleva al SW de la Ciudad de México.

Este complejo volcán con calderas múltiples, estuvo activo desde finales del Plioceno hasta hará algo más de 100 000 años, habiendo producido en un lapso de dos a tres millones de años erupciones



pumíticas de gran volumen y energía, varios kilómetros cuadrados de lavas, además de extensos lahares calientes y fríos, avalanchas ardientes y otros numerosos tipos de piroclásticos, que han contribuido a los extensos abanicos volcánicos que se conocen como Formación Lomas.

Entre sus erupciones más espectaculares, ocurridas en el Pleistoceno Superior, destacan las conocidas arenas azules que irrumpieron al formarse la caldera del cerro San Miguel hará 170000 años; es decir, a mediados de la Tercera Glaciación. Al precipitarse los piroclásticos sobre las superficies glaciales en las cumbres del volcán, el vapor producido generó lahares calientes que descendieron con velocidades extraordinarias, avanzando a distancias de hasta 20 km del cráter, para terminar en las barrancas de Tarango, Tacubaya y San Angel.

Así como se produjeron lahares calientes hubo también ocasiones en las que en el curso de la actividad volcánica resultaron lahares fríos (corrientes de lodo), arrastrando extraordinarios bloques de roca en una matriz areno-lodosa. Efectivamente, superpuesto a los depósitos de morrenas en Tacubaya y Tarango, se reconoce un potente lahar ciclópeo que debe haber descendido de la región de Cuajimalpa a finales del avance glacial del Illinois Inferior, antes de la erupción de las arenas azules.

En el renglón de depósitos volcánicos indirectos se deben mencionar las acumulaciones de polvo eólico. Las regiones volcánicas de por sí abundan en detritos finos derivados de cenizas volcánicas.

El viento levanta este polvo y lo transporta a veces a grandes distancias; si el viento lo deposita en laderas durante periodos de clima frío, se transforma en suelos inmaduros que con el transcurso del tiempo se convierten en tobas amarillas que tanto abundan en Las Lomas. Sin embargo, si se depositan en un lago, como el antiguo vaso de Texcoco, sus partículas se hidratan, transformándose en arcillas.

Por otra parte, si se asientan durante un interglacial, o sea cuando impera un clima relativamente caliente, se producen suelos con coloides debido a la actividad fitológica más intensa; estos suelos con el tiempo se transforman en tobas rojizas arcillosas. Los suelos rojos, ricos en coloides, son característicos del Sangamon.

Relacionados con los periodos glaciales, especialmente a finales de ellos, están los deshielos, por los



cuales crecieron arroyos y ríos caudalosos. Los deshielos generaron potentes depósitos fluviales que se reconocen hoy en numerosos puntos de Las Lomas, así como al pie de ellas en la transición a la planicie central, formando abanicos aluviales y deltas.

3.2 Estratigrafía

Atendiendo a estratigrafía y propiedades del subsuelo, el área urbana de la Cuenca del Valle de México se ha dividido tradicionalmente en tres zonas, denominadas del lago, de transición y de lomas.

La zona del lago se caracteriza por tener un subsuelo con grandes espesores de arcillas lacustres de origen volcánico, muy compresibles, de baja resistencia al corte y de contenidos de agua altos. La estratigrafía, en general, es muy regular, aunque cada estrato suele ser de espesor variable.

El subsuelo de la zona de lomas (faldas de las serranías y lomeríos del Oeste y Suroeste de la cuenca), está formado por materiales de origen volcánico, particularmente abanicos y corrientes lávicas, y suelos producto de la meteorización de los primeros. Esta zona se distingue de las del lago y de transición por ser sus materiales de mayor resistencia al corte y de menor compresibilidad.

En ella se presentan, además de los problemas de su propia naturaleza, otros generados por el hombre, tales como minas. La zona de transición, localizada entre las dos antes descritas, es errática en estratigrafía y, por lo mismo, en propiedades mecánicas. Está constituida por estratos de suelos arcillosos del mismo origen que los de la zona del lago, pero de menor espesor y sin orden estratigráfico bien definido, intercalados con depósitos casi siempre lenticulares de suelos aluviales. En esa zona las propiedades mecánicas exhiben variaciones importantes tanto en dirección horizontal como con la profundidad.

a) Depósitos del lago. Los depósitos de la planicie del Valle de México son los que comúnmente se conocen como depósitos del lago. Hay que señalar que ello solamente es válido y correcto para ciertos tiempos geológicos con condiciones climáticas que propiciaban la existencia de un lago. En la cuenca cerrada podía existir un lago cuando las lluvias superaban a la evapotranspiración, el que desaparecía cuando ésta superaba a las lluvias. Obviamente, el factor que dominaba dicho equilibrio era la



temperatura ambiental: si el clima se enfriaba, se formaba un lago; si se calentaba, el lago disminuía y hasta desaparecía.

Consecuencia de lo anterior es lo que llaman los geólogos transgresiones lacustres o regresiones lacustres. El resultado práctico de este juego era la depositación de arcillas o formación de suelos. El lago subsistía durante las épocas de calor (sequía) en las partes centrales de la cuenca, continuando aquí su depósito de arcillas (lacustres); en las partes marginales (transición) ocurría lo contrario, donde entre arcillas lacustres se intercalaban frecuentemente suelos secos.

Teniendo en mente los conceptos geológicos, litológicos y de temperatura expuestos, es relativamente fácil interpretar la secuencia de los llamados depósitos lacustres, a la luz de los cambios climáticos del último medio millón de años. En ese lapso que corresponde al Pleistoceno Superior, se han desarrollado en el Hemisferio Norte dos glaciaciones (clima frío) con tres periodos interglaciares (clima moderado a caliente).

El clima de la cuenca del Valle de México ha sido una función directa de dichos cambios, razón por la cual se puede reconocer en la secuencia estratigráfica de los depósitos del lago las grandes variaciones climáticas. Esta circunstancia, combinada con un análisis minucioso de las erupciones volcánicas, de las cuales ha sido posible fechar algunas, ha llevado a una geología climática de los depósitos del lago. Además, se ha logrado establecer una correlación estratigráfica de dichos depósitos con las secuencias volcánicas de las Lomas al poniente de la ciudad.

Zeevaert presentó en 1953, la primera interpretación de la secuencia estratigráfica de los depósitos lacustres. Mooser le ha agregado información reciente, fundamentalmente sobre la interpretación de edades geológicas y las correlaciones estratigráficas establecidas entre Las Lomas y la planicie; en esta interpretación estratigráfica de la planicie ya no se habla de formaciones Tacubaya, Becerra y Tarango, ya que estas unidades litológicas, con excepción de la Tarango, no se prolongan de Las Lomas al relleno lacustre aluvial.

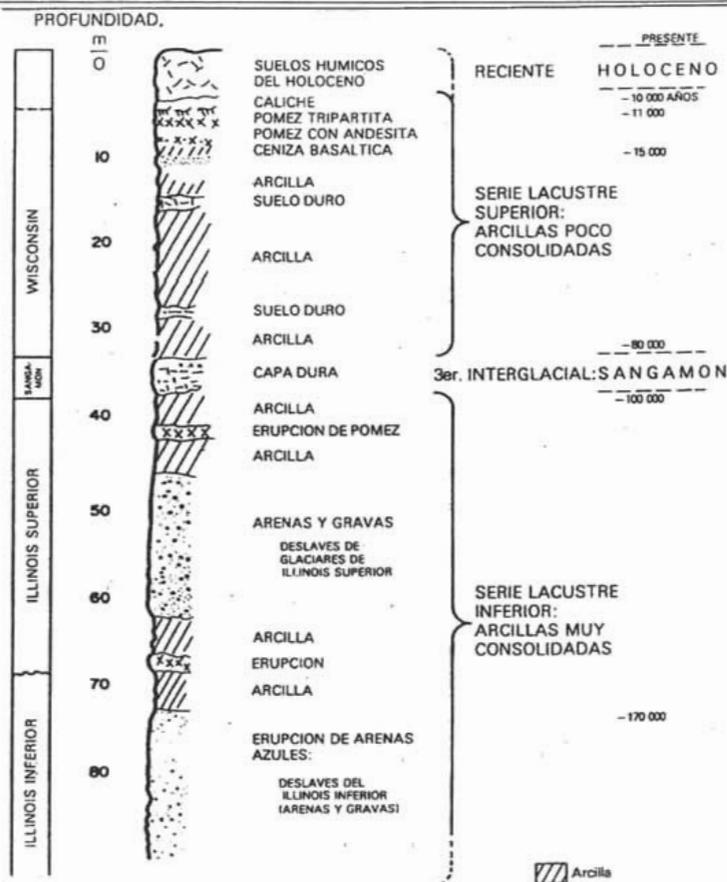


Fig 3.6 Estratigrafía de la planicie lacustre, Ciudad de México

En la Fig. 3.6 se presenta en forma sintética la interpretación de la estratigrafía propuesta por Mooser. Nótese que las erupciones de arenas azules, ocurridas hace 170000 años, representan lo que antes se definía como Formación Tarango.

b) Depósitos de transición.

Los depósitos lacustres del centro de la cuenca van cambiando a medida que se acercan al pie de Las Lomas; lo que ocurre es que entre las arcillas lacustres van intercalándose capas de suelos limosos, cuerpos de arenas fluviales y, en ciertos casos, especialmente en la desembocadura de arroyos y ríos,



importantes depósitos de gravas y boleos. Obviamente, las aportaciones fluviales de Las Lomas al gran vaso de sedimentación, que es la planicie, se depositan especialmente en el quiebre morfológico Lomas-Planicie (fig 3.7).

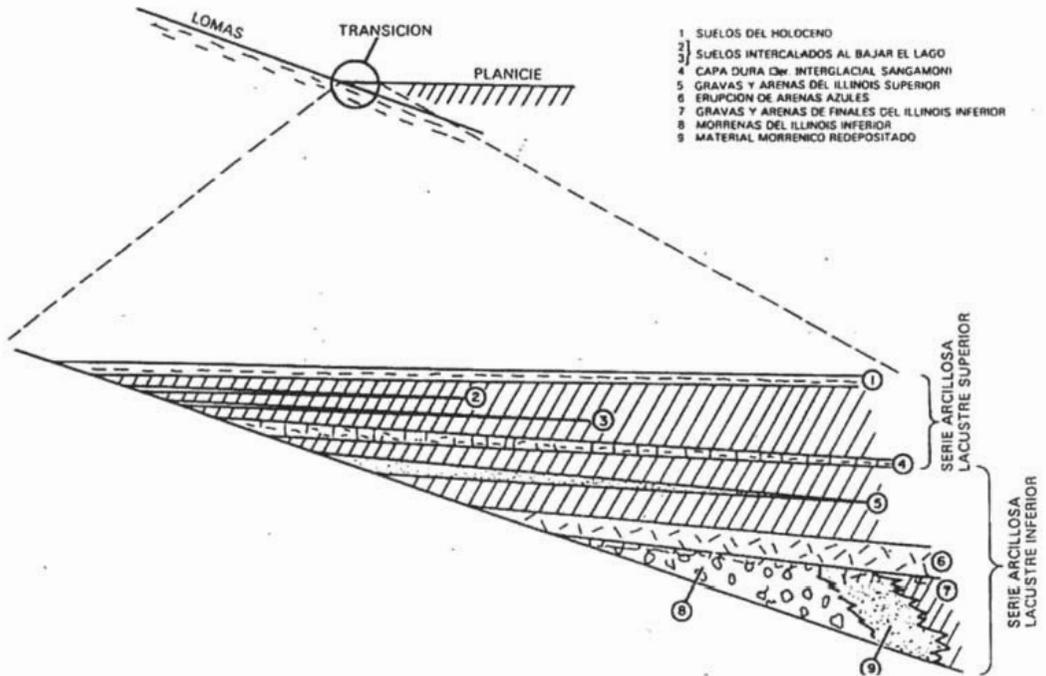


Fig 3.7 Estratigrafía de la zona de transición

El lago central nunca fue profundo; de ahí que los arroyos que bajaban por las barrancas y desembocaban en la planicie no lograron formar deltas extensos que se introdujeran mucho a dicho lago. Los clásticos fluviales y aluviales se acumulaban consecuentemente en el quiebre morfológico y se interestratificaban localmente con la serie arcillosa lacustre superior. Sin embargo, en la serie arcillosa lacustre inferior, las aportaciones de los glaciares que bajaron en el Illinois Inferior hasta Río Hondo, Virreyes, Tacubaya, Barranca del Muerto y San Angel, depositando morrenas (formación geológica compuesta de fragmentos de roca y arcilla acumulados por un glaciar) con fuertes volúmenes de clásticos y boleos, lograron formar acumulaciones aluviales extensas que parten del pie de Las Lomas y se adentran en la planicie aluvial.



En la fig 3.7 se reproduce este hecho en el corte geológico, que muestra la estratigrafía de la zona de transición

c) Depósitos de Las Lomas.

En la secuencia estratigráfica de Las Lomas se identifican cuatro fenómenos geológicos:

- La acumulación de potentes depósitos de erupciones volcánicas explosivas.
- La erosión subsecuente de estos depósitos, formándose profundas barrancas.
- El depósito en las barrancas de morrenas, y
- El relleno parcial de esas barrancas con los productos clásticos de nuevas erupciones.

Las anteriores unidades quedan separadas unas de otras por suelos rojos, amarillos o cafés según el clima que rigió después de su emplazamiento. En la Fig. 3.8 muestra esa estratigrafía, que se extiende sobre un intervalo que cubre el último medio millón de años.

3.2.1 Depósitos del lago

Proceso de formación de los suelos.

Los suelos arcillosos blandos son la consecuencia del proceso de depósito y de alteración fisicoquímica de los materiales aluviales y de las cenizas volcánicas en el ambiente lacustre, donde existían abundantes colonias de microorganismos y vegetación acuática; el proceso sufrió largas interrupciones durante los periodos de intensa sequía, en los que el nivel del lago bajó y se formaron costras endurecidas por deshidratación o por secado solar. Otras breves interrupciones fueron provocadas por violentas etapas de actividad volcánica, que cubrieron toda la cuenca con mantos de arenas basálticas o pumíticas; eventualmente, en los periodos' de sequía ocurría también una erupción volcánica, formándose costras duras cubiertas por arenas volcánicas.

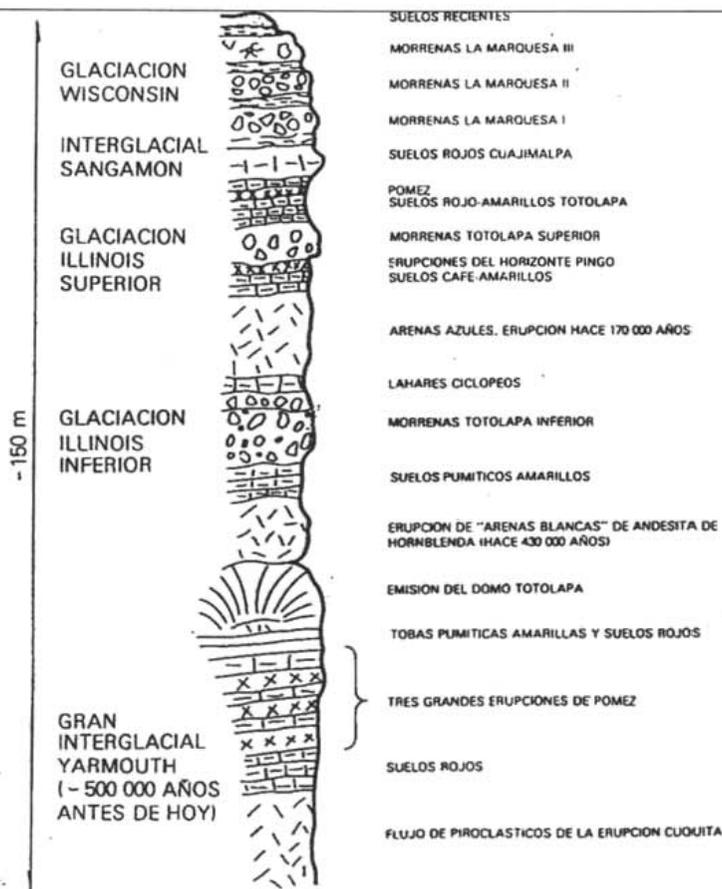


Fig. 3.8 Estratigrafía de las lomas.

El proceso descrito formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda separados por lentes duros de limos arcilla-arenosos, por las costras secas y por arenas basálticas o pumíticas productos de las emisiones volcánicas. Los espesores de las costras duras por deshidratación solar tienen cambio; graduales debido a las condiciones topográficas del fondo del lago; alcanzan su mayor espesor hacia las orillas del vaso y pierden importancia y, aun llegan a desaparecer, al centro del mismo. Esto último se observa en el vaso del antiguo lago Texcoco, demostrando que esta región del lago tuvo escasos y breves periodos de sequía.



Evolución de las propiedades mecánicas

a) Consolidación natural. El proceso de formación de los suelos implicó que se consolidaran bajo su propio peso, excepto en las costras duras, que se preconsolidaron fuertemente por deshidratación o secado solar y que en su parte inferior formaran una zona ligeramente preconsolidada. Considerando que la masa de suelo predominante era muy blanda y normalmente consolidada, la variación de su resistencia al corte con la profundidad debió ser lineal y seguramente muy similar en cualquier punto del lago. Es factible que en el lago Texcoco, que prácticamente no sufrió etapas de sequía, y donde el contenido salino de sus aguas era más alto, las arcillas fueran algo más blandas y compresibles que en el resto de la cuenca.

b) Consolidación inducida. El desarrollo urbano en la zona lacustre de la cuenca del Valle de México ha ocasionado un complejo proceso de consolidación, en el que se distinguen los siguientes factores de influencia:

- La colocación de rellenos desde la época precortesiana, necesarios para la construcción de viviendas y pirámides, así como para el desarrollo de zonas agrícolas.
- La apertura de tajos y túneles para el drenaje de aguas pluviales y negras, que provocó el abatimiento del nivel freático, lo que a su vez incrementó el espesor de la costra superficial y consolidó la parte superior de la masa de arcilla.
- La extracción de agua del subsuelo, que ha venido consolidando progresivamente a las arcillas, desde los estratos más profundos a los superficiales.

d) Resistencia al corte. Las etapas del proceso de consolidación implican la evolución de la resistencia al corte de los suelos descrita esquemáticamente en la (Fig. 3.9)



Características estratigráficas

- a) Costra superficial (CS) Este estrato está integrado por tres substratos, que constituyen una secuencia de materiales naturales cubiertos con un relleno artificial heterogéneo, a saber:

Relleno artificial (RA). Se trata de restos de construcción y relleno arqueológico varía entre 1 y 7 metros.

Suelo blando (SB). Se le puede describir como una serie de depósitos aluviales blandos con lentes de material eólico intercalados.

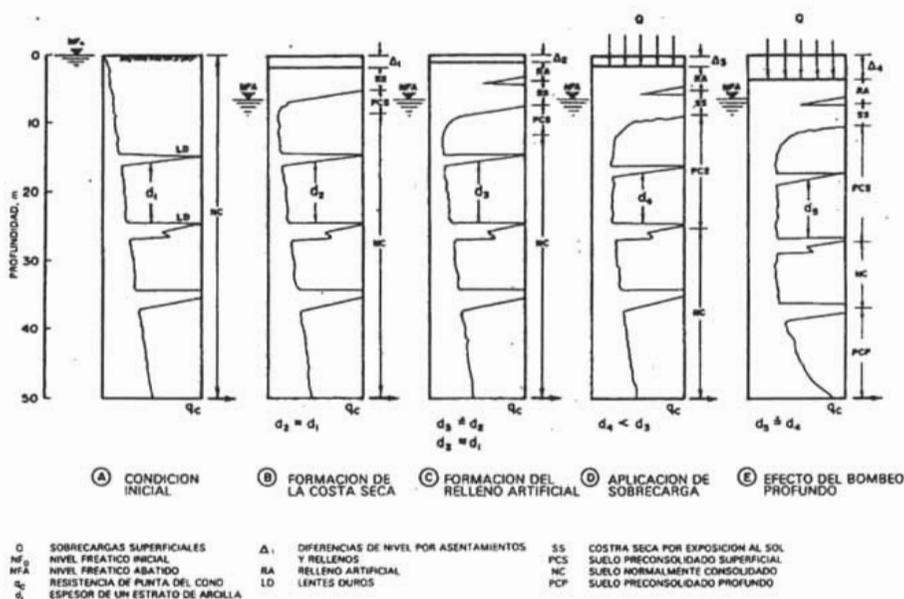
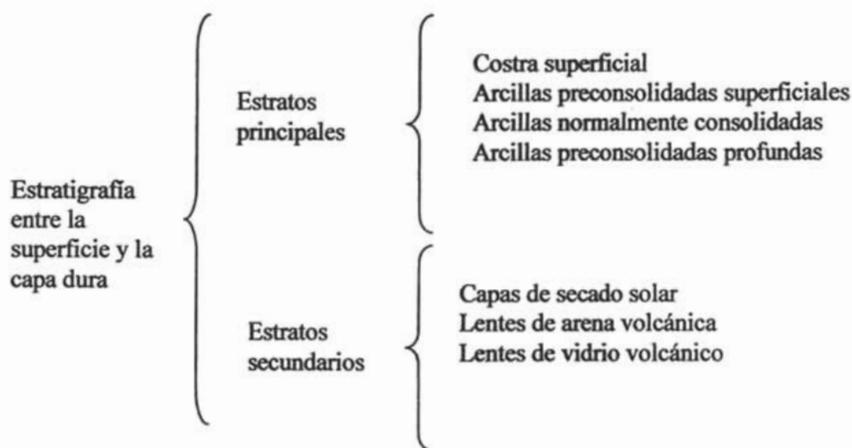


Fig 3.9 Evolución de la resistencia al corte

Costra seca (SS) Se formó como consecuencia de una disminución del nivel de lago, quedando expuestas algunas zonas del fondo a los rayos solares.



- b) Serie arcillosa lacustre superior. El perfil estratigráfico de los suelos del lago, entre la superficie y la llamada Capa Dura, es muy uniforme; se pueden identificar cuatro estratos principales, acordes con su origen geológico y con los efectos de la consolidación inducida por sobrecargas superficiales y bombeo profundo; estos estratos tienen intercalados lentes duros que se pueden considerar como estratos secundarios. A esta parte se le identificará como serie arcillosa lacustre superior y tiene un espesor que varía entre 25 y 50 m aproximadamente. La estratigrafía anterior se resume a continuación.



En la Fig. 3.10 se ilustran dos ejemplos de la identificación de estos estratos, excepto los preconsolidados profundos, en dos sitios con diferente nivel de preconsolidación. A continuación se describen brevemente las características de los estratos que integran esta serie arcillosa.

Arcilla preconsolidada superficial (PCS). En este estrato superficial, las sobrecargas y rellenos provocaron un proceso de consolidación que transformó a los suelos normalmente consolidados, localizados por debajo de la costra superficial CS, en arcillas preconsolidadas.

Arcilla normalmente consolidada (NC). Se localiza por debajo de la profundidad hasta la que afectan las



sobrecargas superficiales y por arriba de los suelos preconsolidados por el bombeo profundo, abajo indicados. Es importante aclarar que estos suelos se han identificado como normalmente consolidados para las sobrecargas actuales, porque aun estas arcillas han sufrido un proceso de consolidación a partir de su condición inicial.

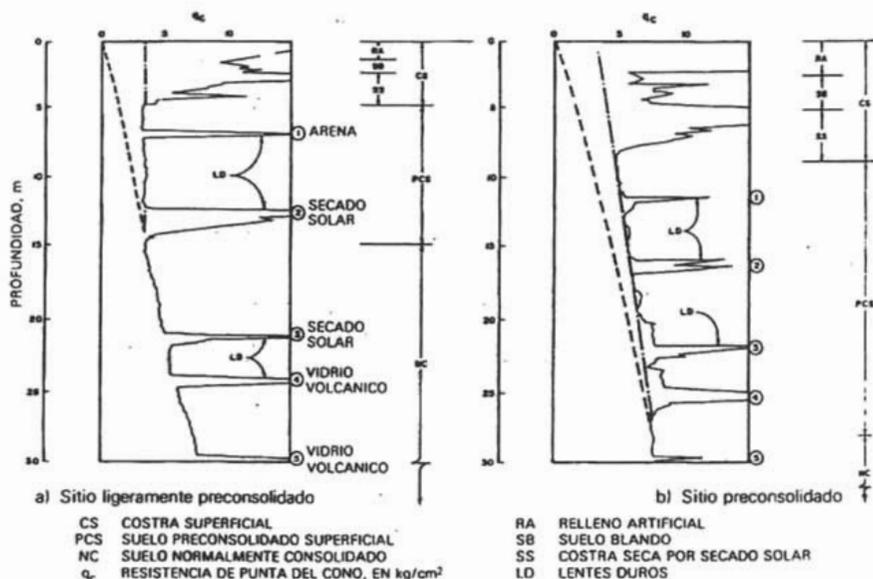


Fig. 3.10 Perfiles tipo de los suelos de la zona del lago, en función de la resistencia al corte determinada por el cono

Arcilla preconsolidada profunda (PCP). El bombeo para abastecer a la ciudad de agua potable ha generado un fenómeno de consolidación, más significativo en las arcillas profundas que en las superficiales.

Lentes duros (LD). Los estratos de arcilla están interrumpidos por lentes duros que pueden ser costras de secado solar, arena o vidrio (pómez) volcánicos; estos lentes se utilizan como marcadores de la estratigrafía

- c) Capa dura. La capa dura es un depósito de limo arenoso con algo de arcilla y ocasionales gravas con una cementación muy heterogénea; su espesor es variable, desde casi imperceptible en la



zona central del lago que no llegó a secarse, hasta alcanzar unos cinco metros en lo que fueron orillas del lago. Desde el punto de vista geológico, este estrato se desarrolló en el periodo interglacial Sangamon.

- d) Serie arcillosa lacustre inferior. Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros, en un arreglo semejante al de la serie arcillosa superior; el espesor de este estrato es de unos quince metros al centro del lago y prácticamente desaparece en sus orillas. La información disponible de este estrato es muy reducida, como para intentar una descripción más completa. .
- e) Depósitos profundos, Es una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio; la parte superior de estos depósitos, de unos cinco metros, está más endurecida, abajo de la cual se encuentran estratos menos cementados y hasta arcillas preconsolidadas.

3.2.2 Depósitos de transición

Características generales

Los depósitos de transición forman una franja que divide los suelos lacustres de las sierras que rodean al valle, de los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona del lago. Estos materiales de origen aluvial se clasifican de acuerdo al volumen de clásticos que fueron arrastrados por las corrientes hacia el lago y a la frecuencia de los depósitos; así, se generaron dos tipos de transiciones: interestratificada y abrupta; ambas condiciones se describen a continuación.

Condición interestratificada del poniente

Esta condición se presenta en los suelos que se originaron al pie de barrancas, donde se acumularon los acarros fluviales que descendieron de las lomas a la planicie; estos depósitos tienen semejanza con deltas, solamente que se extendieron hasta la arcilla del antiguo lago Texcoco, formándose intercalaciones de arcillas lacustres con arenas y gravas de río (figs 3.4 y 3.5).



En el proceso de formación de los suelos, el ancho de la franja de estos depósitos transicionales interestratificados varió según el clima prevaleciente en cada época geológica; así, cuando los glaciares en las barrancas de Las Lomas se derritieron, a finales de la Tercera Glaciación, los depósitos fluviales correspondientes (formados al pie de los abanicos volcánicos) resultaron mucho más potentes y extensos que los originados a finales de la Cuarta Glaciación, con mucho menor espesor de las cubiertas de hielo.

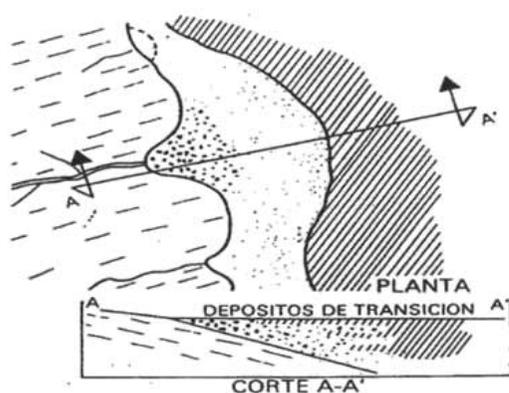


Fig. 3.11 Transición interestratificada ancha.



Consecuentemente, y generalizando, puede hablarse de una zona de transición interestratificada cambiante y ancha al pie de Las Lomas; esta área contiene en sus partes más profundas, debajo de la llamada Capa Dura, depósitos caóticos glaciales, laháricos y fluvio-glaciales caracterizados por enormes bloques depositados en la boca de las barrancas de San Angel, del Muerto, Mixcoac, Tacubaya, Tarango y Río Hondo (fig 3.11).

Por otra parte, los depósitos aluviales pueden ser recientes, Y entonces sobreyacen a los depósitos lacustres, como lo muestra la Fig 3.5; tal es el caso de la cubierta de suelos negros, orgánicos, arenosos y limoarcillosos del Holoceno, que se extienden desde el pie de Las Lomas sobre 2 o 3 km al oriente formando las riberas del lago histórico de los toltecas y mexicas. Otra zona de transición interestratificada ancha se extiende del valle de Cuauhtepc hacia el sur (Fig. 3.12).

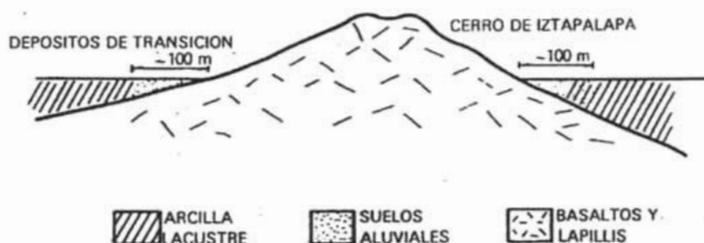


Fig 3.12 Transición interestratificada angosta

Condición abrupta cercana a los cerros

Esta condición se identifica en el contacto entre los rellenos de la cuenca y los cerros que sobresalen de dicho relleno, a manera de islotes; en este caso, los depósitos fluviales al pie de los cerros son prácticamente nulos, lo cual origina que las arcillas lacustres estén en contacto con la roca (fig 3.13). Esta transición abrupta se presenta en el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués, el cerro de la Estrella y el cerro del Tepeyac; la estratigrafía típica de estas zonas está integrada por la serie arcillosa lacustre interrumpida por numerosos lentes duros, de los materiales erosionados de los cerros vecinos.

Es interesante mencionar que en la cercanía del Peñón de los Baños se encuentran intercalaciones de lentes delgados de travertino silicificado, producto de las emanaciones de aguas termales.



Fig 3.13 Transición abrupta de islote a depósitos lacustres



3.2.3 Depósitos de lomas

Características generales

La zona de Las Lomas está formada por las serranías que limitan a la cuenca al poniente y al norte, además de los derrames del Xitle al SSW en las sierras predominan tobas compactas de cementación variable, depósitos de origen glacial y aluviones. Por su parte, en el Pedregal del Xitle, los basaltos sobreyacen a las tobas y depósitos fluviglaciales más antiguos.

Zona poniente

- a) Sierra de las Cruces. Está constituida por abanicos volcánicos, caracterizándose superficialmente por la acumulación de materiales piroclásticos durante su actividad explosiva (principalmente en el Plioceno Inferior) y que fueron retransportados por agua y hielo en épocas posteriores.

En la formación de Las Lomas se observan los siguientes elementos litológicos producto de erupciones de grandes volcanes andesíticos estratificados.

Horizontes de cenizas volcánicas. De granulometría variable, producidos por erupciones violentas que formaron tobas cementadas depositadas a decenas de kilómetros de distancia del cráter.

Capas de erupciones pumíticas. Correspondientes a la actividad volcánica de mayor violencia y que se depositaron como lluvia, en capas de gran uniformidad hasta lugares muy distantes del cráter. Lahares. Definidos como acumulaciones caóticas de material piroclástico arrastrado lentamente en corrientes lubricadas por agua, generadas por lluvia torrencial inmediatas a la erupción.

Lahares calientes. Correspondientes a corrientes impulsadas y lubricadas por gases calientes; son las menos frecuentes ya que están asociadas a erupciones paroxísmicas de extraordinaria violencia; las arenas y gravas azules son las más representativas de estos depósitos.

Depósitos glaciales. Caracterizados por grandes bloques angulosos en una matriz más fina, dispuestos en forma caótica; estos depósitos generalmente presentan un color rosa.



Depósitos fluvio-glaciales. Producto del arrastre del agua que se derrite y sale del glacial; se distinguen por su ligera estratificación.

Depósitos fluviales. Correlacionables con la formación clástica aluvial del relleno de la cuenca del Valle de México.

Suelos. Producto de la alteración de lahares y cenizas, de color rojo y gris asociados a climas húmedos y áridos, respectivamente.

Por otra parte, los depósitos más antiguos presentan fracturamiento y fallamiento tectónico dirigidos principalmente al NE, dirección que mantienen la mayoría de las barrancas de la zona.

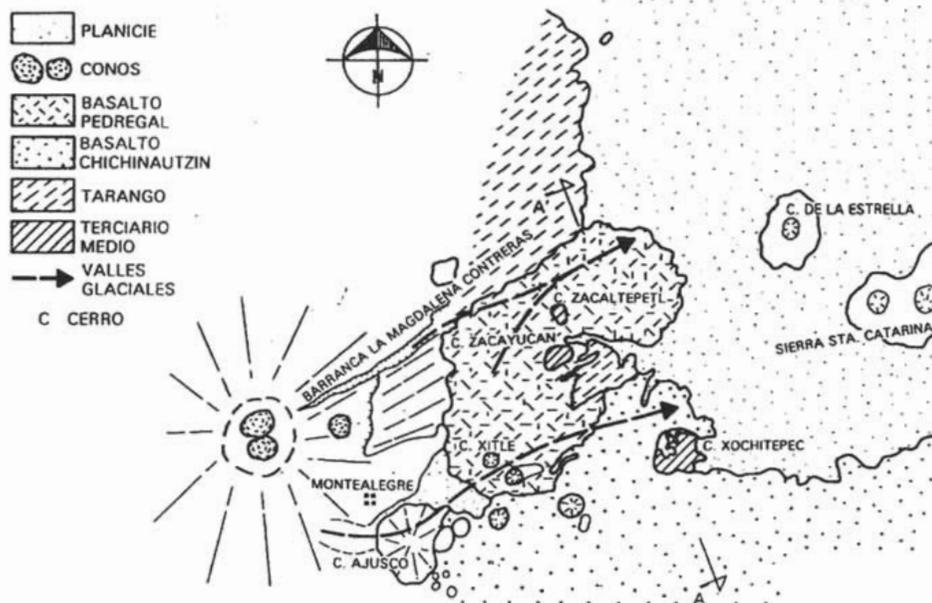


Fig 3.14 Geología del pedregal del xitle,

- b) Pedregal del Xitle. Del cerro del Xitle descendió, hace unos dos mil años, una extensa colada de lavas basálticas; sus numerosos flujos cubrieron las lomas al pie del volcán Ajusco y avanzaron en sus frentes hasta la planicie lacustre entre Tlalpan y San Angel. Las lavas descendieron



sepultando dos importantes valles antiguos: uno en el Sur, que se dirigía anteriormente a las Fuentes Brotantes de Tlalpan; otro en el Norte, el mayor, que se extendía entre el cerro Zacaltépetl y las lomas de Tarango. Este último valle contaba con dos cabeceras: una en los flancos orientales del cerro de la Palma y la otra en la barranca de La Magdalena Contreras (fig 3.14). A la zona cubierta por lavas, se le identifica como los pedregales de: San Angel, San Francisco, Santa Ursula, Carrasca y Padierna.

Por otra parte, debe haber existido otro importante valle aún más al Sur, entre las Fuentes Brotantes de Tlalpan y la sierra de Xochitepec; este valle tuvo su cabecera en Monte Alegre. Este afluente debe haber sido sepultado durante la erupción del Ajusco, en el Cuaternario Superior.

Muy anteriormente a la erupción del Xitle, en el Illinois (hace 200 000 años) avanzaron grandes cuerpos de hielo; estos glaciares fluyeron de la barranca de La Magdalena Contreras hasta las partes bajas de la antigua planicie lacustre, acercándose a lo que hoy es San Angel.

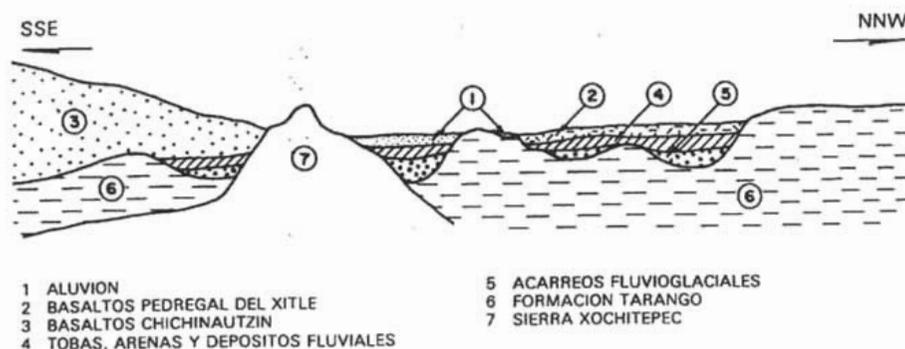


Fig 3.15 Sección Chichinautzin-Lomas cortando el Pedregal de San Angel (corte A-A' de la fig 3.14)

Indicios de morrenas con multitud de bloques grandes se han encontrado en San Angel así como en las Fuentes Brotantes; por consiguiente, debajo de las lavas del Pedregal de San Angel deben existir importantes acumulaciones de morrena s y secuencias fluvioglaciales derivadas de su erosión. Por otra parte, también puede asegurarse que antes de que las lavas del Xitle cubrieran el sitio, este valle fue



inundado por otras coladas lávicas; en el corte geológico de la fig 3.15 se ilustra esquemáticamente la estratigrafía descrita.

Zona norte

Esta región corresponde a la sierra de Guadalupe; se integra principalmente por rocas volcánicas dacíticas y andesíticas, en forma de un conjunto de elevaciones dómicas que se extienden desde el Tepeyac, en el SE de la sierra, hasta la zona de Barrientos, en el NW. En su parte central, esta sierra está afectada por un graben que se extiende al NNE, formando el valle de Cuauhtepac; en el extremo septentrional de dicho graben y genéticamente ligado a él, se eleva un volcán, cuyas cumbres erosionables constituyen las porciones más altas de la sierra de Guadalupe y se denomina el cerro Tres Padres.

El tectonismo que ha regido el vulcanismo de la sierra de Guadalupe remonta al Mioceno Medio; consiste de fracturas y fallas dirigidas al ESE. El graben de Cuauhtepac, como se dijo, obedece a un tectonismo dirigido al NNE ocurrido en el Mioceno Superior. de Santa Catarina, afecta a la totalidad de la sierra de Guadalupe en el Plioceno Superior y Pleistoceno.

Una característica de la sierra de Guadalupe son los potentes depósitos de tobas amarillas que cubren los pies de sus numerosas elevaciones en forma de abanicos aluviales. Estas tobas consisten de estratos de vidrio pumítico fino a grueso; son los productos de las erupciones violentas que generaron la sierra de las Cruces durante el Mioceno y Pleistoceno Inferior.

Durante el Pleistoceno Medio y Superior, las oscilaciones climáticas produjeron periodos glaciales e interglaciales, que sometieron a la sierra de Guadalupe a ciclos de erosión pluvial y eólica, formándose pequeños depósitos de aluviones y loess. Finalmente, al azolverse la cuenca de México a consecuencia de la formación de la sierra de Chichinautzin, la sierra de Guadalupe fue rodeada por depósitos aluviales y lacustres en el sur, este y norte; de estos depósitos emerge esta sierra hoy como isla.



CAPITULO IV

MARCO HIDROGEOLOGICO

4.1 Antecedentes hidrogeológicos.

Antes de comenzar este capítulo conviene dar un pequeño precedente de algunos términos hidrogeológicos que serán utilizados tanto en este capítulo como en los capítulos posteriores.

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas y permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales:

- **Acuíferos:** capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, materiales calizos, etc); son formaciones con capacidad de drenaje muy alta en las que se pueden perforar pozos con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento.
- **Acuitardos:** capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas); y su capacidad de drenaje es de media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.
- **Acuicludos:** pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcilla, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.)
- **Acuifugos:** formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar; se muestran impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos.



4.1.1 Tipos de acuífero y su comportamiento.

Cuando se bombea un pozo bajo el nivel del agua en el mismo y en toda la porción de acuífero circundante a él; el descenso de nivel es más pronunciado en el pozo y se reduce a medida que aumenta la distancia del mismo. La distancia existente entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero en la que la influencia puede considerarse nula, es el llamado radio de influencia (Fig. 4.1). En definitiva, se forma en torno al pozo un gran cono de bombeo, cuya superficie es la superficie piezométrica dinámica, y el valor del nivel del agua en un punto de dicha superficie es el llamado nivel dinámico. El nivel estático es el que existía en el acuífero antes de empezar el bombeo.

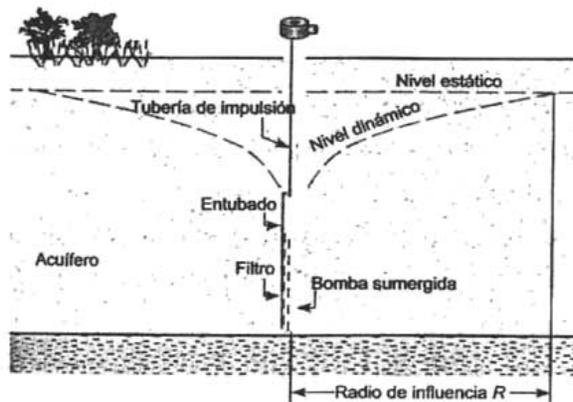


Fig. 4.1 Cono de influencia al bombear un pozo de captación

A continuación se presentan los tipos de acuíferos que existen en la naturaleza, su modo de reaccionar en los diferentes casos hidráulicos y estructurales, y su comportamiento frente al bombeo.

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales de acuíferos (Fig. 4.2)

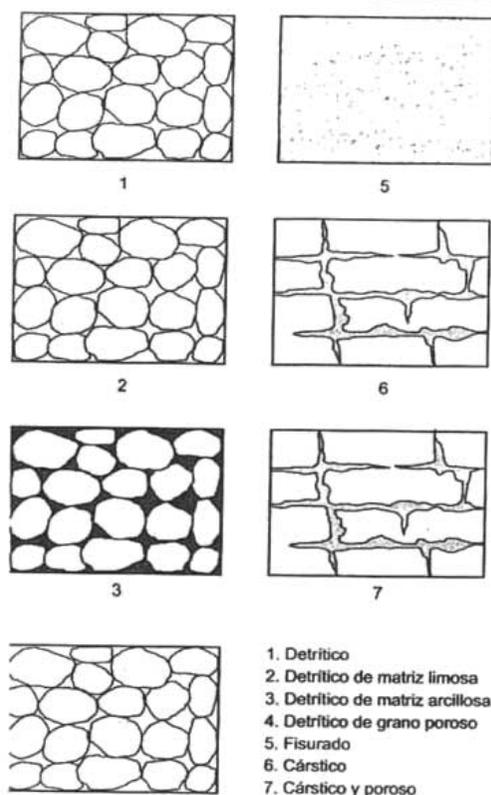


Fig. 4.2 Tipos de acuífero según su textura

- Los denominados acuíferos porosos, cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular; entre ellos se encuentran las gravas, arenas y, en general, todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo. La textura del medio está constituida por granos, permitiendo que el agua se almacene y circule por los huecos intergranulares, dichos huecos pueden estar rellenos de material granular muy fino, disminuyendo las características del medio para el almacenamiento y transporte de agua, o incluso estar rellenos de materiales arcillosos, dejando prácticamente anuladas estas características. En ocasiones, los mismos granos están constituidos por material poroso que les aporta, incluso, mejores propiedades como el almacenamiento de agua. Los medios granulares, dada su génesis, suelen ser muy homogéneos a escalas reducidas.



- Aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución, forman en conjunto los acuíferos cársticos y fisurados, y se encuentran entre ellos las calizas, dolomitas, granitos, basaltos, etc; siendo los dos primeros los tipos más importantes. La carstificación es un proceso de disolución por acción del agua en formaciones carbonatadas previamente fisuradas.
- Por último, están los acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas.

Por otra parte, los acuíferos, según sus circunstancias hidráulicas y estructurales, pueden reaccionar de tres distintas formas (Figs. 4.3 y 4.4):

- Acuíferos libres: son aquellos en los que el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por saturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada; este volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos que se citan a continuación, y por ello tienen bastante inercia. Los conos de bombeo suelen ser esbeltos, esto es, con elevados descensos de nivel en el pozo y corto radio de influencia.
- Acuíferos cautivos o confinados: son aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo del material acuífero; en realidad, están a presión o en carga, debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden proceden de la descompresión de estos niveles superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero. En rigor, no existen en la naturaleza acuíferos cautivos puros, dado que no existen materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos muchos se pueden considerar como tales. Son acuíferos rápidos, con muy poca inercia debido a su baja capacidad de almacenar agua, que reaccionan o transmiten enseguida las influencias de un bombeo puntual, los conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los libres, pero con radios de influencia largos.

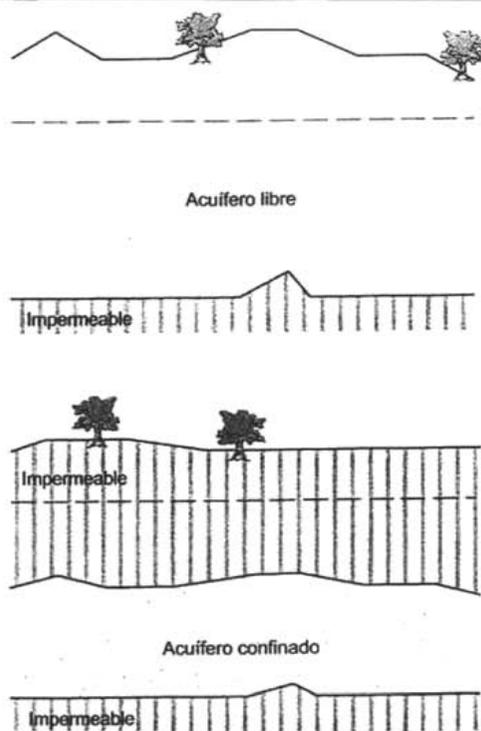


Fig. 4.3. Esquema de acuífero libre y confinado

- Acuífero semiconfinados: los materiales que los rodean no son todos impermeables; así el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. Consecuentemente, la velocidad de reacción de estos acuíferos ante un bombeo es más moderada que en los cautivos y los radios de influencia tienen valores medio entre los libres y los cautivos. En realidad un acuífero semiconfinado es un sistema físico integrado por un acuífero superior bien alimentado.

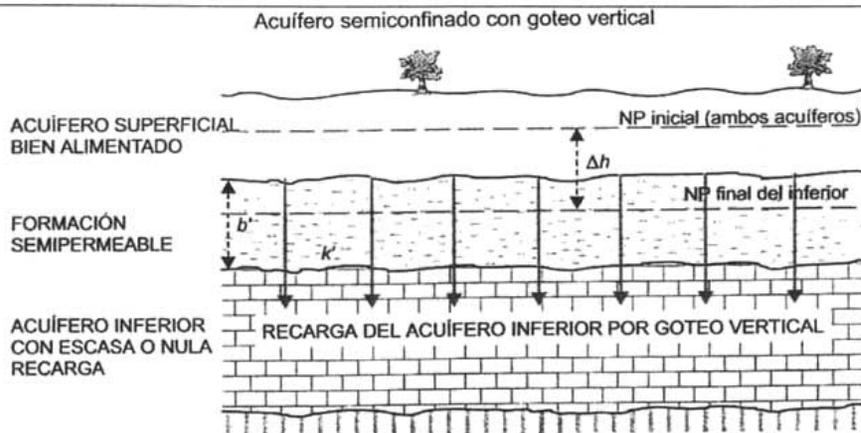


Fig. 4.4 Esquema de un acuífero semiconfinado.

4.1.2 Nivel piezométrico.

El nivel piezométrico en un punto de un acuífero puede definirse como el valor de la cota respecto a una referencia que alcanza el agua cuando dicho punto se libera de la presión atmosférica. Esta altura se compone de dos sumandos: la altura de posición del punto respecto a una referencia y la altura de presión equivalente a la altura que alcanzaría el agua sobre el punto al dejar éste libre a la presión atmosférica.

Un término muy usado, principalmente en geotecnia, es el nivel freático. Con frecuencia se habla de la profundidad a que se encuentra el agua en una excavación, pozo. Sin embargo este concepto no resulta útil, dado que no suministra una idea de la capacidad de realizar trabajo de una partícula de agua en un punto. La medida entre la superficie y el punto en que se encuentra el agua en una obra no es comparable con la altura que alcanza el agua sobre una referencia cuando se libera el punto a la presión atmosférica. También se conceptualiza el freático como el nivel piezométrico asociado a acuíferos libres, pero con frecuencia se refiere únicamente a la “superficie del agua”, es decir, a la parte superior del tramo saturado en el acuífero libre.

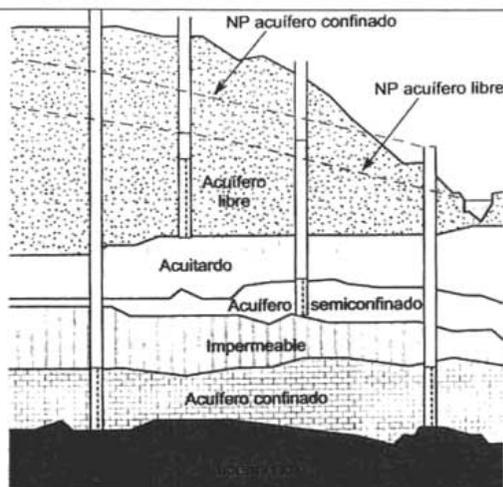


Fig. 4.5 Tipos de acuíferos y niveles piezométricos

4.1.3 Parámetros hidrogeológicos característicos.

La capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrogeológico. Por ello se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos en cuanto a su comportamiento respecto al agua que pueden transmitir. Porosidad y coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad.

- Porosidad. La porosidad es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica.
- Coeficiente de almacenamiento. Este coeficiente representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura la del acuífero, cuando desciende un metro el nivel piezométrico. Es, en consecuencia, un parámetro físico referido al volumen cedido por unidad de volumen del acuífero y, al igual que la porosidad es adimensional.
- Permeabilidad. La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir



agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica, representada por el coeficiente de permeabilidad, k.

- La transmisividad es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no sólo la textura del acuífero y las características del fluido, sino las características estructurales o geométricas. Se define como el producto de la permeabilidad k y el espesor del acuífero b.

$$T = kb$$

Acuíferos muy permeables pero de bajo espesor pueden, a pesar de sus excelentes características de textura, no ser aptos para una eficaz transmisión del agua debido a su bajo espesor y, consecuentemente, baja transmisividad

4.2 Características hidrogeológicas de los terrenos y los tipos de acuíferos de la Cuenca del Valle de México.

Los estudios hidrogeológicos concernientes al Valle de México fueron desarrollados y programados antes de 1985 por diversos organismos técnicos del Departamento del Distrito Federal (DGCOH) y del Gobierno Federal.

Estos estudios han sido de gran importancia para el conocimiento de esta importante reserva hídrica, la estimación de los recursos hídricos y el mantenimiento óptimo de la calidad del agua para uso doméstico.

La exigencia de estos estudios realizados sobre los diversos sectores de la Cuenca del Valle de México tiene su origen en el interés hidrogeológico de esta región, que aloja a una de las ciudades más grandes del mundo y que afronta cada año graves problemas por el suministro del recurso hídrico.

Un primer estudio de detalle realizado por la DGCOH del DDF se debe a Lohnberg (1959) que presenta una investigación hidrogeológica de la Sierra de Chichinautzin, estableciendo que el sector de Xochimilco-Chalco es el más beneficiado de todos los aportes de la Sierra, que contribuye a la alimentación del 85% de este sistema acuífero.



En años posteriores, fueron llevadas a cabo otras investigaciones en varios lugares de la Cuenca. Sin embargo se presentan dificultades para interpretar correctamente la información estratigráfica y estructural generada por infinidad de obras de captación y perforaciones profundas, debido al escaso conocimiento geológico que se tenía del subsuelo. Los conocimientos han sido integrados sobre todo con prospecciones (exploraciones del terreno en busca de yacimientos minerales) geofísicas realizadas en las bajas vertientes de las estructuras volcánicas y en la extensa llanura de origen lacustre o aluvial (Cuenca de México).

Un análisis detallado de las características de permeabilidad de los diversos terrenos de las columnas estratigráficas establecidas en la Cuenca de México, permiten distinguir:

- a) terrenos que presentan permeabilidad por fisuración
- b) terrenos con permeabilidad baja a media
- c) terrenos permeables por porosidad

a) Terrenos permeables por fisuración.

Las rocas más antiguas, que constituyen la cobertura del complejo volcánico del Valle de México, presentan en general un comportamiento de medio impermeable. Sin embargo tienen una permeabilidad importante cuando han sido fracturadas por procesos tectónicos. La presencia de frecuentes discontinuidades asociadas, en parte a fisuraciones, provocada por deformaciones tectónicas, ocasiona elevados valores de permeabilidad y variabilidad en relación a estas discontinuidades.

En las abundantes retículas resultantes se produce una notable circulación hídrica, a veces limitada por la ausencia de fracturas en la roca lávica, muy compacta o casi privada de discontinuidades.

A estas discontinuidades están asociadas un considerable número de cavidades de dimensiones variadas, formadas por las burbujas que se encontraban en el flujo lávico antes de consolidarse y que contribuyen a aumentar localmente la permeabilidad que resulta en una contribución a la porosidad intrínseca de la lava. Un papel importante juegan los productos de escoria (lava porosa), cuya alta porosidad se traduce en una elevada permeabilidad. En estos casos los poros están representados por huecos de grandes



dimensiones presentes entre elementos de forma irregular con porosidades intrínsecas no indiferentes y acumuladas aleatoriamente en el curso de los movimientos de los derrames. En general los terrenos volcánicos que presentan lavas y escoria, están estrechamente asociados con un tipo de permeabilidad “grande”, especialmente si se presentan fisuras de dimensiones notables.

En el Valle de México, principalmente, las coladas lávicas de composición andesítica constituyen un medio impermeable que limita a varios cientos de metros de profundidad, la circulación del flujo subterráneo.

Por el contrario, las formaciones de composición reolítica, desarrolladas principalmente en la parte meridional de la Cuenca, forman acuíferos con notables espesores que presentan permeabilidad moderada, debido al escaso fracturamiento. Derrames basálticos más recientes con textura burbujosa y con fracturas que muestran intemperismo, constituyen acuíferos de alta permeabilidad debida en parte a su porosidad, aunque, por sus condiciones físicas, a menudo se presentan con comportamientos de acuíferos semi-permeables.

Por la gran extensión que abarca, el comportamiento del terreno volcánico puede considerarse medianamente homogéneo según el concepto de la composición estadística de zonas más o menos permeables.

De ello se sigue la posibilidad de considerar, para esos terrenos, un valor medio de permeabilidad. Los datos existentes concernientes a valores de permeabilidad de las diferentes rocas volcánicas son insuficientes, por lo que sólo es posible definir cualitativamente el grado de permeabilidad utilizando simplemente el criterio del comportamiento hidrogeológico relativo al tipo de variación litológica.

Aprovechando 4 pruebas de bombeo de larga duración, realizadas en algunos pozos ubicados en la Cuenca, han sido determinados algunos coeficientes de transmisibilidad relacionados con acuíferos de la Sierra de Chichináutzin. Estos coeficientes van de un valor de 2.9 a $393 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Tabla 4.1). La prueba relativa al pozo Tulyehualco 4, resultó no interpretable debido a la presencia de formaciones volcánicas fracturadas de alta permeabilidad.



APROVECHAMIENTO No	VALOR DE LA TRANSMISIBILIDAD MEDIA $\times 10^{-3} m^2/s$
119	35.1
203 IZTAPALAPA 8	36.4
S.C. 1	125.6
S.C. 7	58.6
TUL 4	NO INTERPRETABLE
S.L. 14	393.1
NORIA 6	112.4
PER 9	59.4
38	2.9

Tabla 4.1. Valores de transmisibilidad media por acuíferos volcánicos de la Sierra del Chichinautzin (1987)

Con el fin de completar el esquema del terreno permeable por fisuración, hay que recordar que los terrenos eruptivos asociados con depósitos de origen pluvial y lacustre en la extensa Planicie de México, se encuentran bajo la forma de masas lávicas y de productos eruptivos. Sus relaciones con los terrenos menos permeables de dichos depósitos les quitan interés hidrogeológico pues no tienen la posibilidad de ser alimentados sino por infiltraciones directas limitadas a la reducida área de afloramiento. En otras situaciones pueden favorecer la formación de acuíferos locales en las rocas huéspedes.

b) Terrenos de permeabilidad baja y media.

Las características permeables que presentan las tobas, brechas, formaciones volcano-clásticas y los diversos productos piroclásticos intercalados entre los complejos lávicos andesítico-basáltico superior, y andesítico-riolítico inferior, que constituye la cobertura de los numerosos aparatos volcánicos que se encuentran en la Cuenca del Valle de México. Esta secuencia volcano-clástica, establece en forma global un comportamiento de medio semi-permeable que a escala regional almacena y transmite grandes volúmenes hídricos hacia los acuíferos adyacentes.

Las características hidrogeológicas de los piroclastos están controladas por las dimensiones de los granos, su fracturamiento y su grado de compactación. Los materiales granulares de grano fino (cenizas, lapilli (piroclasto de tamaño pequeño con un diámetro que varía entre los 2-4 mm. y los 25-64 mm), etc.) presentan una alta porosidad aunque su permeabilidad es baja.



Las tobas de grano fino a veces se presentan con un alto contenido de arcilla a causa de su profunda alteración.

En la base de las estructuras volcánicas se localizan depósitos piroclásticos de granulometría mayoritariamente gruesa, no cementados, menos porosos pero más permeables que los que se encuentran en cotas más elevadas. Constituyen acuíferos de buena permeabilidad, bajo el nivel piezométrico regional. La posición de éstos depósitos a veces en las partes profundas (honduras), pero sobretodo en las partes altas de las estructuras volcánicas, determinan en el subsuelo de las vastas llanuras lacustres y aluviales, la existencia de los distintos niveles piezométricos acuíferos que conservan su individualidad mientras no intervengan factores tectónicos que interrumpan la continuidad del horizonte poco permeable.

c) Terrenos permeables por porosidad

En la parte central y meridional de la Cuenca, los acuíferos volcánicos están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de baja permeabilidad. Con estas características hidrogeológicas, los acuíferos son confinados o semiconfinados y presentan bajos coeficientes de almacenamiento. Los depósitos lacustres y fluviales de baja permeabilidad pueden constituir acuíferos semi-permeables que presentan en ocasiones espesores de cientos de metros y que, regionalmente, presentan grandes volúmenes hídricos.

Materiales aluviales no consolidados, como arenas, gravas, limos y arcillas interestratificadas afloran en muchos lugares cortando el relieve volcánico de la Cuenca, formando niveles hídricos superficiales del subsuelo. Los valores de permeabilidad y transmisibilidad de los acuíferos aluviales varían de 5×10^{-4} a $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

De lo expuesto anteriormente, respecto a la permeabilidad del terreno en la Cuenca del Valle de México resulta que el principal medio acuífero es representado por el conjunto de formaciones volcánicas, antiguas y recientes. Si en las estructuras volcánicas están presentes horizontes de materiales piroclásticos de baja permeabilidad, es posible que se verifiquen las condiciones favorables para la



presencia de niveles piezométricos separados, aunque con áreas de alimentación comunes, que se colocan en las cotas más elevadas de los relieves volcánicos.

4.3 Identificación Geológica e Hidrodinámica del sistema acuífero de la Cuenca del Valle de México.

Las características hidrogeológicas descritas y la estructura geológica controlan en diversos grados los procesos hidrodinámicos que se verifican en los sistemas hidrológicos (recarga de acuíferos subterráneos, circulación del flujo subterráneo y descarga del acuífero).

En la Cuenca, las rocas con alta capacidad de infiltración son representativas de rocas volcánicas fracturadas y piroclastos de grano medio a grueso los cuales afloran en gran número constituyendo excelentes áreas de alimentación. Igualmente favorables a la infiltración son los depósitos aluviales de grano grueso presentes a lo largo de los numerosos valles que intersecan las estructuras volcánicas.

En el Valle de México la constitución geológica, típica de los terrenos volcánicos, ha producido varias estructuras hidrogeológicas.

1. Estructura hidrogeológica con acuíferos de nivel piezométrico libre suspendido.

Frecuentemente, en áreas montañosas elevadas de rocas fracturadas y alteradas cubren formaciones poco permeables estableciendo acuíferos suspendidos, independientes del sistema hidrogeológico regional. Los sistemas volcánicos fracturados recientes como los predominantemente piroclásticos y lávicos poco permeables, constituyen la secuencia hidrogeológica que da origen a éstos acuíferos (Fig. 4.6).

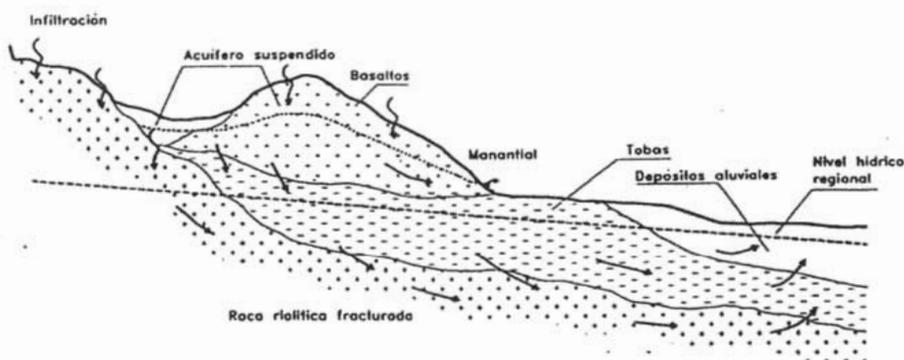


Fig. 4.6- Estructura hidrogeológica con acuíferos de nivel piezométrico libre suspendido.

El volumen hídrico almacenado, atribuye a estos un carácter remanente y transitorio. Estos acuíferos a veces pueden alimentar manantiales que se localizan en los flancos del relieve o sobre paredes de incisiones profundas algunos otros se forman en valles inter montañosos donde los depósitos fluviales forman acuíferos poco extendidos pero buenos recargadores de los flujos superficiales.

2. Estructura hidrogeológica con acuíferos intercomunicados de nivel piezométrico suspendido.

Los pozos profundos desarrollados sobre aparatos volcánicos de la Cuenca a lo largo de los valles han alcanzado los acuíferos volcánicos que probablemente presentan un nivel hídrico regional.

Esto confirmaría la existencia de sistemas de flujo hídrico que interconectarían los diversos relieves montañosos y los valles adyacentes (Figura. 4.7). Las profundidades a las cuales los niveles hídricos se localizan en las áreas montañosas dependen de diversos factores topográficos, geológicos e hidrogeológicos. El factor dominante es la capacidad transmisora de las rocas, la cual depende de las características de permeabilidad (grado y tipo) y del espesor saturado de los acuíferos.

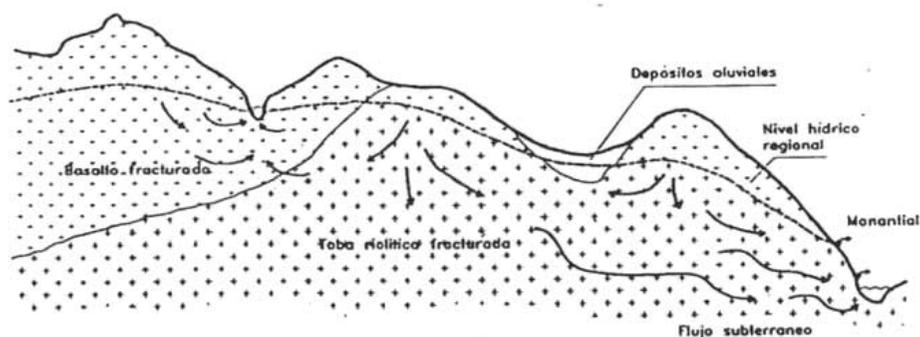


Fig.4.7- Estructura hidrogeológica de diversos acuíferos interconectados.

Los niveles hídricos más profundos se alcanzan bajo los complejos volcánicos montañosos constituidos principalmente de rocas fracturadas con alta permeabilidad.

3. Estructura hidrogeológica con acuíferos de niveles piezométricos múltiples (nivel piezométrico superior libre).

En el subsuelo de los valles y planicies de la Cuenca, normalmente las coladas lávicas, fracturadas, tiene la función de colectores entre los materiales de baja o media permeabilidad, tales como aluviones, depósitos fluviales y lacustres y piroclastos. En esta región, el tectonismo juega un papel importante en todo el sistema hidrológico. En general, la interrupción de la continuidad espacial de los niveles permeables impide el flujo hídrico subterráneo. Los materiales de colmataje (Rellenar una hondonada o depresión del terreno mediante sedimentación de materiales transportados por el agua) constituyen los sistemas hidrogeológicos a flujo hídrico único dado que todos los niveles de los sistemas a menudo están hidráulicamente interconectados (Figura. 4.8).

A causa de la heterogeneidad y anisotropía de estos materiales, se tienen diferencias significativas en las caras hidráulicas, en temperatura y en la calidad de las aguas.

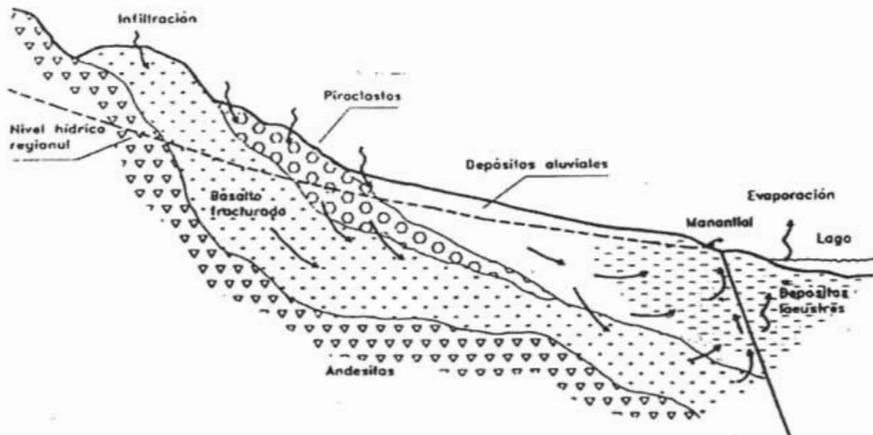


Fig. 4.8- Sistema de flujo hídrico en una estructura hidrogeológica de acuífero de niveles piezométricos múltiples.

Por lo que respecta a la alimentación, los sedimentos lacustres y aluviales están circuncidados principalmente por dos tipos de formaciones volcánicas: las del Terciario superior, de tipo andesítico, impermeables y las del Cuaternario, de tipo basáltico granular y permeable. La primera formación se considera como límite de flujo hídrico nulo para la recarga, que se realiza a lo largo de los cauces de los ríos que escurren sobre los conos aluviales. La segunda formación, constituye el límite de alimentación conocido.

La descarga natural del sistema acuífero está controlada parcialmente por factores geológicos. El volumen hídrico descargado es directamente proporcional a estas características e inversamente al volumen potencial que los sistemas pueden descargar a través de los drenajes naturales.

En esta región, los acuíferos volcánicos generan manantiales a lo largo de los flancos o en la base de los relieves, con caudales variables de una decena de litros a algunos metros cúbicos por segundo. Los acuíferos de naturaleza basáltica que alimentan manantiales, en general poseen niveles piezométricos libres y permanentes. Los sistemas hidrogeológicos, poco extensos y de baja transmisibilidad como los acuíferos que determinan niveles piezométricos suspendidos, pueden generar manantiales con caudal intermitente y poco volumen. La mayoría de las cuencas fluviales recibe en gran parte agua de descarga natural de los acuíferos. El volumen hídrico mínimo, que los acuíferos de alta transmisibilidad descargan a lo largo de las pendientes de los cursos de agua, está estimado en algunos metros cúbicos por segundo.



Los factores geológicos constituyen también una de las influencias dominantes en la descarga hídrica artificial, efectuada en los pozos. En efecto, las características de los acuíferos determinan la cantidad de flujo y la eficiencia del almacenamiento. Generalmente, los pozos desarrollados en los basaltos cuaternarios presentan un caudal específico de $20 \text{ m}^3 / \text{s}$, dependiendo de la transmisibilidad del medio. Los pozos de los acuíferos riolíticos y aluviales se caracterizan por presentar caudales específicos variables entre 1 y $15 \text{ m}^3 / \text{s}$.

4.4 Esquematzación del sistema acuífero de la Planicie de México

A lo largo de la franja de piedemonte de las principales sierras donde se realiza la brusca variación de pendiente de los cursos de agua, se desarrollan extensos depósitos aluviales que cubren las diversas formaciones volcánicas.

Siempre en la proximidad de las franjas de piedemonte se desarrollan las llamadas “zonas de transición” donde las diversas formaciones volcánicas están cubiertas por depósitos aluviales, a veces con depósitos lacustres más recientes. En ocasiones, los depósitos aluviales y lacustres se interdigitan y en estos casos se presentan intercalaciones francamente granulares.

También puede verificarse (por ejemplo, en algunas áreas próximas al Cerro de la Estrella, al NE del centro poblacional de Chalco) que las coladas lávicas se interponen entre los depósitos aluviales.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la Planicie de México está constituida por un acuífero semi-permeable (“acuitardo”), en la parte superior, con espesor variable, llegando a tener en algunas zonas, 200-400 m (Planicie de Chalco y de Texcoco). Este acuífero semi-permeable está constituido principalmente por materiales sedimentarios y volcano-sedimentarios del Cuaternario tales como: depósitos lacustres, cenizas volcánicas, lapilli, arcillas, etc. Bajo éste se encuentra el “acuífero”, actualmente en explotación, formado por material granular, más grueso que el del acuífero semi-permeable y otros tipos de material volcánico. Su espesor es también variable, siendo generalmente mayor, de 200 metros, al igual que sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas



volcánicas, en ocasiones fracturadas, cuya base llega a ser de 2000 m en el centro de la Cuenca, disminuyendo hacia las márgenes. El contenedor impermeable, a profundidad, lo constituyen rocas calcáreas dolomíticas cretácicas.

El sistema acuífero, localizado en la parte más superficial del subsuelo de la Planicie de México, presenta diferencias secundarias respecto a las planicies limítrofes, tales como las de Texcoco y Chalco. Las principales diferencias secundarias están relacionadas con las secuencias de los terrenos que componen los depósitos lacustres, en efecto, en estos depósitos se presentan dos niveles de acuíferos (capas duras), de espesor reducido e intensamente aprovechados a través de los pozos que no se encuentran en los sectores meridionales de la Planicie de México.

Un sondeo típico en la zona lacustre puede esquematizarse con la siguiente secuencia (Herrera et al., 1982), de la cima de la base:

- 1) Depósitos arenosos, arcillosos o limosos, con abundantes restos fósiles o materiales heterogéneos. Espesor máximo de 10 m aproximadamente.
- 2) Niveles limo-arcillosos que en ocasiones presentan delgadas intercalaciones de arenas, muy compresibles y de color extremadamente variable (“acuitardo I”). sus espesores oscilan entre los 15 y los 32 m.
- 3) Piroclastos de grano medio-fino, muy cementados (“primera capa dura”). Espesor estimado de casi 3m.
- 4) Niveles limo-arcillosos del todo similar a los superiores, pero con mayor grado de compactación (“acuitardo II”). Espesores variables, entre los 4 y los 14m.
- 5) Depósitos arenosos con gravas e intercalaciones de limos y arcillas arenosas (“acuitardo granular”).

Por el contrario, en el subsuelo de la Planicie de Texcoco, se presentan en la sucesión de depósitos lacustres dos niveles muy cementados (capas duras) constituyendo los acuíferos confinados en aprovechamiento. La sucesión estratigráfica típica resulta constituida por (Herrera et al., 1987), de la cima a la base:



- 1) Depósitos limo-arcillosos de espesor variable de 15 a 35 m (“acuitardo I”).
- 2) Piroclastos de grano medio-fino con espesor máximo de 7 m (“capa dura”): primer acuífero en aprovechamiento.
- 3) Depósitos limo-arcillosos de espesor variable de 10 a 17 m (“acuitardo II”).
- 4) Piroclastos de grano medio-fino de espesor variable de 2 a 11 m (“capa dura II”), segundo acuífero en explotación.
- 5) Depósitos de arenas y gravas (“acuífero granular”) aprovechado para usos industriales y potables.

Estos mismos medios aparecen en la “zona de transición”, aunque la variabilidad es mayor. En algunos lugares, además, se encuentran intercalaciones adicionales y la continuidad de la “capa dura” resulta un poco dudosa.

Los tipos litológicos mencionados presentan un amplio intervalo de variación en los parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, transmisibilidad, etc.). Estos medios acuíferos se encuentran comunicados hidráulicamente; la interrelación del primer paquete (depósitos lacustres) con el segundo (depósitos aluviales y piroclásticos), ha quedado demostrada por los fenómenos de hundimientos que han afectado a la Ciudad de México. Provocada por la excesiva extracción en el acuífero semi-permeable y por la extracción de la parte superior del acuífero profundo, lo cual causó flujo del acuífero semi-permeable hacia este acuífero granular.

De las pruebas mecánicas, efectuadas sobre materiales de origen lacustre de la Planicie de Texcoco, se ha observado que la conductividad hidráulica (permeabilidad) varía poco con la consolidación quedando comprendida entre $10^{-9} m/s$ y $10^{-8} m/s$.

El valor propuesto, para el coeficiente de almacenamiento específico del acuífero confinado (“capa dura”), es igual a $8.83 \times 10^{-5} m^{-1}$, mientras para las partes donde el acuífero es libre el coeficiente de almacenamiento resulta de 0.2, valor normalmente asignado a los rellenos fluviales.



Este multiacuífero es recargado por infiltraciones de la precipitación, actuando como áreas de recarga más importantes las sierras circundantes. El régimen de flujo es controlado por la extracción ($43m^3 / s$), predominando pozos con profundidades menores o iguales a 100m. El mantenimiento de agua subterránea en la Cuenca representa cerca del 70% de su abastecimiento total.

4.5 Extracción de los acuíferos de la Planicie de México

El bombeo, a través de pozos profundos, se inicia en la Ciudad de México a principios del siglo XX, aunque faltan datos referentes a la localización de los pozos y la cantidad de agua extraída.

Por medio del Departamento del Distrito Federal se inicia, a partir de 1935, el censo de pozos hídricos. Los datos iniciales se refieren a 196 pozos municipales. En estos registros no son anotados una serie de pozos obstruidos en 1955, que están localizados en el centro de la Ciudad.

Después de los pozos municipales fueron perforados una gran cantidad de los que se conoce su exacta ubicación y volumen total de agua extraído, estimado en casi la cuarta parte de los pozos municipales. Por medio de la información disponible ha sido posible reconstruir la historia de las extracciones y su localización desde 1935. Estos datos son necesarios para la construcción de modelos matemáticos para el estudio del fenómeno de los hundimientos (subsistencia).

Los datos referentes a niveles piezométricos se disponen desde 1953 cuando la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, inicia la instalación de estaciones piezométricas. Los datos recabados son publicados por la CAVM (órgano desconcentrado) en sus boletines de Mecánica de Suelos cada cuatro años. En 34 estaciones se tiene los registros completos de las fluctuaciones del nivel hídrico en acuíferos profundos. Los datos relativos a estas variaciones se han utilizado sucesivamente para la calibración del modelo matemático realizado para el estudio de la evolución del abatimiento del nivel piezométrico de 1900 a 1973.

Para la zona considerada en el modelo matemático, se ha efectuado el balance hídrico para el período



1950-1975. Para 1959 la extracción anual (Q) fue de 70.4 millones de metros cúbicos, de los cuales 30.7 se extrajeron de la región (Qr), mientras el 39.7 encuentra su origen en la recarga de la frontera (Qf). El 44% del volumen hídrico extraído proviene de la región mientras el 56% proviene de la recarga a través de los límites hidrogeológicos de la región. De los 30.7 millones de metros cúbicos, 30.1 provenían del acuífero semi-permeable (98%) y sólo 0.6, (2%) del acuífero principal (acuífero granular profundo). En lo que respecta a los hundimientos, éstos fueron estimados en un promedio de 4cm en el año de 1959, mientras el nivel piezométrico desciende 15% al año. El coeficiente de almacenamiento aparente (Sa) del sistema acuífero semi-permeable fue de 26.7%, valor muy elevado para un acuífero confinado.

En el período 1959-67, la extracción anual de agua (Q) fue de 221.3 millones de metros cúbicos, de los cuales 161.1 (72.8%) fueron extraídos de la región y 60.2 (27.2%) de la frontera. De los 161.1 extraídos de la región, 158.3 provenían del acuífero semi-permeable y sólo 2.8 del acuífero granular profundo. El valor medio de hundimientos fue de 21 cm. durante este período y el abatimiento del nivel hídrico de 71cm, implicando por consiguiente un valor del coeficiente de almacenamiento aparente de 29.6%.

En el período 1967-1975, la extracción media (Q) fue de 293.4 millones de metros cúbicos, de los cuales 207.1 fueron extraídos de la región y el resto 86.3 provenían de la zona de recarga de la frontera. De los 207.1, el 98.9% (204.9 millones de m^3) del acuífero semi-permeable, mientras el 1.1% (2,2 millones de m^3) del acuífero granular profundo. El hundimiento medio fue de 27cm, mientras el abatimiento anual del nivel hídrico fue de 56 cm. Para el mismo período, el valor del coeficiente de almacenamiento aparente fue de 48%.

Las estimaciones previstas entre 1975 y 2000 prevén una extracción de 298 millones de m^3 . El aporte de la frontera será igual a 20.2%; en tal caso el coeficiente de almacenamiento pasará de 57.4% a 83.3%.

4.6 Recursos hídricos subterráneos de la Cuenca del Valle de México

El volumen hídrico infiltrado varía de una zona a otra con respecto a las características físicas e hidrogeológicas del medio acuífero y de los terrenos de cobertura, pero sobre todo de la cantidad de aporte meteórico que se presenta en las diversas zonas hidrogeológicas de la Cuenca. El coeficiente de



infiltración varía dentro de un intervalo bastante reducido (del 30 al 10% del aporte pluviométrico). (Tabla 4.2)

ZONA HIDROLÓGICA	No	ÁREA	VOLUMEN ANUAL LLOVIDO 1920-1970	VOLUMEN MEDIO ANUAL INFILTRADO
			Mill. de m ³	
Xochimilco	I	522	465.10	135.63
Churubusco	II	234	238.68	36.78
Cd. de México	III	725	632.20	64.37
Cuautitlán	IV	972	766.91	147.80
Pachuca	V	2067	1,085.24	194.45
Teotihuacan	VI	930	569.16	81.74
Texcoco	VII	1146	732.29	107.46
Chalco	VIII	1124	961.02	238.34
Apan	IX	637	440.80	71.99
Tochac	X	690	476.17	63.39
Tecocomulco	XI	533	346.98	71.05
Totales		9600	6,716.56	1,212.99

Tabla 4.2. Recursos de agua subterránea en la Cuenca separados por zonas hidrológicas.

Parte de dicho volumen infiltrado regresa a la superficie, en el área donde se presentan condiciones hidrogeológicas particulares, por la descarga externa del acuífero mediante manantiales. El número de manantiales censados, en toda la Cuenca del Valle de México, es de 274 con un caudal de cerca de 5371.1 l/s. las zonas hidrológicas más ricas en manantiales son la III, IV y VIII; pero la que abastece el mayor volumen hídrico es la I, donde solo los 10 manantiales producen una caudal de 2,331 l/s (Tabla 4.3).

Los recursos hídricos subterráneos económicamente aprovechables en toda la Cuenca (Tabla 4.4) se realizan a través de pozos o captación de manantiales que equivalen a $1'212,987 \times 10^6 m^3$, de los cuales $115,297 \times 10^3 m^3$ provienen de los manantiales.



ZONA	NUMERO DE MANANTIALES	GASTO		PRECIPITACIÓN MEDIA mm
		MEDIDO l/s	ACEPTADO l/s	
I	10	2684	2333	891
II	28	531	531	1020
III	91	611	489	872
IV	51	899	809	789
V	17	19	19	520
VI	8	382	382	612
VII	16	190	190	635
VIII	42	837	586	855
IX				692
X	3	11	9	693
XI	8	23	23	651
TOTAL	274	6193	5371	Prom. 700

Tabla 4.3. Manantiales por zonas hidrológicas en la Cuenca.

ZONA HIDROLÓGICA	No	ÁREA	EN MANANTIALES EXISTENTES	APROVECHABLES CON POZOS	SUMA
			mill de m ³		
Xochimilco	I	522	8.93	126.70	135.625
Churubusco	II	234	17.09	19.69	36.777
Cd. de México	III	725	24.25	40.17	64.367
Cuautitlán	IV	972	25.83	121.97	147.802
Pachuca	V	2067	0.60	193.85	194.446
Teotihuacan	VI	930	12.05	69.69	81.736
Texcoco	VII	1146	5.99	101.47	108.463
Chalco	VIII	1124	19.68	218.66	238.335
Apan	IX	637	0.00	71.99	71.994
Tochac	X	690	0.35	63.05	63.392
Tecocomulco	XI	533	0.52	70.53	71.05
Totales		9600	115.28	1,097.71	1212.987

Tabla 4.4. Recursos hídricos subterráneos económicamente aprovechables en la Cuenca separados por zonas hidrológicas

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



CAPITULO V

RIESGOS EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

5.1 Diagnóstico de Riesgos

Un requisito esencial para la puesta en práctica de acciones de prevención es contar con diagnósticos de riesgos, o sea, conocer las características de los eventos que pueden tener consecuencias desastrosas (tanto fenómenos naturales como los generados por el hombre) y determinar la forma en que estos eventos inciden en los asentamientos humanos, en la infraestructura y en el entorno. Base fundamental para estos diagnósticos es el conocimiento científico de los fenómenos; éste principalmente, materia de las ciencias geológicas e hidrológicas que estudian los mecanismos de generación de fenómenos como los sismos, los deslaves, las inundaciones etc.

El proceso de diagnóstico implica la determinación de los escenarios o eventos más desfavorables que pueden ocurrir. Los escenarios tienen que incluir el otro componente del riesgo, que consiste en los efectos que los distintos fenómenos tienen en asentamientos humanos y en infraestructuras vulnerables a eventos. Los estudios del riesgo son complejos, porque reflejan la interacción entre los fenómenos naturales y el entorno, y la de éstos con los sistemas físicos y sociales producidos por el hombre. Una peculiaridad de los estudios de riesgo es que lo que está expuesto al fenómeno que varía con el tiempo, tanto en cantidad como en sus características. Particularmente importantes son los efectos del crecimiento demográfico y de la industrialización, que modifican e incrementan el riesgo, por lo que los diagnósticos y mapas resultantes se pueden volver rápidamente obsoletos.

Desde el punto de vista del diagnóstico de riesgo, los agentes perturbadores representan una amenaza, de la cual hay que determinar el potencial, o peligro de que llegue a generar desastres cuando incide sobre ciertos sistemas afectables. Con relación a estos últimos, el potencial del desastre depende del tamaño del sistema expuesto al desastre (en términos de la cantidad de población o costo de la infraestructura o cualquier otro índice de valor de las posibles pérdidas).



5.2 Tipos de riesgo

Existen diversas clasificaciones de los riesgos de desastres. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) ha adoptado la clasificación basada en el tipo de agente perturbador que los produce. Se distinguen así los riesgos de origen geológico, hidrometeorológico, químico.

Existen casos que no quedan claramente ubicados en una de las categorías mencionadas, principalmente porque el riesgo puede ser originado por una concatenación de fenómenos.

5.2.1 Riesgos geológicos

Aquellos fenómenos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior de la Tierra o de la superficie de ésta son denominados fenómenos geológicos, los cuales, para nuestros fines, pueden clasificarse de la siguiente manera: Sismicidad, vulcanismo, y movimientos de laderas y suelos. Estos fenómenos han estado presentes a lo largo de toda la historia geológica del planeta y, por tanto, seguirán presentándose obedeciendo a patrones de ocurrencia similares. La sismicidad y el vulcanismo son consecuencia de la movilidad y de las altas temperaturas de los materiales en las capas intermedias de la Tierra, así como de la interacción de las placas tectónicas; se manifiestan en áreas o sectores bien definidos.

Los más peligrosos para nuestro país son los que se originan como consecuencia de sismos de gran magnitud cuyo epicentro se encuentra a pocos kilómetros de la costa, en el océano Pacífico.

Otros fenómenos geológicos son propios de la superficie terrestre y son debidos esencialmente a la acción del intemperismo y la fuerza de gravedad, teniendo a ésta como factor determinante para la movilización masiva, ya sea de manera lenta o repentina, de masas de roca o sedimentos con poca cohesión en pendientes pronunciadas. En ocasiones estos deslizamientos o colapsos también son provocados por sismos intensos. Muchas de las áreas habitadas por el hombre se localizan en valles aluviales, debido a la disponibilidad de campos planos y cultivables.



Con el paso del tiempo y el aumento de la población, las corrientes superficiales de agua se vuelven insuficientes para el riego agrícola y el consumo humano, por lo que se recurre a extraer, cada vez en mayor proporción, agua del subsuelo. Como consecuencia de esto, el terreno presenta gradualmente hundimientos y agrietamientos locales y regionales (hidrogeología).

Los riesgos naturales se producen de interacciones entre los diversos ambiente naturales (litosfera, hidrosfera, atmósfera, biosfera) y grupos sociales y económicos.

El conocimiento y evaluación de los riesgos geológicos mencionados (sísmicos, volcánicos, hidrogeológicos) representa un capítulo fundamental en el ámbito de este trabajo. Los altos costos sociales y económicos relacionados con catástrofes naturales han dado lugar a que sea necesario establecer una correcta evaluación de los riesgos potenciales, mediante el conocimiento del medio ambiente y del grado de vulnerabilidad del sistema natural

5.2.1.1 Sismicidad

Más del 80% de la Sismicidad mundial tiene lugar en el Cinturón Circumpacífico, franja que incluye las costas de Asia y América, principalmente.

El territorio nacional, asociado al cinturón Circumpacífico, se encuentra afectado por la movilidad de cuatro placas tectónicas: la de Norteamérica, Cocos, Rivera y del Pacífico. En la (Figura 5.1) se muestra la configuración de estas placas; las flechas indican las direcciones y velocidades promedio de desplazamiento relativo entre ellas.

La generación de los temblores más importantes en México se debe, básicamente, a dos tipos de movimiento entre placas. A lo largo de la porción costera de Jalisco hasta Chiapas, las placas de Rivera y Cocos penetran por debajo de la Norteamericana, ocasionando el fenómeno de subducción. Por otra parte, entre la placa del Pacífico y la Norteamericana se tiene un desplazamiento lateral cuya traza, a diferencia de la subducción, es visible en la superficie del terreno; esto se verifica en la parte norte de la península de Baja California y a lo largo del estado de California, en los Estados Unidos.

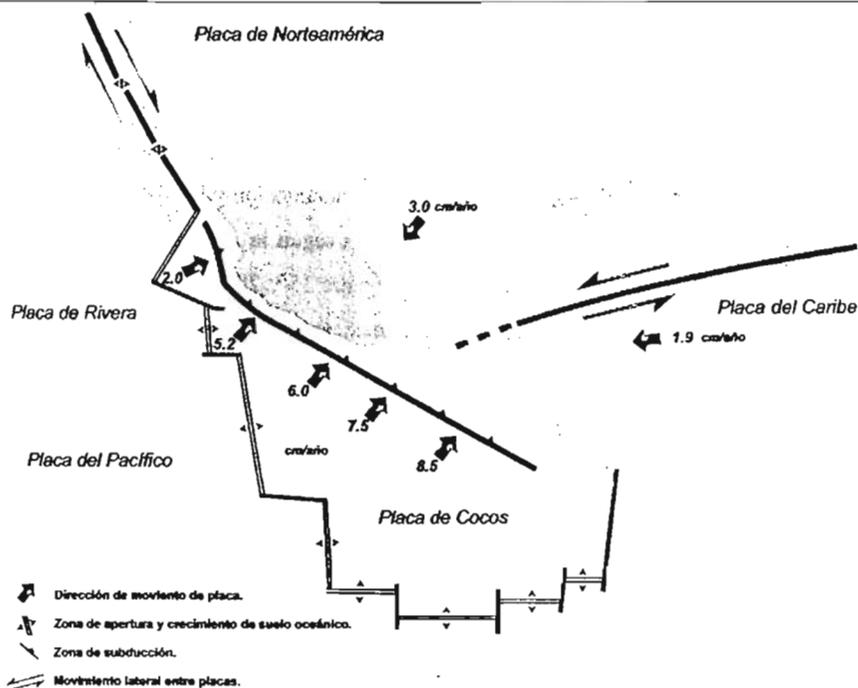


Fig. 5.1 Movimiento de placas tectónicas. Con excepción de la península de Baja California, el territorio nacional se encuentra contenido en la Placa Norteamericana. Con ésta interactúan las placas Pacífico, Rivera, Cocos y del Caribe. Se muestra para cada una de ellas, la dirección de desplazamiento así como sus velocidades relativas en cm/año. La gran mayoría de los sismos se produce en las fronteras de dichas placas, principalmente en la zona de subducción y a lo largo de la falla de San Andrés, entre las placas de Norteamérica y el Pacífico. Durante los sismos grandes ocurren los mayores desplazamientos entre placas, pudiendo ser éstos hasta de algunos metros.

Menos frecuentes que los sismos por contacto entre placas (interplaca), son los que se generan en la parte interna de ellas (intraplaca), lejos de sus bordes, aun en zonas donde se ha llegado a suponer un nivel nulo de sismicidad. La energía liberada por estos temblores así como las profundidades en las que se originan, son muy similares a los eventos interplaca.

Dewey y Suárez (1988), han evidenciado las principales zonas sismo-genéticas de la región centro meridional de México, subdividiéndolas en tres grupos:



- Zona sísmo-genética arriba de la placa en subducción: los mecanismos focales indican esfuerzos mayores, con orientación NE-SW (compresionales) y NW-SE (tensionales), que corresponden a terremotos superficiales.
- Zona sísmo-genética en la interfase de la placa en subducción y el continente. Los mecanismos focales indican esfuerzos compresivos, orientados según la pendiente del bloque hundido. La inclinación de la placa hundida se ha estimado entre 15 y 20°, alcanzando una profundidad de 70-80 km, debajo del Eje Neovolcánico Transmexicano.
- Zona sísmo-genética en el interior de la placa en subducción. Los mecanismos focales indican esfuerzos de tensión orientados paralelamente a la inclinación del bloque en subducción. Se trata de terremotos de media y alta profundidad (Fig. 5.2).



Fig. 5.2 Esquema de la distribución de los hipocentros de los terremotos.

TERREMOTOS DE MAGNITUD $M \geq 5$ (1964-1985)

- Hipocentros ≤ 60 km
- Hipocentros 60-150 km
- Falla transformante
- Zona de subducción

Este esquema de conocimientos permite enfocar la problemática del riesgo sísmico en el área de estudio: la notable densidad poblacional y la presencia de enormes sectores urbanos de la Ciudad de México, unida a la alta sismicidad de la región, evidenciada por los numerosos estudios, eleva el riesgo sísmico.



Relación entre la magnitud de los sismos y la energía liberada.

Para comparar el tamaño de los terremotos, Richter definió una escala de magnitud. La manera de medir el tamaño real de un sismo tiene que ver con la cantidad de energía liberada y es independiente de la localización de los instrumentos que lo registren.

La diferencia de un grado de magnitud entre dos sismos cualesquiera implica, en términos de energía liberada, una diferencia de 32 veces.

Un sismo de magnitud 8 equivale en términos de energía liberada a:

32 sismos de magnitud 7
1,000 sismos de magnitud 6
32,000 sismos de magnitud 5
1, 000,000 de sismos de magnitud 4

Por tanto, es fácil notar que un sismo de magnitud 4, como los que llegan a ocurrir varias veces por semana a lo largo de la costa occidental de México, no es la mitad de uno de magnitud 8, el que se presenta una vez cada varias décadas en dicha región.

Intensidades sísmicas.

La intensidad de un sismo en un lugar determinado, se evalúa mediante la escala Modificada de Mercalli (Tabla 5.1) y se asigna en función de los efectos causados en el hombre, en sus construcciones y en el terreno.

Para visualizar los daños y efectos a nivel regional, producidos por un sismo de magnitud importante, la elaboración de mapas de intensidades sísmicas resulta de gran utilidad. En ellos se presentan curvas, llamadas isosistas, que separan zonas con distintos grados de intensidad y que permiten comparar las áreas y niveles de afectación producto de un evento en particular.



Son notables los desastrosos efectos del sismo que golpeo a la Ciudad de México, el 19 de septiembre de 1985. Su magnitud fue de 8.1 (escala Richter), con epicentro localizado a 400 km. al SW de la Cd. de México, cerca de las costas del Pacífico. Este sismo cubrió una enorme área (800,000 km²) incluyendo la capital, con efectos desastrosos. En particular los efectos mas graves del sismo se dieron en un área de 32 km² del D.F., donde habitan 815,000 personas. Un tercio de los edificios sufrieron daños irreparables. También fueron dañados seriamente 49 hospitales y 600 escuelas y alrededor de 5,000 a 10,000 muertos, 33,000 heridos y 4, 400,000 personas permanecieron privadas de agua o podían utilizar sólo agua contaminada.

Los derrumbes involucraron edificios viejos, pero también edificios nuevos. En algunos había faltado el respeto de las normas antisísmicas; pero hubo también otros que, aunque bien construidos, se desmoronaron por un efecto de amplificación debido al mal comportamiento sísmico de los sedimentos lacustres aislados que se desarrollan extensamente en el área.

Las intensidades de este sismo se muestran en la (Figura 5.3). Puede observarse que, además de verse afectada una gran parte del país de manera significativa, en algunos sitios las intensidades fueron anómalamente grandes con relación a su entorno, como en el caso de la Ciudad de México y ciudad Guzmán, Jalisco.

Como resultado de la superposición de todos los mapas de intensidades de sismos mexicanos disponibles hasta ahora se obtuvo la (Figura 5.4). Ésta despliega las intensidades máximas de 49 sismos de gran magnitud, que ocurrieron entre 1845 y 1985 (Figuroa, 1986; Gutiérrez et al; 1991).

Aunque en este mapa global de intensidades máximas no están incluidos los efectos de todos los grandes sismos en ese periodo, la distribución de los temblores correspondientes se considera representativa de la sismicidad en México.

Tomando en cuenta el carácter recurrente de los sismos, al igual que el resto de los fenómenos geológicos, es posible estimar escenarios futuros y adecuar los criterios para la mitigación del riesgo.



- I. No es sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
- II. Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos delicadamente suspendidos pueden oscilar.
- III. Sentido muy claramente en interiores, especialmente en pisos altos de los edificios, aunque mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
- IV. Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, ventanas y puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
- V. Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
- VI. Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
- VII. Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras comunes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
- VIII. Daño leve en estructuras diseñadas especialmente para resistir sismos; considerable, en edificios comunes bien construidos, llegando hasta colapso parcial; grande, en estructuras de construcción pobre. Los muros de relleno se separan de la estructura. Caída de chimeneas, objetos apilados, postes, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Expulsión de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Cierta dificultad para conducir automóviles.
- IX. Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras bien diseñadas pierden la vertical; daño mayor en edificios sólidos, colapso parcial. Edificios desplazados de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
- X. Algunas estructuras bien construidas en madera, destruidas; la mayoría de estructuras de mampostería y marcos destruidas incluyendo sus cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
- XI. Pocas o ninguna obra de albañilería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
- XII. Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

Tabla 5.1. Escala de intensidad Mercalli-Modificada abreviada.

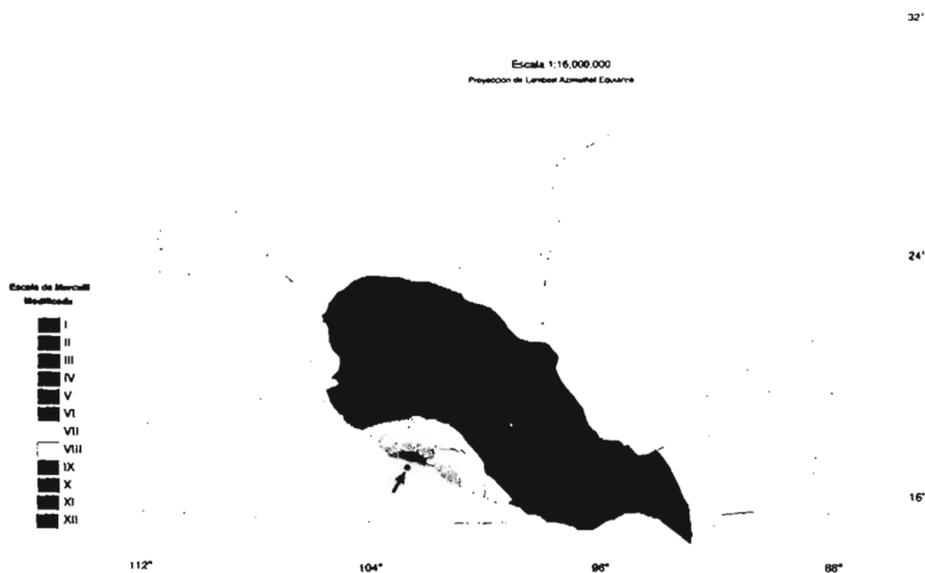


Fig. 5.3 Isosistas del 19 de septiembre de 1985. Los distintos grados de la Escala de Mercalli se representan en colores. El epicentro del sismo se indica con una flecha en la costa de Michoacán. A partir de la zona epicentral, los daños y efectos producidos por el sismo disminuyen con la distancia. Sin embargo, se observan zonas alejadas del epicentro (Cd. de México y Cd. Guzmán), donde los daños y efectos, debido a condiciones particulares del terreno, fueron similares a aquellos de la zona epicentral.

Regionalización sísmica.

Para conocer el grado de peligro sísmico que tiene una región determinada, se recurre a la regionalización sísmica que, en el caso de México, se encuentra definida en cuatro niveles (Fig. 5.5). Esta clasificación del territorio se emplea en los reglamentos de construcción para fijar los requisitos que deben seguir los constructores para diseñar las edificaciones y otras obras civiles de tal manera que éstas resulten suficientemente seguras ante los efectos producidos por un sismo.

Región del valle de México.

Se ha observado claramente que la distribución de los daños por sismo en áreas urbanas o semiurbanas, presentan fuertes variaciones en función del tipo de suelo. Los daños se acentúan en aquellas zonas con



sedimentos poco consolidados, normalmente con grandes espesores en cuencas aluviales, como es en gran parte la Cuenca del valle de México.



Fig. 5.4 Mapa general de intensidades

En la regionalización sísmica no se encuentran representadas aquellas áreas, generalmente valles aluviales, antiguas zonas lacustres etc; donde el movimiento sísmico será amplificado, produciendo intensidades mayores a las del entorno, como se mostró en el mapa de isosistas del 19 de septiembre, en la Cuenca del Valle de México específicamente en el área urbana así como en algunas zonas de Puebla.

Otros fenómenos que pueden provocar consecuencias severas debidas a los sismos son: la licuación, los movimientos de laderas y los desplazamientos permanentes del terreno por la presencia de fallas activas.

La licuación es la pérdida de carga de los suelos arenosos saturados de agua debido a la vibración producida por un sismo; los edificios sobre estos suelos pueden presentar grandes hundimientos y, en casos extremos, colapso por volteo.

Las laderas de cerros o terraplenes de suelos poco compactos y fuertes pendientes pueden sufrir deslizamientos y arrastrar las construcciones sobre ellas edificadas.

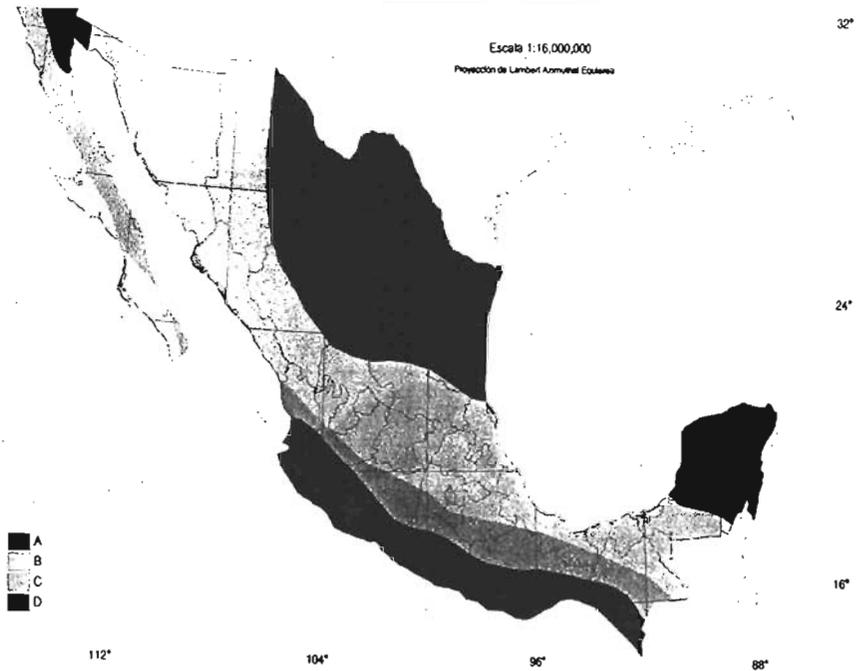


Fig. 5.5 Regionalización sísmica de México. Ésta cuenta con 4 zonas. La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% del valor de la gravedad (g). En la zona D han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones del terreno que se esperan pueden ser superiores al 70% de g. Las zonas B y C, intermedias a las dos anteriores, presentan sismicidad con menor frecuencia o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el 70% g.

Finalmente, en ocasiones se presentan fallas geológicas superficiales que, además de llegar a producir excitación sísmica en mayor o menor grado, dejan como consecuencia desplazamientos permanentes del terreno, en sentido horizontal y/o vertical, que llegan a producir graves daños a las construcciones ubicadas sobre la traza de la falla.

Por lo anterior, es necesario que para todo el valle de México, tanto en su zona urbana y suburbana o donde se hayan observado efectos de sitio, se realicen estudios que definan la distribución y características de los materiales superficiales, y en particular su respuesta dinámica, así como la presencia de laderas o alguna falla activa.



Con este tipo de información es posible realizar estudios de microzonificación y los correspondientes mapas detallados de la distribución de peligro sísmico a escala local.

Como ejemplo final, se muestra en la (Fig. 5.6) la distribución de los materiales aluviales y la zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Los daños por sismos se han concentrado en la zona del lago, por esa razón se ha colocado la mayor cantidad de acelerógrafos con fines de investigación.

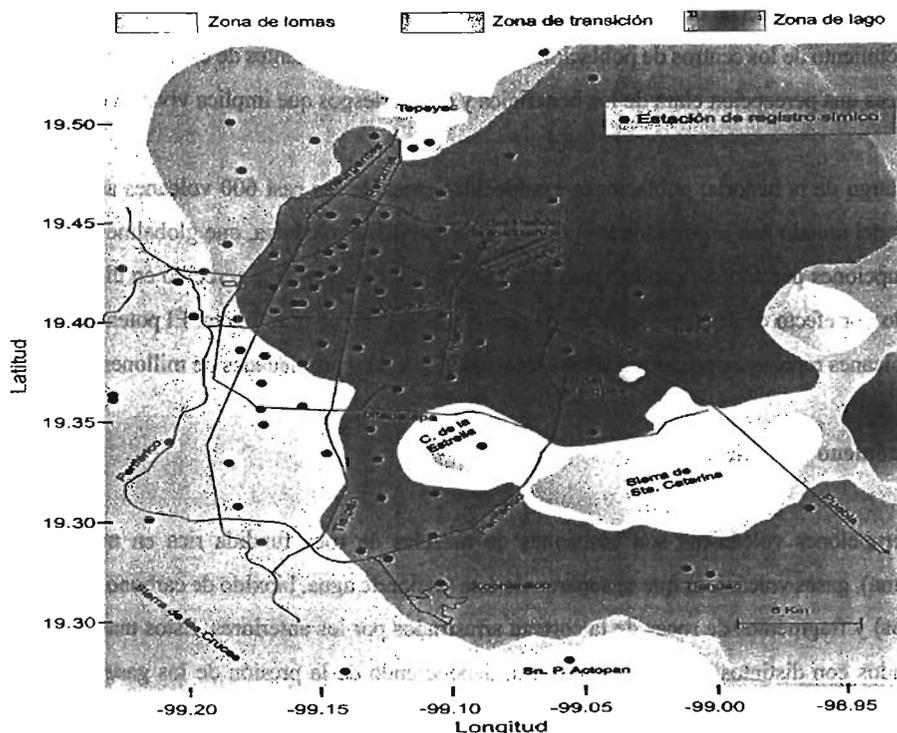


Fig. 5.6 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. El terreno del Valle de México se ha clasificado en tres tipos tomando en cuenta principalmente, su deformabilidad y resistencia.

Terreno firme o de lomas (Zona I). Se encuentra en las partes altas, con suelos poco compresibles y de alta resistencia.

Zona de lago (Zona III). Formada por depósitos lacustres, muy blandas. El contenido de agua en éstos depósitos varía entre 50 y 500%. Llega a tener grandes espesores, por ejemplo, de 60m en Texcoco o mayores de 100 m en Tláhuac.

Zona de transición (Zona II). El suelo tiene propiedades intermedias con respecto a los tipos anteriores, o tiene espesores de depósitos blandos que no exceden los 20 m.

Nótese que la zona del lago es aquella donde preferentemente se ha desarrollado la Cd. de México y los daños por grandes sismos han sido mayores. Por tal motivo, como se puede ver en la figura, la instrumentación sísmica en esa zona se ha intensificado en los últimos años.



5.2.1.2 Volcanes

Los volcanes activos se distribuyen por diferentes regiones del planeta. En particular, México, como hemos visto, es una de esas regiones y los volcanes son parte característica del paisaje de muchas regiones de nuestro país. La actividad volcánica puede tener efectos destructivos, pero también benéficos. Las tierras de origen volcánico son fértiles, por lo general altas, de buen clima, y ello explica el crecimiento de los centros de población en esos sitios. Los habitantes de estas regiones deben adquirir entonces una percepción clara de los beneficios y de los riesgos que implica vivir en esas zonas.

A lo largo de la historia, poblaciones establecidas cerca de los casi 600 volcanes activos en distintas partes del mundo han soportados los efectos de la actividad volcánica, que globalmente promedia unas 50 erupciones por año. Se estima que cerca de 270,000 personas han perecido en distintos lugares del mundo por efecto de desastres volcánicos desde el año 1700 de nuestra era. El potencial destructivo de los volcanes representa actualmente una amenaza a la vida y propiedades de millones de personas.

El fenómeno volcánico.

Las erupciones volcánicas son emisiones de mezclas de roca fundida rica en materiales volátiles (magma), gases volcánicos que se separan de éste (vapor de agua, bióxido de carbono, bióxido de azufre y otros) y fragmentos de rocas de la corteza arrastrados por los anteriores. Estos materiales pueden ser arrojados con distintos grados de violencia, dependiendo de la presión de los gases provenientes del magma o de agua subterránea sobrecalentada por el mismo.

Cuando la presión dentro del magma se libera a una tasa similar a la que se acumula, el magma puede salir a la superficie sin explotar. En este caso se tiene una erupción efusiva. La roca fundida emitida por un volcán en estas condiciones sale a la superficie con un contenido menor de gases y se llama lava.

Si el magma acumula más presión de la que se puede liberar, las burbujas crecen hasta tocarse y el magma se fragmenta violentamente, produciéndose una erupción explosiva.



Los volcanes se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico se llaman poligenéticos o volcanes centrales. Existe otro tipo de volcanes que nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener actividad. En lugar de ocurrir otra erupción en ese volcán, puede nacer otro volcán similar en la misma región. A este tipo de volcán se le denomina monogenético y es muy abundante en México. Los volcanes Xitle, Jorullo y Parícutín son de este tipo, y se encuentran en regiones donde abundan conos monogenéticos similares.

Los materiales emitidos durante una erupción pueden causar diferentes efectos sobre el entorno, dependiendo de la forma como se manifiestan. Las principales manifestaciones volcánicas son:

Flujos de lava.

La roca fundida emitida por una erupción efusiva puede avanzar con velocidades que dependen de la topografía del terreno y de su composición y temperatura, pero que por lo general son bajas. Esto permite a la gente ponerse a salvo y contar con tiempo suficiente para desalojar sus bienes. Sin embargo, los terrenos y las construcciones invadidas por lava son destruidos y no pueden volver a ser utilizados.

Flujos piroclásticos.

Durante las erupciones explosivas, pueden generarse avalanchas formadas por mezclas de fragmentos o bloques grandes de lava, ceniza volcánica (magma finamente fragmentada), y gases muy calientes, que se deslizan cuesta abajo por los flancos del volcán a grandes velocidades y pueden llegar a ser muy destructivas y peligrosas. Estas avalanchas reciben varios nombres: flujos piroclásticos, nubes ardientes o flujos de ceniza volcánica. (Fig. 5.7)

Flujos de lodo (lahares)

La mezcla de bloques, ceniza y cualquier otro escombros con agua puede producir avenidas muy potentes de lodo y escombros, que tienen un poder destructivo similar a los flujos piroclásticos y por lo general mayor alcance. El agua que forma la mezcla puede tener varios orígenes, tales como lluvia intensa,



fusión de nieve o glaciares, o lagunas. Estas avenidas se mueven con rapidez, siguiendo las barrancas que forman el drenaje del volcán y pueden ocurrir durante o después de las erupciones.

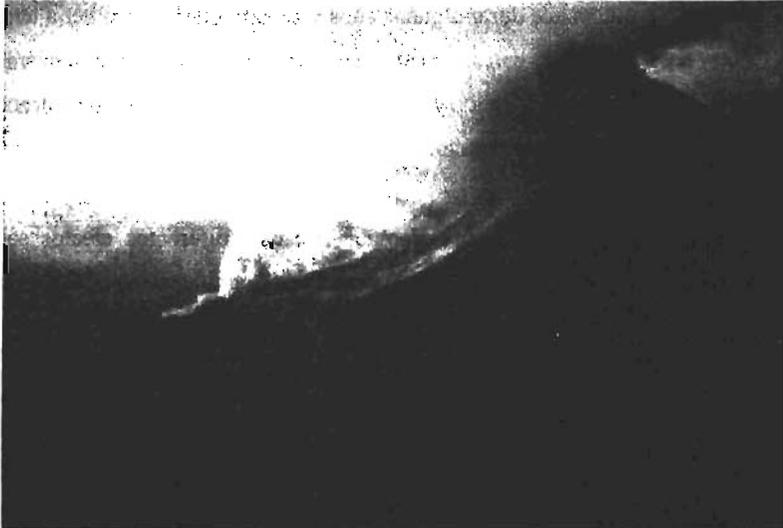


Fig. 5.7 Flujo piroclástico de magnitud moderada producido por el derrumbe de bloques de lava en el volcán de Colima en 1998.

Lluvias de fragmentos.

Las erupciones explosivas lanzan al aire grandes cantidades de gases calientes y fragmentos de todos tamaños. Los gases calientes pueden arrastrar las partículas hasta grandes alturas. Los fragmentos más grandes caen cerca del volcán y los fragmentos más finos pueden ser arrastrados por el viento a grandes distancias, produciendo lluvias de ceniza sobre grandes extensiones. Cuando la ceniza depositada se humedece o se compacta, su peso puede producir hundimientos de los techos, caída de hojas, ramas así como el taponamiento del sistema de drenaje.

Riesgos volcánicos en México.

México, como muchas otras naciones de América Latina, es un país rico en volcanes. La tasa de erupción promedio en México durante los últimos 500 años ha sido de unas 15 erupciones de diversos tamaños por siglo.



Para evaluar el riesgo volcánico en el área, es necesario efectuar un estudio histórico de las manifestaciones eruptivas de los grandes volcanes, caracterizados por su notable actividad explosiva y manifestaciones a lo largo del tiempo (Fig. 5.8).

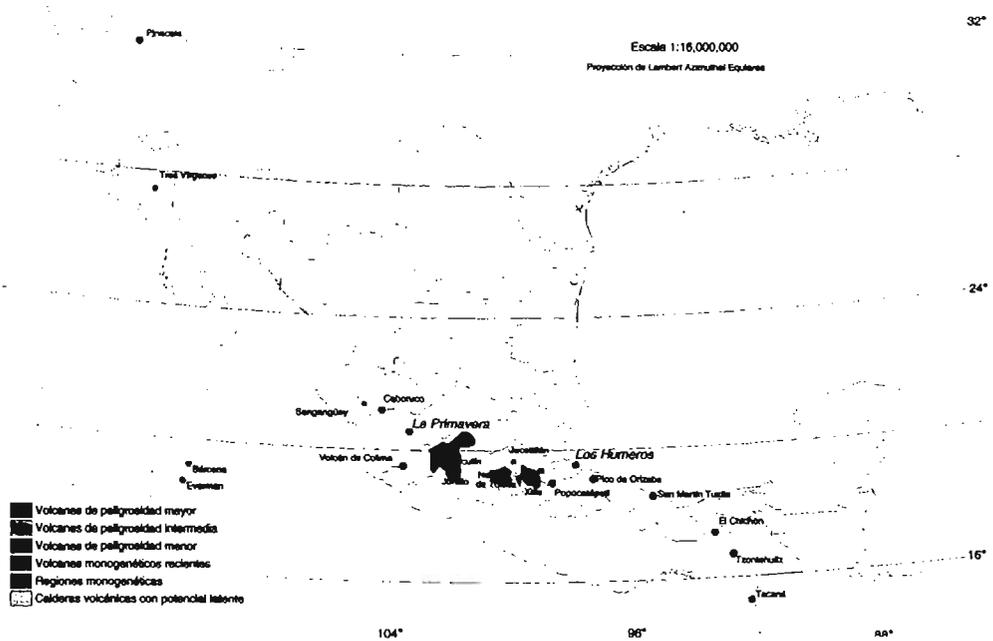


Fig. 5.8 Vulcanismo activo, calderas y regiones monogenéticas. Volcanes de México que han tenido erupciones en tiempos históricos. Nótese que algunos de los volcanes señalados (Xitle, Jorullo y Parícutín) son monogenéticos. También se incluyen algunas de las calderas volcánicas más importantes, aunque no hayan mostrado actividad reciente.

El peligro o riesgo volcánico puede representarse de varias formas. La más utilizada es en forma de un mapa, donde se muestren los alcances más probables de las diferentes manifestaciones volcánicas. Para su elaboración, primero se identifican, con base en la información geológica disponible obtenida del estudio de los depósitos de materiales arrojados en erupciones previas (que es un indicador de lo que el volcán en estudio ha sido capaz en el pasado), las regiones que han sido afectadas por erupciones previas.



La información anterior, conjuntamente con los datos topográficos que permiten prever las trayectorias de algunos de los productos volcánicos, se integra en un mapa de riesgos o amenazas volcánicas, que debe incluir también las bases para delimitar las zonas de riesgo. Los mapas de riesgo o amenaza deben distinguir entre los riesgos primarios, como los flujos piroclásticos, o las lluvias de fragmentos, describiendo sus velocidades, alcances sobre el hombre y el medio, y los riesgos secundarios posibles, incluyendo todos aquellos efectos que pueden presentarse después de la erupción, como flujos de lodo o impactos sobre el medio.

Fecha (D/M/A)	Tipo de erupción y efectos
Entre 3200 y 2800 a.C.	Erupciones plinianas con intensos flujos piroclásticos, algunos derrames de lava y generación de grandes lahares.
Entre 800-200 a.C.	Erupción pliniana similar.
Entre 700-1100 d.C.	Erupción pliniana, similar a las anteriores.
1347	Erupción poco documentada.
1354 y 1363	Episodios de actividad eruptiva moderada.
1509, 1512	Emisión de fumarolas.
1518-1528 y 1530	Episodios de actividad eruptiva moderada, con fumarolas, explosiones y esporádicas emisiones de rocas incandescentes.
1539-1540	Erupciones moderadas, similares a las anteriores.
1548	Erupción moderada, con algunas explosiones y emisión de material incandescente.
1571-1592	Actividad persistente. Emisiones de gases y cenizas.
20/10/1697	Explosión moderada.
1720	Actividad moderada.
19/02/1919-1927	Episodio de actividad eruptiva consistente de la emisión y destrucción de domos de lava en el interior del cráter. A lo largo de varios años se manifestaron explosiones, emisiones de ceniza y materiales incandescentes y fumarolas. Hubo una víctima y dos heridos entre miembros de una expedición al borde del cráter, al ocurrir una explosión el 25/03/1921.
1989	Se instala la primera estación de monitoreo sísmico del volcán.
1993-1994	Aumento en la actividad microsísmica y fumarólica.
21/12/1994	A las 01:31 del 21/12/1994, ocurre una fuerte explosión seguida por una emisión creciente de gases y ceniza. En esa ocasión, se evacuaron unas 20,800 personas en poblaciones del Estado de Puebla al pie del volcán. Las emisiones de ceniza o exhalaciones continuaron en 1995 y 1996. En marzo de 1996, ocurre otro episodio de emisión intensa de gases y cenizas. A finales de marzo, se detecta un domo creciente de lava en el interior del cráter. Las explosiones subsiguientes se hacen más intensas y lanzan fragmentos incandescentes alrededor del cráter. El 30/04/1996, una explosión causa la muerte de 5 alpinistas cerca del labio inferior del cráter y lluvias de ceniza y arena en poblaciones cercanas. En 1997, continúa el crecimiento del domo de lava y la actividad de exhalaciones y explosiones. La de mayor intensidad, el 30 de junio de 1997, produce una columna eruptiva de 8 km sobre la cima y una leve lluvia de ceniza en la Ciudad de México. Otras explosiones en 1997, 1998 y 1999 lanzaron cantidades importantes de fragmentos incandescentes y causaron incendios en la vegetación de las faldas del volcán, provocando la destrucción parcial del domo.

Tabla 5.2 Volcán Popocatepetl. Estratovolcán Abocessitico-dacitico Localización: 19.02° N, 98.62° O (México, Puebla y Morelos). Altura: 5,454 msnm



Riesgo volcánico en la Cuenca del Valle de México.

El concepto de riesgo volcánico involucra al peligro volcánico tal como se ha descrito en páginas anteriores, más la distribución y vulnerabilidad de la población en este caso de la Cuenca del Valle de México así como de su infraestructura y comunicaciones. Actualmente el único volcán activo que puede afectar a una cierta área de la cuenca de México es el volcán Popocatepetl, en la (Tabla 5.2) y en la (Fig. 5.9) se muestra la actividad que ha tenido este volcán así como una versión de un mapa de peligros para el volcán Popocatepetl, respectivamente, que sirve de base para la planeación de emergencias en la eventualidad de una erupción mayor.

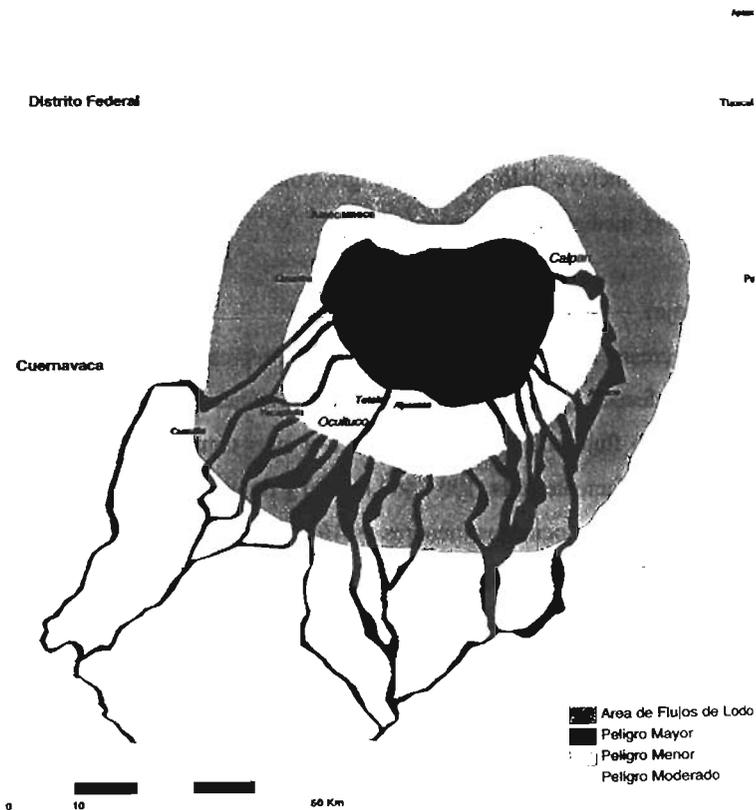


Fig. 5.9 Mapa de zona de peligros del volcán Popocatepetl



Este mapa fue diseñado para ser usado en foros académicos así como por las autoridades de Protección Civil y la población en general como un medio de información en la eventualidad de una erupción del Volcán Popocatepetl.

Está basado en la información geológica disponible hasta enero de 1995. Una nueva edición será preparada cuando se disponga de suficiente información geológica adicional. Fue elaborado considerando la extensión máxima de los depósitos originados por erupciones volcánicas pasadas que se clasificaron en tres diferentes magnitudes. Los límites entre tres áreas indicadas en el mapa fueron trazados con base en el alcance máximo de los productos originados por estas erupciones y en las distancias máximas de los flujos modelados por computadora. Además, al borde de cada área fue incrementado en varios kilómetros como margen de seguridad.

Interpretación

El mapa principal muestra tres diferentes áreas: 1, 2 y 3, de acuerdo con su peligrosidad. Las tonalidades de dichas áreas tienen como propósito mostrar que el mayor riesgo existe hacia la cima del volcán. Cada zona incluye todo tipo de peligro volcánico asociado respectivamente a erupciones volcánicas grandes, medianas y pequeñas.

Zona 1 (color roja)

Siendo la más cercana a la cima del volcán, es la que representa un mayor peligro porque es la más frecuentemente afectada por erupciones, independientemente de su magnitud. Esta área encierra peligros tales como flujos de material volcánico a altas temperaturas que descienden del volcán a velocidades extremadamente altas (100 - 400 km/hr) y flujos de lodo y rocas que se muevan siguiendo los cauces existentes a velocidades menores (< 100 km/hr). En esta área han ocurrido dos eventos o erupciones importantes cada 1,000 años en promedio.

Zona 2 (color amarillo)

Representa un peligro menor que el área 1 debido a que es afectada por erupciones con menor frecuencia. Sin embargo las erupciones que se han alcanzado a esta área producen un grado de peligro similar al del área 1. La frecuencia con que ocurren eventos volcánicos que afectan a esta área es de 10 veces cada 15,000 años en promedio.



Zona 3 (color naranja)

Abarca una zona que ha sido afectada en el pasado por erupciones extraordinariamente grandes. Erupciones de tal magnitud son relativamente raras por lo que el peligro dentro de estas áreas es menor en relación con el de las áreas 1 y 2, más cercanas al volcán. Los tipos de peligros en el área 3 son esencialmente los mismos que los de las otras áreas.

Las regiones marcadas área 4 (en café) están expuestas al peligro por flujos de lodo e inundaciones derivadas de un posible arrastre de depósitos volcánicos por agua proveniente de lluvias torrenciales o de una fusión catastrófica del glaciar del Popocatepetl.

Zona de peligro por caída de materiales volcánicos

Zona 1

Podría ser afectada por la caída de cantidades importantes de arena volcánica y pómez cuyas acumulaciones alcanzarían varios centímetros, en el caso de erupciones pequeñas, y hasta varios metros con bloques de hasta 30 cm, en erupciones muy grandes.

Zona 2

Podría ser afectada por la caída moderada de arena volcánica y pómez cuyo espesor puede variar desde 1 mm o menos (ligera cobertura de polvo fino) en erupciones pequeñas hasta un metro en erupciones muy grandes.

Zona 3

Sería menos afectada por la caída de arena volcánica y pómez. No habría caída durante erupciones pequeñas aunque pueden acumularse decenas de centímetros durante erupciones muy grandes. Los vientos sobre el Popocatepetl generalmente soplan en dirección este-oeste. La dirección dominante de los vientos de octubre a abril es hacia el oriente, mientras que de mayo a septiembre es hacia el poniente

De esta manera es mayor la probabilidad que se acumule más arena volcánica y pómez en una región comprendida entre las dos líneas verdes del mapa.



Existe la remota posibilidad de que una parte del Popocatepetl se desplome causando un gran derrumbe. Este se desplazaría a gran velocidad (alrededor de 100 km/hr) hasta una distancia máxima de aproximadamente 80 kilómetros destruyendo todo a su paso. Durante los últimos 40,000 años se produjeron 2 grandes derrumbes hacia el sur del volcán cubriendo áreas extensas. Si ocurriera otro evento de este tipo, probablemente se dirigiría también hacia el sur. Generalmente grandes deformaciones susceptibles de ser observadas preceden a estos colapsos.

Una erupción grande o un derrumbe gigante estaría acompañado de flujos de lodo e inundaciones de gran alcance. Estos viajarían distancias del orden de decenas de kilómetros por las barrancas que descienden del Popocatepetl, esto pasaría hacia las zonas color café del mapa, es decir hacia la zona de flujos de lodo.

Gestión del riesgo.

La gestión del riesgo comprende dos fases principales:

- a) la fase pre-crítica o pre-evento de preparación, que incluye:
 - evaluación del peligro y del riesgo, reducción de la vulnerabilidad y postulación de escenarios probables.
 - Monitoreo volcánico.
 - Desarrollo de planes operativos para el caso de emergencia.
- b) la fase crítica y la aplicación de las medidas operativas, que comprende:
 - procedimientos de información, comunicación y alerta.
 - Respuesta: aplicación de medidas de emergencia.
 - Definición del fin de la fase crítica.

En caso de iniciarse una actividad eruptiva, entraría la fase crítica de la gestión del riesgo, que involucra la aplicación de los planes operativos. Parte fundamental de esta fase es la relacionada con los mecanismos de comunicación y alerta. En México se ha desarrollado un instrumento de comunicación y alertamiento genéricamente conocido como el Semáforo de Alerta Volcánica para el Popocatepetl la (Tabla 5.3) muestra los elementos de éste instrumento de comunicación, que permite definir el nivel de actividad del volcán, de acuerdo con el consenso del Comité Científico Asesor, en seis niveles,



comunicarlo a las autoridades de protección Civil para que éstas realicen acciones recomendadas, y a su vez lo comuniquen a la población para que esta defina su nivel de alertamiento en tres niveles, correspondientes a los colores del semáforo.

Niveles de alerta Nomenclatura para comunicación entre SINAPROC y CCA'.	Acciones recomendadas al SINAPROC dentro del plan operativo vigente.	Niveles de alerta para la población Acciones recomendadas generales.
NIVEL VERDE	<p align="center">FASE 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Desarrollar planes de preparación, Educación a la población, Implementación de dispositivos de monitoreo. <p align="center">FASE 2</p> <ul style="list-style-type: none"> Aumento en los niveles de monitoreo, Reuniones esporádicas o periódicas del CCA, Nivel aumentado de comunicación entre b y c, Revisión de planes operativos de emergencia, Mayor información a la para mantenerse alertos niveles de concientización. 	<p align="center">NORMALIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> Mantenerse informado. Memorizar la señalización de: <ul style="list-style-type: none"> • rutas de evacuación. • sitios de reunión. • albergues. Asistir a cursos de capacitación. Participar en ejercicios y simulacros. Promover la reubicación de instalaciones en áreas de alto riesgo.
	NIVEL AMARILLO	<p align="center">FASE 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Reuniones más frecuentes del CCA, consultas más frecuentes entre SINAPROC y CCA. Verificación de la disponibilidad de personal y de equipos de evacuación. Verificación de la disponibilidad de vehículos para evacuación. Limitación del acceso al volcán según criterio del CCA. <p align="center">FASE 2</p> <ul style="list-style-type: none"> Anuncio sobre el cambio a las autoridades de protección civil en los tres niveles de gobierno. Establecimiento de personal de guardia en el nivel correspondiente de PC. Limitación del acceso al volcán en un radio mayor, de acuerdo con el criterio del CCA. Aviso a los sistemas de navegación aérea.
NIVEL ROJO		<p align="center">FASE 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Anuncio público de la situación y de las medidas tomadas. Preparación de personal, de equipos de evacuación y de albergues. Implementación de medidas específicas en las regiones más vulnerables. Puesta en marcha de medidas preventivas contra caídas de ceniza y fragmentos en la región 1 y contra lahares a lo largo de las trayectorias de flujos más probables. Alertamiento a los sistemas de navegación aérea. Limitación de acceso al volcán sobre una extensión mayor.
	<ul style="list-style-type: none"> Evacuación selectiva de poblaciones en los sectores 1 y 4, según criterios recomendados por el CCA, de acuerdo con el desarrollo e intensidad de la actividad. Alertar la autoevacuación. Puesta en marcha de medidas preventivas contra caídas de ceniza y fragmentos en las regiones 1 y 2, y a lo largo de las posibles trayectorias de flujos (región 4). Preparación de medidas preventivas contra lluvias de moderadas a intermedias de ceniza y oscurecimiento en zonas metropolitanas circundantes. Activación de planes preventivos de protección a las comunicaciones y al abasto de agua y energía. Alertamiento a los sistemas de navegación aérea a nivel continental. Evacuación selectiva de sectores más amplios según criterios recomendados por el CCA de acuerdo con el desarrollo e intensidad de la actividad. Puesta en marcha de medidas preventivas contra caídas de ceniza y fragmentos en las regiones 1, 2 y 3 y áreas circundantes, y contra lahares a lo largo de las posibles trayectorias de flujos hasta las distancias recomendadas por el CCA. Activación de medidas preventivas contra oscurecimiento y lluvias de ceniza y gravilla en zonas metropolitanas circundantes. Activación de planes preventivos de protección a las comunicaciones y al abasto de 	

Tabla 5.3 Definición de los niveles de Riesgo del Semáforo de Alerta Volcánica del Popocatepetl. SINAPROC = Sistema Nac. De Protección Civil; CCA = Comité Científico Asesor; a = Población vulnerable; b = autoridades responsables



Si así lo requiriera la condición de riesgo comunicada por medio del Semáforo de Alerta Volcánica, se tomarían las medidas correspondientes en los diferentes planes operativos de respuesta. Estos planes han sido desarrollados por los sistemas de Protección Civil de Puebla, Morelos, Estado de México, Tlaxcala y el Distrito Federal.

5.2.1.3 Hidrogeológicos.

Propiedades del agua.

La calidad química del agua subterránea y los procesos de contaminación tienen una incidencia significativa en muchos problemas relacionados con los riesgos geológicos. Unas veces son los diversos procesos físico-químicos que se desarrollan entre el agua subterránea y su medio soporte, tanto si este medio es natural (formaciones geológicas) como si es constructivo (rellenos compactados, cimentaciones, etc.) en otras ocasiones la hidrogeología debe analizar problemas de contaminación acuífera ligados a estudios de medio ambiente o a obras de instalaciones de vertidos potencialmente contaminantes.

En los párrafos siguientes se pretende, sintetizar los procesos ligados a la calidad y contaminación de las aguas subterráneas, sus fenómenos que la modifican, la influencia de las actividades antrópicas y los mecanismos de introducción y propagación de contaminantes.

Calidad química de las aguas subterráneas.

La calidad química natural de las aguas subterráneas está condicionada por su origen y por los procesos físico-químicos naturales que se desarrollan en sus diversos recorridos. Generalmente el origen del agua subterránea es la infiltración del agua de lluvia, y ésta contiene gases y algunos iones que se encuentran disueltos en la atmósfera. Según se inicia la infiltración del agua ésta empieza a mineralizarse. Existe una estrecha relación entre la litología de un acuífero y la mineralización de las aguas subterráneas. En el caso de los acuíferos constituidos por rocas sedimentarias la mineralización de las aguas depende de diversos factores. (Tabla 5.4)



Los principales constituyentes del agua subterránea son:

- Mayoritarios: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , CO_2 , O_2 y SiO_2
- Minoritarios: NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^- , F^- , S^{2-} , Br^- , I^- , NH_4^+ , Fe^{++} , Mn^{++} y Zn^{++}

Factores de mineralización del agua en acuíferos de rocas sedimentarias

Factores litológicos	Factores del agua	Factores del sistema roca/agua	Factores externos
<ul style="list-style-type: none"> — Superficie de contacto roca/agua. — Granulometría. — Fases sólidas solubles. — Agua intersticial y ocluida. 	<ul style="list-style-type: none"> — pH. — eH. — Déficit de saturación. — Presión de vapor de gases disueltos. 	<ul style="list-style-type: none"> — Permeabilidad. — Longitud del recorrido y tiempo de contacto. — Régimen de circulación. — Cambio iónico, difusión y adsorción. 	<ul style="list-style-type: none"> — Temperatura. — Presión. — Actividad biológica.

Tabla 5.4 Factores de mineralización del agua en acuíferos de rocas sedimentarias

A veces puede existir materia orgánica debido al arrastre de sustancias orgánicas en el agua de infiltración.

La calidad natural del agua es, en general, muy variada; así se encuentran en algunos acuíferos aguas muy puras, con contenidos iónicos muy bajos del orden de 3 meq/l, y otras en las que la disolución de sales ha sido muy importante y alcanzan contenidos iónicos de 20 a 30 meq/l.

En términos generales las aguas subterráneas están mejor protegidas frente a la posible contaminación que las aguas superficiales, pero una vez que se ha incorporado algún contaminante al flujo subterráneo es muy difícil y costoso detectar su presencia y, por lo tanto, poner en marcha medidas para detenerlo antes de que afecte a pozos y sondeos de explotación. Para llevar a cabo una planificación y control es preciso conocer los recorridos de los contaminantes en base a los condicionantes geológicos, hidrogeológicos y químicos.

Las aguas subterráneas se mueven desde una zona de recarga, por lo que se produce la infiltración del agua de lluvia, hasta una zona de descarga, por la que salen del acuífero. Los procesos de transporte del



contaminante difieren de la zona no saturada a la zona saturada. En ambos casos depende del movimiento del agua. En zona no saturada el movimiento del agua, y por tanto el contaminante, es vertical hacia la superficie freática, mientras que en la zona saturada el movimiento del agua es preferentemente horizontal, o en cualquier caso está condicionado por los gradientes piezométricos en el acuífero.

Una vez que el contaminante ha alcanzado el flujo subterráneo se mueve en el mismo sentido y a la misma velocidad que éste, produciéndose mecanismos de dispersión y dilución.

Cuando el contaminante alcanza el suelo comienza el mecanismo de infiltración y se producen una serie de cambios físicos y químicos. Estos cambios están íntimamente ligados con la litología del terreno, el espesor de la zona no saturada y el tiempo de permanencia en el acuífero. Entre estos cambios cabe mencionar los fenómenos de superficie, la precipitación-disolución y la oxidación-reducción. La lentitud con que se mueve el agua subterránea hace que la contaminación de acuíferos también sea lenta, pero además, dependiendo de las condiciones del medio y de los contaminantes, se producen unos procesos que inciden en la lentitud e incluso atenuación del contaminante. Los procesos más frecuentes se describen a continuación.

-Procesos físicos.

- Filtración mecánica: se ejerce sobre las partículas en suspensión tales como arenas, limos, arcillas, microorganismos, etc; la filtración es más efectiva cuanto menor es el tamaño medio de los poros y más uniforme su distribución.

-Procesos Químicos

- Fenómenos de superficie: los más importantes son los cambios iónicos y la adsorción molecular, que dependen de la naturaleza coloidal, arcillas inorgánicas y sustancias orgánicas como el humus. La adsorción molecular es el principal mecanismo para retener del agua compuestos orgánicos sintéticos, metales pesados, cationes como el amonio y el potasio, etc. Otros fenómenos de superficie pueden establecer, con relación a la volatilidad de algunas sustancias, grado de acidez, metales pesados, materia orgánica, etc.



- Intercambio iónico: consiste en la precipitación de óxidos de hierro y manganeso junto con la formación continuada de lodos bacterianos alrededor de la superficie de gravas y grietas. Generalmente se produce en la zona de tránsito de un medio reductor a un medio oxidante. Este proceso permite mantener la capacidad sorbente (de retención) del terreno, pero implica una disminución de la permeabilidad del mismo.
- Precipitación-disolución: directamente relacionado con el grado de saturación y las constantes de equilibrio. La precipitación afecta principalmente al Fe^{++} y Mn^{++} originado en procesos aeróbicos y que posteriormente se halla disuelto en el agua. Se produce debido a la oxidación a pH entre 6 y 8 de los iones anteriormente mencionados. La precipitación de estos compuestos arrastra por coprecipitación muchos iones metálicos como el Cu, Pb, Zn, As, W, V y F^- . El calcio, el magnesio, el bicarbonato y los sulfatos pueden sufrir este proceso.
- Oxidación-reducción: se produce principalmente durante el proceso de infiltración en el medio no saturado y juegan un papel muy importante las bacterias y otros microorganismos existentes en el terreno. Este mecanismo es importante en la atenuación de la contaminación por productos orgánicos y nitrogenados, que al oxidarse producen CO_2 y NO_3^- . Estos dan lugar a un tipo de contaminación que generalmente se detecta por el mal olor y presencia de color.
- Adsorción-desorción: los elementos adsorbidos pueden volver a solución cuando se ponen en contacto con aguas de menor concentración en estos elementos.
- Capacidad de retención del suelo: es la propiedad que tiene éste para disminuir, de forma temporal o permanente, la velocidad de circulación de contaminantes. El terreno tiene una determinada capacidad de retención frente a unas condiciones y por tanto, si los compuestos retenidos no se descomponen por otras acciones, a partir de la capacidad máxima de retención se paraliza este proceso. La retención implica un mayor tiempo de permanencia y ello permite que se puedan producir otros procesos.



Contaminación y contaminantes de las aguas subterráneas.

La contaminación del agua subterránea es el deterioro de su calidad natural debido a actividades o acciones antrópicas que la inutilizan para el uso a que se destinaba o podría destinarse. Estas actividades dan nombre al tipo de contaminación; así, se habla de contaminación urbana, agrícola, ganadera, industrial, por sobrebombeo, etc.

Por otro lado, se habla de contaminación puntual o extensiva en función del área afectada, siendo generalmente de origen urbano, industrial y ganadero en el primer caso y agrícola en el segundo.

La contaminación de las aguas subterráneas se produce cuando los productos residuales de las diferentes actividades alcanzan un acuífero, provocando la presencia o el aumento de determinadas sustancias características de cada una de éstas actividades. Estas sustancias se ponen de manifiesto la existencia de contaminación bien por su presencia, concentración o la combinación de ambas, se denominan índices de contaminación.

Los contaminantes de las aguas subterráneas son muy variados y de muy diversos orígenes, en general son todas aquellas sustancias que por diversas acciones se incorporan al flujo subterráneo provocando un deterioro en el agua para el uso a que estaba destinado.

Los contaminantes químicos incluyen una variada gama de iones y sustancias químicas tales como los iones normales presentes en las aguas pero en cantidades superiores a las debidas a su origen natural, y compuestos que no tienen un origen natural en las aguas. Además hay que mencionar iones amonio y nitrito, que proceden de la oxidación de la materia orgánica.

Los contaminantes biológicos incluyen fundamentalmente las bacterias y los virus, pero generalmente sus efectos disminuyen debido al poder depurador del suelo y el subsuelo. Los contaminantes radioactivos no son frecuentes debido al alto control que existe sobre de ellos.



Actividades Antropogénicas.

Las actividades y acciones antrópicas que pueden deteriorar el medio hídrico son las urbanas, agrícolas, ganaderas o industriales. Dicho deterioro depende de las características de los residuos, del lugar, forma, intensidad, y de las peculiaridades del medio receptor.

Actividades urbanas.

Se entiende como actividad urbana toda aquella que resulta como consecuencia de un asentamiento poblacional. El número de actividades urbanas es muy variado en función del tipo de población

A grandes rasgos, se producen dos tipos de residuos: los líquidos urbanos o aguas residuales y los sólidos urbanos o basura.

Los residuos líquidos urbanos o aguas residuales son los retornos del agua de consumos en actividades urbanas, y generalmente incluyen aguas residuales domésticas, aguas de limpieza vial y aguas residuales de industrias. La composición de estos residuos se caracteriza por la presencia de sales disueltas, materia orgánica, causante del color, olor y sólidos en suspensión, y microorganismos. Además hay que tener en cuenta la posible presencia de metales pesados o sustancias procedentes de industrias conectadas a la red de alcantarillado.

Los residuos sólidos urbanos están formados generalmente por basuras domésticas, residuos de limpieza. Estos residuos pueden ser incinerados, reciclados para fabricación de otros productos. Aunque también los que no se pueden colocar en alguno de los dos casos anteriores, se forma un líquido residual llamado lixiviado debido a la compactación propia de los residuos y a la precipitación. Un agua subterránea que sufre una contaminación debida a un vertedero de residuos sólidos urbanos reflejará el aumento de la mineralización y temperatura con presencia de color y olor desagradable, más adelante en el siguiente capítulo se ahondará en este tipo de residuos y se explicará mas a detalle la formación de estos lixiviados.



Actividades industriales.

Son todas aquellas acciones encaminadas a la producción y a la fabricación de materias primas o productos utilizados por el hombre, ya sea para su bienestar propio o para el desarrollo de actividades.

La industria puede producir residuos sólidos y líquidos, siendo éstos últimos mucho más frecuentes. A veces los humos son vertidos a la atmósfera y constituyen un riesgo de segundo orden para el medio hídrico.

Las sustancias que aportan son tanto inorgánicas como orgánicas. Entre las primeras se deben citar los metales pesados, peligrosos por su toxicidad, altas concentraciones en sólidos disueltos y ácidos que proporcionan acidez y causticidad.

Las sustancias orgánicas presentes en residuos industriales son muy variadas. Cabe citar los derivados del petróleo y carbón, sustancias orgánicas sintéticas tales como fenoles, detergentes, yesos, aceites etc. Los residuos sólidos se vierten junto con los residuos sólidos urbanos tras ser acumulados sobre el terreno en las inmediaciones de las fábricas. A veces, dependiendo del tipo de residuo, se vierten en vertederos controlados de residuos tóxicos y peligrosos.

Acciones sobre el agua.

El hombre ejerce dos tipos de acciones sobre el agua que de una manera involuntaria pueden provocar el deterioro de la calidad de las mismas. Son las derivadas de la explotación y de la recarga.

La recarga consiste en inyectar un determinado volumen de agua en el acuífero a través de pozos de inyección. En ocasiones se trata de aguas residuales; la depuración de dichas aguas y la ubicación de la inyección pueden deteriorar la calidad. Sin embargo, a veces la recarga se utiliza como medida correctora inyectando aguas de mejor calidad y modificando el flujo.



Los pozos del Valle de México

La Cuenca de México, como hemos visto, está rodeada de numerosos volcanes de composición andesítica y basáltica que forman parte del Cinturón Volcánico Transmexicano. La edad del volcanismo es fundamentalmente Plioceno-Holoceno. El valle se encuentra limitado al Oeste por sierras andesíticas Terciarias (Sierra de Las Cruces); al Sur por basaltos Cuaternarios (Sierra del Chichinautzin); al Norte por rocas volcánicas Terciarias (Sierra de Guadalupe). En el Este de la cuenca, la Sierra Nevada, la cual incluye el pico mas alto del volcán Popocatepetil, está formada por basaltos y andesíticos del Terciario. En la porción central-Este de la planicie se encuentran varios picos aislados, como el Cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina.

En general existe poca información sobre la composición geológica de zonas profundas del subsuelo de la Cuenca de México. La fuente de información más importante sobre el subsuelo profundo de la Cuenca de México proviene de 13 perforaciones profundas: Pozo Profundo Texcoco-1 (2,065 m); Pozo Roma-1 en el centro de la Zona Metropolitana con 3,200 m representa la perforación más profunda de toda la Cuenca de México; Pozo Mixhuca-1 cerca del aeropuerto, con una profundidad de 2,452 m; Pozo Copilco-I, ubicado cerca de la UNAM (2,258 m); Pozo Tulyehualco-1 (3,000 m).

Además existen 8 pozos profundos de exploración perforados por el Gobierno del Distrito Federal entre los años 1963 y 1966 denominados Pozos No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, con profundidades de hasta 1,356 m. Todos ellos se encuentran dentro de la Zona Metropolitana.

En la parte norte del Valle de México, se puede deducir, que las formaciones andesíticas del Pozo 1 representan restos del volcanismo aislado de la Sierra de Guadalupe. Las capas epi- y piroclásticas de los pozos 4 y 5 son testigos de los 2 procesos de erosión de las montañas de los alrededores y de la caída de material volante de origen no conocido. El Pozo 6 representa la secuencia típica de las lavas andesíticas de la Sierra de Las Cruces.

En el centro de la zona metropolitana, el Pozo Roma-1 se caracteriza por intercalaciones de brechas y tobas, mientras que el Pozo Mixhuca-1 en el este del centro tiene más influencia de lavas.



En la parte sur del Valle de México, la secuencia inferior de tobas andesíticas se puede correlacionar con el Pozo Copilco-1 y del Pozo 7. En la parte superior de la columna de Copilco-1 dominan basaltos, mientras que en el flanco SO dominan gravas y aluviones (pozos 8 y 7).

En el área de Xochimilco existe poca correlación entre los pozos Tulyehualco-1 y el Pozo 2. Esta falta de correlación litológica también es notoria con respecto a los demás perfiles del Valle. La columna del Pozo Tulyehualco-1 consiste en su parte inferior de una secuencia de lavas y tobas, y en su parte superior de arcillas lacustres. La estratigrafía del Pozo-3 consiste de arenas y tobas en su parte inferior y de gravas y boleos en su parte superior.

En general, el tamaño del Valle y la variedad de fuentes para los productos volcánicos, impide la correlación regional de la mayoría de las formaciones del Valle. Con la excepción de productos piroclásticos, que se transportan en forma de caídas, todas las capas representan en general depósitos locales.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la cuenca de México comprende una serie de subcuencas, formadas, más o menos, independientemente, las unas de las otras; se considera que el acuífero situado bajo la Ciudad de México forma una entidad relativamente aislada de los acuíferos del Norte de la cuenca, donde está separada por la línea de los cráteres volcánicos de la sierra de Guadalupe, que atraviesan la cuenca desde el W al E, en su parte media.

Con base en el historial de mediciones hidrométricas en cerca de 1000 pozos, en el periodo 1984-1995 (Lesser, 1995), se proponen tres subsistemas acuíferos someros (0-400 m) para el Valle de México:

- Subsistema de la Ciudad de México
- Subsistema del Valle de Texcoco
- Subsistema del Valle de Chalco.

Además de las anteriores, se pueden diferenciar otras zonas ubicadas fuera de la Zona Metropolitana:



- Subcuenca Zumpango: La subcuenca de Zumpango está limitada por la Sierra Guadalupe al Sur, por el borde de la Cuenca de México al Norte y por la subcuenca de Pachuca al Este.
- Subcuenca Pachuca: Esta subcuenca representa la parte extrema en el Norte de la Cuenca de México.
- Subcuenca Apan: La subcuenca de Apan tiene su límite en el Oeste por la subcuenca de Pachuca, al Norte y Este por el borde de la Cuenca de México, y al Sur por la Sierra Nevada.

Existen además otras Microcuencas del Oriente del Valle de México:

En la parte oriental del Valle de México existen varias microcuencas hidrológicas encargadas de alimentar los acuíferos de la región (Fig. 5.10), las cuales están determinadas por ríos formados por los deshielos de los glaciares de alta montaña del Iztaccíhuatl y el Popocatepetl. Estas cuencas son:

- Microcuenca del Río Atoyac,
- Microcuenca del Río Tlalmanalco o de la Compañía,
- Microcuenca del Río Amecameca y
- Microcuenca del Arroyo Nexpayantla.



Fig. 5.10 Microcuencas hidrológicas del oriente del Valle de México.



Existe transferencia de agua entre estas microcuencas, ya que las de Tlalmanalco y Amecameca proveen de agua a los habitantes de otras microcuencas. La microcuenca de Nexpayantla alimenta los acuíferos del Estado de Morelos mientras que sus habitantes importan agua de la microcuenca Río Amecameca.

Desde Tlalmanalco hasta Tepetlixpa, los asentamientos humanos se encuentran sobre un enorme sistema de acuíferos; hecho que representa, a la vez, una oportunidad y una responsabilidad.

Sistema de acuíferos de la formación Chichinautzin.

(Amecameca, Tlalmanalco, Tepetlixpa)

La Sierra *Chichinautzin*, compuesta de roca basáltica, es altamente permeable, y es la zona principal de recarga del acuífero de Chalco-Xochimilco. Descarga aguas subterráneas en tres direcciones: Xochimilco, Cuernavaca, Cuautla y Amecameca.

Su manto freático llega a tener menos de 100 metros de profundidad al pie de la montaña; hay circulación profunda por sus fracturas y materia piroclástica. Tiene alto riesgo en cuanto a su calidad y capacidad de recarga debido a los asentamientos humanos.

Este acuífero actualmente sufre una tasa de extracción siete veces mayor a su capacidad de recarga, y se prevé que de seguir así, lo llevará a su agrietamiento y total contaminación en unos 25 años. Los pozos profundos "Los Tlachiques", alimentadores del sistema sureste para los municipios de Tepetlixpa, Ozumba y Atlautla, se encuentran en la frontera con este acuífero.

Sistema de acuíferos del Valle Ozumba-Amecameca.

(Amecameca, Atlautla, Ozumba, Tepetlixpa, Ecatingo)

Son acuíferos de poca salinidad que se encuentran principalmente en capas de materia piroclástica entre capas aluvionales. Se alimentan por infiltración de ríos y arroyos y por corrientes subterráneas. Sus corrientes se dirigen principalmente hacia Tenango del Aire, donde es extraída de una profundidad de 100 metros por los pozos profundos los "*Tlachiques*". Tiene otra descarga hacia Ozumba y Tepetlixpa



donde el nivel del agua se encuentra entre 5 y 10 m de profundidad, lo que indica un acuífero independiente del de Tenango del Aire. Al norte de Amecameca existe otro acuífero a una profundidad de 15 m.

Sistema de acuífero de la formación Llano Grande

(Tlalmanalco, Amecameca)

Esta unidad tiene muchos mantos freáticos de buena circulación. No cuenta con capa protectora. Las rocas volcánicas que constituyen esta formación son altamente permeables y el sistema funciona primordialmente en la recarga de los acuíferos del Valle Ozumba-Amecameca y del Valle de Chalco. Tiene un bajo nivel de riesgo por la falta de presencia humana.

Sistema acuífero de la formación Iztaccíhuatl

(Tlalmanalco, Amecameca)

Constituida por una serie de erupciones efusivas. Las corrientes subterráneas fluyen hacia el suroeste por un manto freático sin protección; tiene circulación profunda por fracturas. Su nivel de riesgo es bajo por ubicarse en zona boscosa sin asentamientos humanos.

Sistema acuífero de la formación Popocatepetl

(Atlautla, Ecatingo, Amecameca)

Acuífero con manto freático sin protección. Tiene gran permeabilidad debido a fisuras, con algunas descargas en forma de manantiales térmicos en el Valle Cuautla-Cuernavaca. En su pie de monte se encuentran sumideros donde anteriormente brotaban manantiales. Riesgo de contaminación por la descarga de aguas negras.

En la Cuenca del Valle de México las formaciones piroclásticas y epiclásticas tienen las mejores características hidrodinámicas para la existencia de acuíferos granulares en una profundidad de 400 a



1000 m. No se comprobó la hipótesis de una disminución de la porosidad con el incremento en profundidad que pudiera ser causada por procesos de compactación.

Por el contrario, se detectaron porosidades primarias de hasta de 33% en profundidades de más de 900 m. En rocas efusivas y en calizas, se observaron vetillas y fracturas abiertas hasta profundidades de 2200 m.

En general, la zona del pozo Roma-1 muestra las mejores posibilidades para encontrar flujos subterráneos en sistemas de acuíferos profundos. Especialmente las tobas lacustres de una profundidad de 730 m hasta 810 m, y las brechas volcánicas y calcáreas de una profundidad de 810 m a 950 m, muestran condiciones hidrodinámicas muy favorables, como la conductividad hidráulica en un orden de 10-5 m/s, para la existencia de flujos subterráneos.

Por su alta permeabilidad, las tobas de una profundidad de 730 a 810m (R-5) forman probablemente un acuífero regional, lo cual está correlacionado con los conglomerados volcánicos del pozo Mixhuca-1 (Mix-8). Además, el rango de los valores de la conductividad hidráulica del pozo Mixhuca-1 es con un promedio de 10-7 a 10-8 m/s, en general menor que el promedio de 10-5 a 10-6 m/s del pozo Roma-1. Los conglomerados volcánicos en una profundidad de 730 m a 900 m, representan la única zona en el pozo Mixhuca-1 con valores de 10-5 m/s. El pozo Tulyehualco-1 se caracteriza por la abundancia de varias capas impermeables de arcilla, las cuales impiden la formación de acuíferos con espesores grandes. Aparte, los valores para la conductividad hidráulica indican velocidades bajas de los flujos subterráneos. La zona somera de este pozo (0-450 m) presenta condiciones favorables para explotación a este nivel. Dicha zona se encuentra actualmente en producción.

Por sus características hidrodinámicas, se realizó una investigación más detallada de los acuíferos profundos en una profundidad de entre 400 y 1000 m en la zona del pozo Roma-1.

Se midieron las características hidrodinámicas de acuíferos someros, los cuales están recientemente en producción. Es importante mencionar, que varias de estas formaciones muestran permeabilidades intermedias y bajas. Eso significa, que la abundancia de alteración, fallas y fracturas que pueden aumentar considerablemente la permeabilidad secundaria. Un ejemplo lo representan las calizas del



pozo Mixhuca-1, donde una muestra densa tiene un valor de 10-12 m/s para la conductividad hidráulica (Mix-15), la muestra con microfacturas selladas por minerales secundarios de un orden de 10-9 m/s (Mix-14) y una muestra fracturada tuvo la conductividad hidráulica de 10-6 m/s (Mix-13).

La conductividad hidráulica de los acuíferos someros (< 400m) del pozo Mixhuca-1, tiene valores de 10-10 m/s, mientras que la zona entre 400 y 1000 m varía entre 10-5 y 10-9 m/s.

Igual ocurre en el pozo Roma-1, donde la columna somera muestra valores de 10-9 a 10-11 m/s, mientras que la zona profunda varía entre 10-5 y 10-9 m/s.

Se hizo una comparación análoga entre las características hidrodinámicas de algunos horizontes de los pozos profundos estudiados con las mismas formaciones que afloran en la superficie del Estado de Morelos: Dos de los manantiales principales del Estado de Morelos desagúan en forma de acuíferos fracturados por calizas cretácicas de la Formación Morelos y por basaltos de la Formación Chichinautzin. Eso indica, que los mismos horizontes en la Cuenca de México podrían tener un potencial hidrogeológico parecido.

Con respecto a las condiciones fisicoquímicas que podrían esperarse de los fluidos profundos, existen dos posibilidades: si no están afectados por hidrotermalismo, su calidad química será buena y la temperatura será de 50°C; en caso contrario, se esperan salinidades mayores a 1800 ppm y temperaturas cercanas a 120°C. En la zona del Peñón de Los Baños podrían existir estas últimas condiciones.

Problemas debidos a la hidrogeología, así como algunos factores que los generan

En relación al riesgo hidrogeológico en el área, la Cuenca de México está rodeada por sierras de origen volcánico, lo cual elimina la posibilidad de deslaves de terreno que pudieran presentarse debido al régimen pluviométrico. Los escurrimientos superficiales han establecido un reducido patrón de drenaje. Durante la época de lluvias, hacia el suroeste de la Cuenca de México. Los caudales escurridos llegaron a provocar inundaciones de la Ciudad hasta los años 50's en la Cuenca este problema nunca ha tenido las magnitudes que se han presentado en la Cd. De México o en las colonias periféricas del Sur de la Delegación de Xochimilco. El Río de la Compañía, actualmente drenaje de las aguas negras de la ciudad



de Chalco y asentamientos circunvecinos, que nace en las faldas de la Sierra Nevada y desemboca actualmente en el vaso del Lago de Texcoco, conduce caudales reducidos que no sufren incrementos notables en la época de lluvias.

El azolvamiento de este canal de desagüe provocó en las décadas de los 70's y 80's el desbordamiento del mismo afectando los asentamientos de Santa Catarina. Al inicio de los 90's se inició un programa de remoción de azolves y remodelación del curso del canal en algunas áreas críticas como el cruce del mismo con la autopista México-Puebla. Estas acciones han minimizado el riesgo de inundaciones de la creciente mancha urbana de Santa Catarina.

El fenómeno de hundimientos de la Ciudad de México es conocido desde principios de este siglo. El primer reporte con carácter técnico-científico al respecto se debe a R. Gayol en 1929. Gayol ya asocia el hundimiento de la ciudad al agua subterránea. La velocidad promedio osciló entre 4 y 7cm/año entre 1890 y 1985, con un incremento de hasta 46 cm/año en el período 1948-1952. En algunos puntos de la Ciudad de México se han registrado 9 metros de hundimiento regional, especialmente en la porción más superficial de los sedimentos lacustres.

En un período de 100 años se tiene un hundimiento acumulado de 7m y una velocidad promedio de 7 cm/año. Se conocen sitios como la Alameda Central que han reportado este hundiendo y muy pocos en donde a sido mayor.

El sistema de piezómetros instalado en los 50's por Nabor Carrillo, si bien perseguía objetivos de mecánica de suelos, permite conocer con alta precisión la evolución piezométrica de los depósitos lacustres, principales agentes del fenómeno de hundimiento regional.

Como es bien sabido, el hundimiento regional se debe a la extracción de agua de los terrenos lacustres, los cuales por sus características ya no recuperan el agua que contenían. Esta idea es escasamente extendida por el grueso de la población, la cuál relaciona el hundiendo con la extracción del agua del subsuelo. Con la idea de minimizar la velocidad del hundimiento regional (subsistencia) se han reubicado pozos a profundidades mayores al espesor del paquete lacustre para evitar la extracción de agua del mismo. Los llamados pozos profundos alcanzan los 400 m y se diseñan con ademe ciego los



primeros 100-150 m. aún así el régimen de extracción del acuífero profundo que subyace al acuífero semi-permeable provoca flujos verticales descendentes. Esta estrategia ha logrado reducir el hundimiento regional (subsistencia) 3mm/año.

En el canal de Cuernavaca, al occidente de la zona de Chalco, se han medido velocidades de hasta 13 cm/año, mayores al promedio reportado por la Cuenca. Esto se debe a que aún existen pozos que se encuentran ubicados dentro del paquete lacustre. Habría que recordar que éste presenta espesores de hasta 300-400 m en la parte central de la subcuenca.

Hundimientos, acompañados por agrietamiento del terreno natural

En regiones donde se efectúa la extracción de agua como lo es la cuenca del valle de México, mediante el bombeo, es común observar hundimientos de la superficie natural del terreno, es importante tomar en cuenta los problemas de subsistencia regional que ocasiona la extracción de agua subterránea, por efectos del abatimiento del nivel de agua freática. En lugares donde se encuentra abatido el nivel del agua subterránea, y las formaciones geológicas superficiales las constituyen sedimentos no consolidados y compresibles, es común que se desarrollen grietas en la superficie del terreno natural, las que se propagan a cierta profundidad en el subsuelo, (Fig. 5.11), con el consecuente daño que sufren las construcciones de cualquier tipo y el peligro que esto implica para sus ocupantes.

Una consecuencia del hundimiento regional (subsistencia) del terreno es la aparición de fracturas en las márgenes del paquete lacustre. En la Cuenca se han detectado fracturas en dos áreas, una de "microfracturas" en Xochimilco y otra de fracturas visibles en el norte de la subcuenca (Barrio Santa Bárbara en Ixtapaluca). Afortunadamente, en ambos casos las fracturas están en terrenos de uso agrícola, más sin embargo pueden llegar a presentarse en zonas urbanizadas. Esta situación permitió la promulgación de normas que prohíben, en el lugar, sacar agua del subsuelo.



Fig. 5.11 agrietamiento de la superficie del terreno, como consecuencia de los hundimientos diferenciales que produce la sobreexplotación de acuíferos en el Valle de México.

Ante el alto nivel de riesgo que representa la problemática de hundimientos regionales diferenciales y agrietamiento de la superficie del terreno, aquí se incluye un mapa de zonificación que se elaboró mediante la superposición de la información referente a las características de las diferentes provincias fisiográficas, la geomorfología, el estudio de los diferentes climas del país, así como las condiciones ambientales que propician la necesidad de extraer agua del subsuelo o de los acuíferos, dando especial atención a las condiciones hidrogeológicas y a los datos de precipitación pluvial, mediante el estudio de isoyetas. (Fig. 5.12)

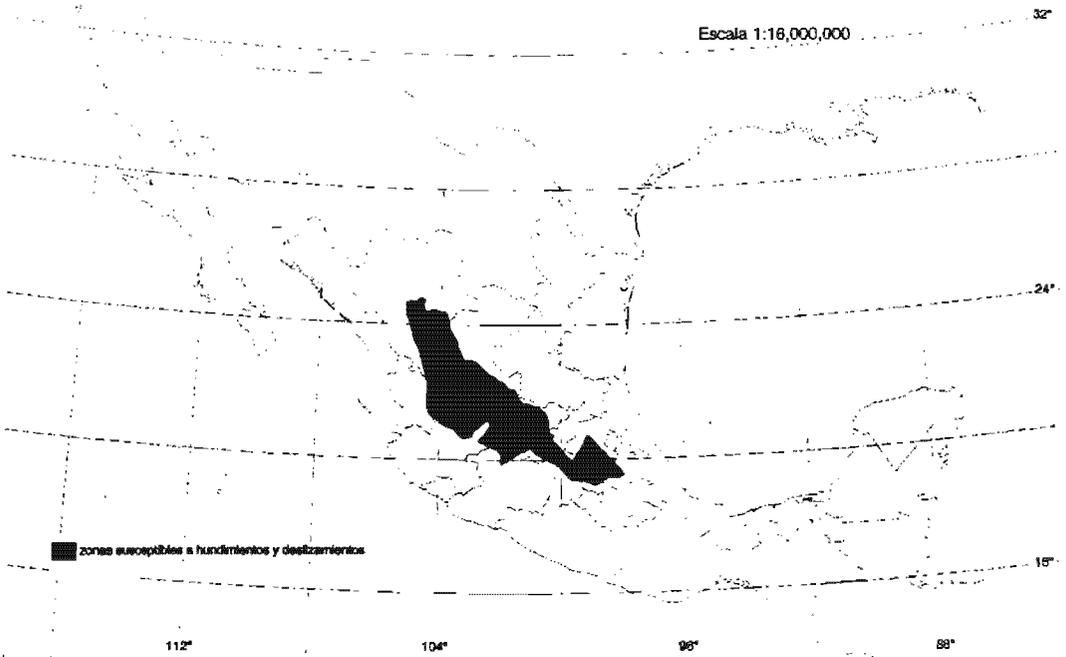


Fig. 5.12 Hundimientos regionales y agrietamientos por sobreexplotación de los acuíferos

Factores a tomar en cuenta que generan riesgos hidrogeológicos

- El manejo del suelo en zonas urbanas difícilmente considera el subsuelo y por ende no toma en cuenta que la calidad de las aguas subterráneas subyacentes pudiera ser afectada por fuentes potenciales de contaminación superficiales. Los planes de ordenamiento urbano y ecológico no incorporan la estratigrafía y menos la distribución y características de sistemas acuíferos.
- El desconocimiento del marco geológico y de la hidroestratigrafía es común en grandes núcleos urbanos de los países en vías de desarrollo. Ciudades como la de México apenas recientemente incorporaron un Servicio Geológico Metropolitano. Esto se convierte en problema cuando parte del abastecimiento de agua proviene de los acuíferos que subyacen a las manchas urbanas. Problema de dimensiones desconocidas ya que muchas veces no se cuenta con recursos para



realizar monitoreos periódicos y análisis prospectivos de la calidad del agua abastecida a la población.

- Muchos de los grandes centros urbanos en el llamado Tercer Mundo crecen anárquicamente comprometiendo zonas de alta vulnerabilidad e invadiendo o alterando zonas preferenciales de recarga. En esas áreas de expansión urbana lo mismo se encuentran terrenos agrícolas que pequeñas industrias catalogadas como “underground” que manejan materias primas y residuos líquidos y sólidos que si no son manejados adecuadamente pueden generar lixiviados con solutos riesgosos para la salud humana, mismos que pueden migrar hacia los sistemas acuíferos locales.
- Los núcleos urbanos presentan diferentes fuentes de contaminación acuífera, potenciales y activas. La vocación de la zona define el tipo de desarrollo. Existen ciudades generadas en torno a la agricultura y otras en donde el factor de desarrollo es la industria. El tipo de industria es un elemento importante en la diversidad de fuentes de contaminación. Inclusive ciudades con vocación turística o de servicios o centros comerciales tienen fuentes de contaminación.
- Los servicios urbanos pueden convertirse en fuentes de contaminación. Los sistemas de drenaje de aguas residuales presentan fugas debido a la calidad de los materiales, al escaso mantenimiento que reciben, a esfuerzos debido a subsidencia, temblores, fallas geológicas, etc...Estos factores también provocan que la tubería de agua potable se deteriore.
- La disposición final de residuos, tanto sólidos como líquidos, siempre ha sido un problema. Las aguas residuales urbanas son conducidas mediante canales no protegidos hacia cuerpos receptores. En los últimos años se trata de que todas las ciudades cuenten con planta de tratamiento de aguas residuales y con rellenos sanitarios. Una serie de factores entre ellos el económico han influido para que solo un contado numero de ciudades “grandes” cuenten con estos sistemas.
- Los cementerios han sido ya considerados como fuentes contaminantes. Los cuerpos en descomposición producen cadaverina y putrecina además de elementos bacteriológicos patógenos (Rodríguez y Ramos, 1997). Muchos panteones están ubicados en la mancha urbana.
- En ciudades en donde se encuentra establecida industria mediana y pesada, no es de extrañar que parte de los residuos industriales generados en el siglo pasado se hayan depositado en basureros sin ninguna protección. La falta de control en la entrada de los sitios de disposición final y en algunos casos pequeños “sobornos” a los encargados han facilitado que se depositen residuos peligrosos.



- Las estaciones de servicio, gasolineras, representan otro problema ambiental recurrente en los núcleos urbanos. Las fugas de hidrocarburos han afectado la calidad del agua de numerosos centros urbanos. Fugas no solo de gasolineras sino de poliductos que cruzan las ciudades.
- El crecimiento urbano implica el consumo de material de construcción autóctono. La elaboración de ladrillo (tabique) y de teja para techos se realiza con arcilla de afloramientos localizados en los alrededores de la mancha urbana. Esta explotación pocas veces controladas, produce grandes quejadas que posteriormente son utilizadas como basureros.
- La actividad minera también genera fuentes contaminantes. La disposición de los residuos mineros en los llamados “jales” en la periferia de los asentamientos urbanos puede generar metales que migren hacia los acuíferos o paniculado que se deposite en terrenos agrícolas o escorrentías. El humo de las fundidoras también puede afectar indirectamente a las aguas subterráneas. Se ha demostrado que los humos pueden acarrear ácido arsenioso que al depositarse en el suelo se infiltra (Armienta et al, 1997).

5.2.1.4 Inestabilidad de laderas

La inestabilidad del terreno natural se presenta en zonas montañosas, donde la superficie del mismo presenta diversos grados de inclinación. El grado de inestabilidad se puede definir como la pérdida de la capacidad del terreno natural para autosustentarse, lo que deriva en reacomodos y colapsos del mismo, los flujos de lodo y escombros se pueden identificar como verdaderos ríos de material térreo de diversos tamaños.

Los problemas de inestabilidad de laderas se cuentan entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, lo cual representa una de las mayores amenazas para la vida y bienes materiales de la población. Para prevenir futuros desastres asociados a la inestabilidad de laderas, es de suma importancia que todos los miembros de la población conozcan estos fenómenos y se mantengan atentos a las manifestaciones que lo preceden y los factores que la generan.



Mecanismos básicos de inestabilidad de laderas.

La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo, por diferentes mecanismos. Estos mecanismos sirven a su vez para clasificar los tipos de procesos existentes. De tal modo que se agrupan en cuatro categorías principales y una derivada de la combinación de éstas. Los mecanismos básicos de inestabilidad son los caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos y las expansiones o desplazamientos laterales. Cuando el mecanismo inicial de un movimiento se transforma en otro, se dice que es un movimiento complejo. En la (Fig. 5.13) se muestran todos los tipos de fallas que se han presentado a lo largo de la historia.

➤ Caídos o derrumbes.

Los caídos y derrumbes son movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes abruptas y acantilados, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando.

➤ Flujos.

Movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tiene movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Entre los más importantes se pueden distinguir los siguientes:

- Flujos de lodo. Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
- Flujos o avalancha de suelos y rocas. Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan partículas sueltas, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que se mueve pendiente abajo. Estos movimientos también son conocidos como flujos de escombros.



- Lahares. Flujo de suelos o detritos que se originan en el talud de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica.

➤ **Deslizamientos**

Movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, delimitada por una o varias superficies, planas o cóncavas, sobre las que se desliza el material inestables. Por la forma de la superficie de deslizamiento, se distinguen:

- Rotacionales. Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava, es decir, hacia arriba en forma de cuchara o concha, definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas. A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas.
- Traslacionales. Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplaza hacia fuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie principal más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien, están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de cambio de estado de meteorización en las rocas.

Factores que rigen la inestabilidad de laderas.

Los procesos que ocasionan la inestabilidad de las laderas están determinados por dos tipos de factores; externos e internos. Los factores externos ocasionan un incremento en los esfuerzos o acciones que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de las fuerzas motoras o actuantes, mientras que los factores internos reducen la resistencia de los materiales, en otras palabras, disminuyen la concentración de las fuerzas resistentes.

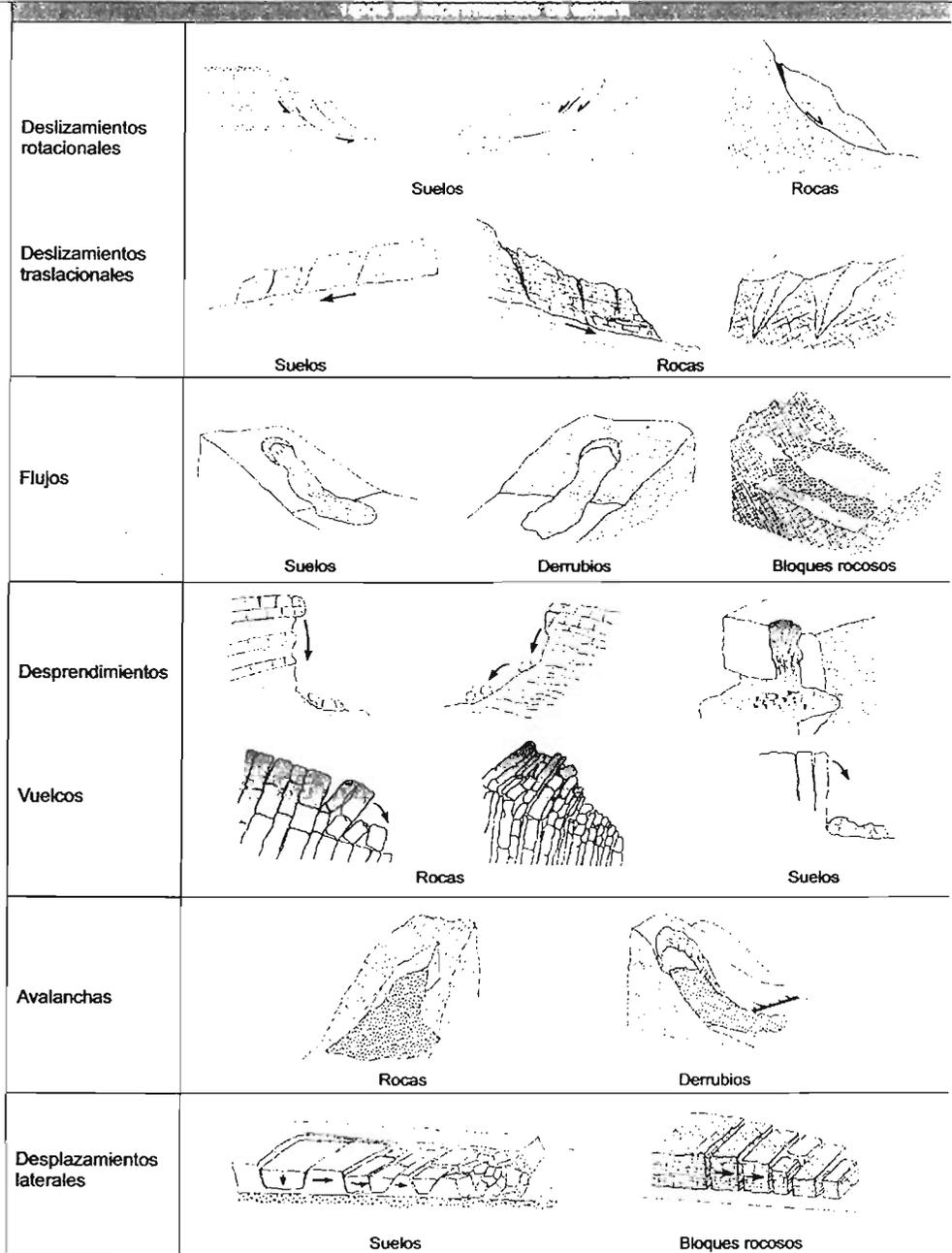


Fig. 5.13. Diagramas de bloque muestran los diferentes tipos de falla de laderas.



Las fuerzas motoras se originan por el peso propio del material térreo que conforma el cuerpo de una ladera y por el peso de cualquier construcción que se coloque en la parte alta de la misma, como por ejemplo: casas, terraplenes usadas para construir carreteras, etc. Las fuerzas resistentes son resultados de la fortaleza o resistencia característica de los materiales térreos que conforman las laderas.

Existen varios factores de tipo externo. Entre los principales cabe destacar los procesos que se relacionan con las modificaciones de la geometría de una ladera (por erosión, socavación, incisión de un río, excavaciones artificiales, etc.), las cargas y descargas, el efecto de los sismos o vibraciones por explosiones y maquinaria pesada, así como los cambios en el régimen hidrológicos como consecuencia de la variabilidad de la intensidad y duración de las precipitaciones. La infiltración del agua de lluvia produce flujos sub-superficiales y subterráneos en las laderas, el aumento del contenido en agua de la zona no saturada y la elevación del nivel freático, recargando la zona saturada (Fig. 5.14). La cantidad de agua que se infiltra al terreno depende de la intensidad y duración de las lluvias, tamaño de la cuenca de aporte, contenido previo de agua en el terreno (posición del nivel freático y grado de saturación), de su permeabilidad y transmisividad y de la topografía y otras características de la ladera, como la presencia de vegetación. Dependiendo de estos factores, se generan estados de desequilibrio que pueden dar lugar a la inestabilidad de laderas.

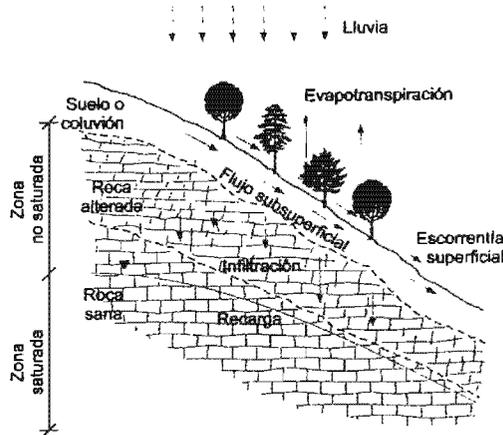


Fig. 5.14 esquema de circulación del agua en una ladera



Cuando una ladera se ve afectada por estos procesos, es más fácil que las fuerzas motoras influyan en la estabilidad de la ladera. Por otro lado, los factores internos están relacionados con las características de los materiales térreos en cuanto a composición, textura, grado de intemperismo, características físico-químicas, etc; y las modificaciones que éstos van sufriendo.

Algunos de estos factores pueden ser propiciados por el ser humano, ya que éste ha transformado el equilibrio natural del entorno, de tal modo que la actividad humana es uno de los elementos más importantes en la modificación de la estabilidad de las laderas.

Indicios de inestabilidad de laderas.

- Manantiales, filtraciones o suelos saturados en áreas que generalmente no están húmedas.
- Desarrollo de grietas o abultamientos en el terreno, ya sea natural o artificial.
- El movimiento de suelos que deja al descubierto las cimentaciones de estructuras.
- Estructuras que se hayan movido y/o inclinado con relación a la estructura principal.
- Inclinación y/o agrietamiento de pisos y cimentaciones de concreto.
- La ruptura de tubos de agua y otras estructuras subterráneas.
- Inclinación de postes telefónicos y/o eléctricos, árboles, muros de contención o cercas.
- Carreteras que se hundan súbitamente
- Cuando el nivel del agua de un arroyo se incrementa rápidamente, posiblemente acompañado por incrementos en la turbidez del agua.
- Cuando los niveles del agua descienden súbitamente, a pesar de que está lloviendo o ha llovido recientemente.
- Puertas y ventanas que no cierran con facilidad y espacios visibles entre los marcos de las mismas

Ante el alto nivel de peligro que representa para la población la problemática de inestabilidad de laderas naturales, el SINAPROC junto con otras instituciones preparó el siguiente mapa de zonificación (Fig. 5.15). En busca de la identificación de las zonas de mayor riesgo debido a la inestabilidad de laderas.

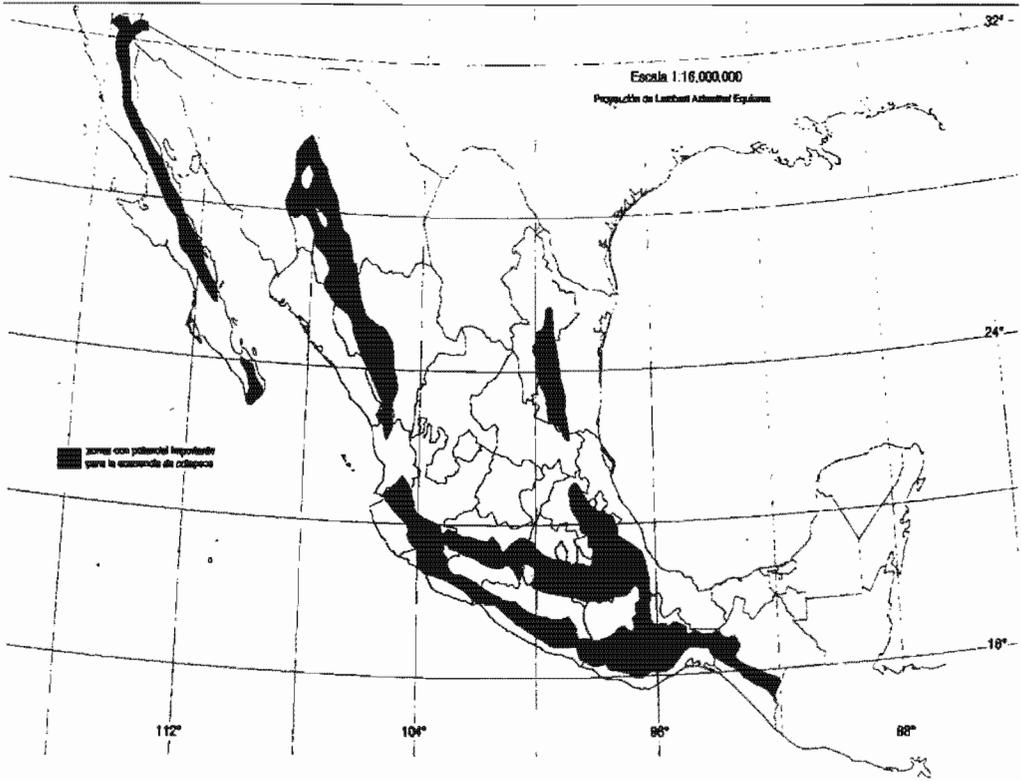


Fig. 5.15 Inestabilidad de laderas naturales

Para finalizar esta parte de riesgos geológicos podemos comentar que una de las partes importantes que se está realizando en este momento en el país y en particular en la Cuenca del Valle de México es la creación de mapas de riesgos, que es, tal vez, uno de los lazos que unen más fuertemente la investigación científica con la sociedad. El proceso de elaboración requiere, por lo general, de bastante tiempo, tomando en cuenta que, previamente, deben realizarse estudios geológicos básicos, antes de darse a la tarea de realizar las simulaciones y establecer un diseño de presentación simplificado y sencillo. Los mapas de riesgo representan en un plano la posible trayectoria y distribución de los procesos en una región dada y que podrían representar una amenaza para la sociedad. Reconocer la distribución de ocurrencia de los procesos geológicos permite a la autoridad y a la población, planear la mitigación de los riesgos involucrados.



En México se realizan diversos esfuerzos para construir mapas de riesgos y peligros geológicos en general. (Fig. 5.16) La premisa fundamental es que estos mapas se ubican en el ámbito científico y técnico, es decir, del conocimiento de los procesos físicos que ocurren en la naturaleza.

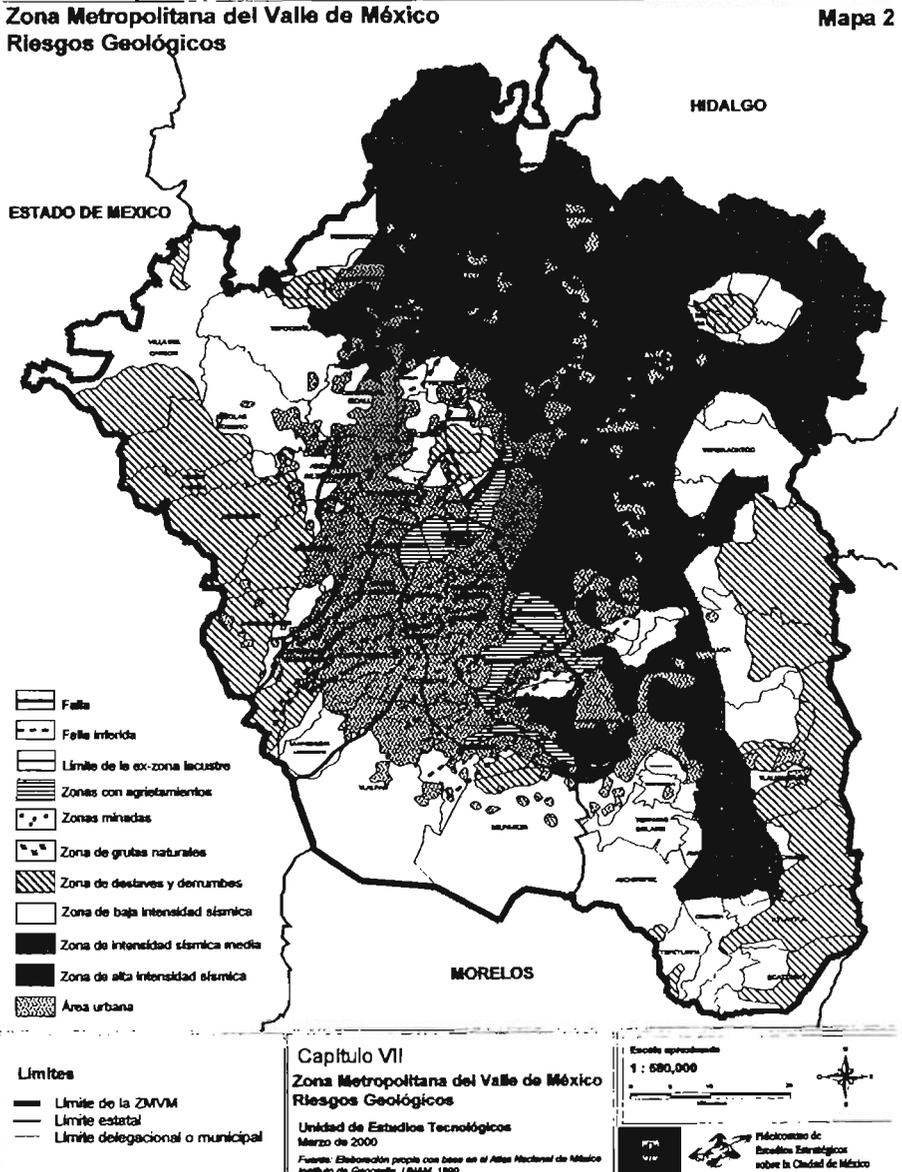


Figura 5.16 Riesgos geológicos del ZMMV



5.2.2 Hidrometeorológicos

México es afectado por varios tipos de fenómenos hidrometeorológicos que pueden provocar la pérdida de vidas humanas o daños materiales de importancia. Principalmente está expuesto a lluvias, granizadas, nevadas, heladas y sequías, ponen de manifiesto la gravedad de las consecuencias de esta clase de fenómenos. Las fuertes precipitaciones pluviales pueden generar intensas corrientes de agua en ríos, flujos con sedimentos en las laderas de las montañas, movimientos de masa que transportan lodo, rocas, arena, árboles, y otros objetos que pueden destruir casas, tirar puentes y romper tramos de carreteras. Las granizadas producen afectaciones en las zonas de cultivo, obstrucciones del drenaje y daños a estructuras en las zonas urbanas.

Las sequías provocan fuertes pérdidas económicas a la ganadería y la agricultura en periodos de meses o años.

El conocimiento de los principales aspectos de los fenómenos hidrometeorológicos, la difusión de la cultura de Protección Civil en la población y la aplicación de las medidas de prevención de desastres pueden contribuir de manera importante en la reducción de los daños ante esta clase de fenómenos, pero es sabido que este trabajo se enfoca a la zona de la Cuenca del valle de México por lo que solo tocaremos el tema de las inundaciones, que para esta zona es uno de los riesgos más importantes que la aquejan

5.2.2.1 Inundaciones

El problema de las inundaciones en el Valle de México es añejo y, en correspondencia, añeja ha sido la capacidad de los ingenieros para encontrar soluciones al respecto. Se ha cuestionado, tal vez con razón, que el lago original (Fig. 5.17) se haya venido comprimiendo para dar lugar a una ciudad cada vez más grande, pero hasta ahora la decisión ha sido siempre tratar de resolver los problemas de inundaciones (y otros muchos) sin frenar el crecimiento de la ciudad.

Así, los aztecas tuvieron que construir el albarradón de Nezahualcóyotl, para prevenir las inundaciones y evitar la mezcla de las aguas salobres del lago de Texcoco con las aguas dulces de los demás lagos.



De las crónicas relativas a estas obras, que se presentan en un espléndido resumen en la "Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal", puede constatarse el contraste entre la necesidad de esas grandes obras para evitar la pérdida de decenas de miles de vidas, y un gran número de propiedades por otra parte, y el enorme sacrificio para realizarlas, que costó también muchas vidas y el uso de grandes recursos económicos.

Para entender la situación que se presentaba al término de las obras del canal de Huehuetoca y el tajo de Nochistongo, es interesante la opinión de Alejandro de Humbolt, quien en 1804 opinó que "La Ciudad correrá siempre muchos riesgos, mientras no se abra un canal directo al lago de Texcoco". En efecto, si bien se contaba ya con una obra que permitía derivar los escurrimientos de los principales ríos del norponiente, sobre todo el río Cuautitlán, evitando que la laguna de Zumpango se desbordara hacia el lago de Texcoco y éste hacia la ciudad, no se podían controlar las aportaciones de todas las demás cuencas situadas al sur y oriente de la obra concluida. El lago de Texcoco no tenía posibilidades de descargar fuera del valle, de tal forma que ya entonces se concibió la idea de construir el "Gran Canal" o "Canal del Desagüe".

Sin embargo, la obra se inició hasta 1866. Se concibió como un canal de 39.5 km, que iniciaba en el lago de Texcoco y culminaba con el túnel de Tequixquiac, de casi 10 km. La obra constituyó la segunda salida artificial para el drenaje del valle de México y fue terminada en el año 1900, con lo que se pensó que se había dado una solución definitiva a las inundaciones de la ciudad, que por aquellos años albergaba poco menos de un millón de habitantes.

El sistema funcionó más o menos bien hasta 1925, año en el que se presentaron nuevamente inundaciones de gran magnitud. En ese entonces se constató por primera vez que los hundimientos diferenciales hicieron perder su pendiente al sistema de colectores. La explicación científica del fenómeno del hundimiento y su relación con la extracción, mediante pozos, del agua del subsuelo, la dio, en 1947, el doctor Nabor Carrillo.

El crecimiento de la población se hizo explosivo a partir de 1930, para el que se calcula que la ciudad estaba habitada por un millón de personas, que se incrementaron a dos millones en 1940, tres en 1950 y



más de cinco en 1960. A lo largo de esos años se construyeron miles de kilómetros de diversos conductos para el drenaje y se inició la construcción del sistema de presas para la regulación de las avenidas en el poniente de la ciudad.

A pesar de los trabajos desarrollados en esos años, entre 1941 y 1951 se presentaron inundaciones recurrentes y cada vez mayores. Así, en 1950, el periódico El Universal dice que se inundaron de agua y lodo dos terceras partes de la Ciudad de México y murieron cinco personas.

Nuevamente se trabajó en soluciones "globales", dentro de las que destacan la construcción de grandes plantas de bombeo de los colectores principales al Gran Canal y el incremento sustancial de la capacidad de éste mediante la ampliación de las secciones y la construcción del segundo túnel de Tequixquiac, que se terminó en 1954.

Entre 1954 y 1967 se construyeron nuevamente miles de kilómetros de colectores, plantas de bombeo con capacidad acumulada de más de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, el interceptor del poniente, el entubamiento de los ríos Churubusco, de la Piedad, Consulado, etcétera, pero estas obras y otras muchas que se describen en las "Memorias del Drenaje Profundo", seguían resultando insuficientes por el crecimiento acelerado de la población, de la mancha urbana y, sobre todo, por el hundimiento de la ciudad.

Se inició entonces, en 1967, una nueva solución: El Sistema de Drenaje Profundo. Esta obra constaba, en el proyecto original, de dos interceptores de 5 m de diámetro y 18 km de longitud conjunta, con una profundidad que varía de 30 a 50 m. Los interceptores descargan al Emisor Profundo, de 6.5 m de diámetro y 50 km de longitud. La obra, considerada por muchos como "definitiva", se inauguró en 1975.

El apretado resumen de estas páginas, tiene por objeto mostrar la importancia histórica del problema de las inundaciones en el valle de México y derivar algunos comentarios:

Los hechos muestran que, mientras la ciudad siga creciendo, las soluciones no son definitivas.

El sistema para el control de avenidas es enorme, y sólo para mantenerlo en funcionamiento se requiere una gran capacidad técnica, así como inversiones cada vez más cuantiosas.



Probablemente, por la velocidad de crecimiento de la urbanización, "las soluciones" se han construido después de que se presentan las grandes inundaciones. Dichas soluciones comprenden obras de protección, como el albarradón de Nezahualcoyotl, de regulación de avenidas como el sistema de presas del poniente y diversas lagunas en la parte baja de la ciudad y obras de descarga como el Emisor del Poniente, el Gran Canal y el Emisor Central.

La situación actual

El Sistema de Drenaje Profundo cuenta en la actualidad con más de 80 km de interceptores, además de los 50 km ya mencionados del Emisor Profundo.

La lógica del funcionamiento del sistema para el control de las inundaciones es, a grandes rasgos, la siguiente.

El objetivo fundamental del sistema es evitar la ocurrencia de inundaciones que causen daños directos a la vida de la población o sus bienes, así como daños indirectos por la afectación al desarrollo normal de las actividades humanas. Por ello, se ha preferido la denominación de sistema para el control de inundaciones, en lugar del nombre tradicional de sistema de drenaje. En la figura 2 se muestra un esquema del sistema, cuyo funcionamiento se describe enseguida.

Los cauces naturales solamente se conservan en las zonas montañosas que rodean al valle de México. Los ríos que cruzan la zona urbana han sido entubados para evitar el contacto de la población con las aguas negras.

De las montañas del sur bajan los ríos San Luis, San Lucas, San Gregorio, Santiago y San Buenaventura. Normalmente conducen escurrimientos escasos, porque sus cuencas están en formaciones basálticas muy permeables. Sólo el río San Buenaventura, ocasionalmente, conduce crecientes importantes, debido a precipitaciones intensas combinadas con deshielos del volcán del Ajusco.

Los principales aportadores al Valle de México son los ríos que bajan de las sierras del poniente. Los más importantes son los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya y Hondo, que drenan hacia el sistema de



presas del poniente que los intercepta, descargando gastos regulados en el Interceptor del Poniente. Este conduce las avenidas hacia el norte y las descarga por la parte baja del río Hondo, en el Vaso del Cristo, donde pueden ser reguladas nuevamente y descargadas en el Emisor del Poniente, hacia el norte, o en el río de Los Remedios, hacia el oriente.

Al norte del Vaso del Cristo, el Emisor del Poniente recibe las descargas de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Hondo de Tepetzotlán, los cuales son regulados previamente por las presas Madín, San Juan, las Ruinas, Guadalupe y La Concepción. El Emisor descarga las avenidas fuera del valle por el Tajo de Nochistongo.

Aguas abajo del Interceptor del Poniente, los antiguos ríos ya entubados tienen una trayectoria aproximada de poniente a oriente. Los principales, citados de sur a norte, son el río Churubusco, el río Mixcoac, el río de La Piedad y el río Consulado, que originalmente descargaban en el lago de Texcoco.

Actualmente, el río Churubusco constituye la infraestructura básica para el drenaje de las cuencas de la zona situada al sur de su trayectoria y descarga las crecientes en los nuevos lagos de Texcoco (el Churubusco y el de Regulación Horaria), que las regulan antes de descargarlas en el Dren General del Valle.

Los ríos Mixcoac, La Piedad y Consulado, y en general toda la red primaria que conduce las avenidas con una trayectoria aproximada de poniente a oriente, son interceptados primero por el Sistema de Drenaje Profundo y después por el Gran Canal del Desagüe. Las descargas en el sistema profundo se realizan por gravedad y en el Gran Canal mediante bombeo.

El Sistema de Drenaje Profundo maneja los escurrimientos captados por los Interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente, y los conduce por el Emisor Central fuera del valle hasta el río El Salto. El interceptor Centro-Poniente puede auxiliar al Interceptor del Poniente, recibiendo parte de las crecientes que conduce este último. El Interceptor Oriente puede ayudar de la misma forma al Gran Canal.



En los últimos años, el Sistema de Drenaje Profundo ha ampliado su cobertura hacia el sur y el este, con objeto de auxiliar al río Churubusco y absorber las avenidas generadas por el crecimiento acelerado de las delegaciones Iztapalapa y Tláhuac, situadas al sur-oriente del Distrito Federal.

La zona sur-oriente del Valle también ha crecido aceleradamente en el Estado de México, sobre todo en los municipios de Chalco e Iztapaluca. Para su drenaje depende básicamente del río de La Compañía, que conduce los escurrimientos hacia el norte, hasta descargarlos en el Dren General del Valle y de ahí en el Gran Canal del desagüe.

Finalmente, el otro gran conducto para drenar las avenidas fuera del valle de México, es el Gran Canal del Desagüe. Este recibe directamente las descargas de toda la zona urbana situada al oriente del Interceptor del Poniente y al norte del río Churubusco, con el agravante de que, por el hundimiento de la ciudad, dichas descargas tienen que efectuarse mediante bombeos.

Más adelante recibe al Dren General del Valle, que conduce los escurrimientos del río Churubusco, ya regulados en los lagos de Texcoco, y del río de La Compañía.

Aunque la construcción del drenaje Profundo permitió reducir considerablemente las áreas de aportación al Gran Canal, los problemas de hundimiento han ocasionado que éste pierda pendiente, al grado de que en los primeros 20 km ya es prácticamente nula y en los próximos años se irá invirtiendo (Fig. 5.18).

La problemática actual del control de inundaciones en la ciudad puede agruparse en los siguientes grandes rubros.

A. Problemas Locales

Los problemas de tipo local se derivan de las lluvias de tipo convectivo, típicas en el valle de México, que se caracterizan por su gran intensidad, aunque son de corta duración y extensión. Los principales son los que ocurren en las barrancas, los que se presentan en las vialidades y los que se presentan en zonas bajas. Los principales aspectos ligados con cada uno de ellos son:



a) Problemas en las barrancas

En las zonas periféricas de la ciudad se conservan todavía los ríos en forma natural (no han sido entubados), pero el crecimiento urbano ha provocado un aumento en la magnitud y la velocidad de los escurrimientos. En estos ríos, la mayoría del poniente de la ciudad, pero algunos del sur, y otros en la vertiente de la sierra de Guadalupe, la mancha urbana ha ocupado por una parte los cauces y por otra las barrancas, propiciando problemas que ponen en riesgo no sólo las propiedades, sino, lo que es peor, la vida de la población. Así, en el año 1998 tuvimos problemas muy importantes en Cuajimalpa y Milpa Alta, donde perdieron la vida 3 personas y se dañaron muchas casas, y en 1999, en el río Cuauhtepec, al menos en tres ocasiones.

Adicionalmente se han presentado deslaves en varias barrancas y existe un gran número de casas en riesgo de venirse abajo por estar construidas en la orilla de las barrancas y muchas veces en zonas de rellenos. (Fig.5.19)



Fig. 5.19 Zonas de inundación

Para disminuir el riesgo, deben tomarse medidas de largo plazo (reforestación, fijación de cuencas, presas de gaviones, etcétera) y acciones urgentes que implican ofrecer alternativas de vivienda a quienes están en situación de riesgo.



b) Problemas en las vialidades

Cuando ocurren tormentas de gran intensidad, la capacidad de drenaje de la red secundaria (y en algunos casos primaria), resulta insuficiente durante algunas decenas de minutos.

El problema se presenta principalmente en vialidades que se encuentran abajo del Interceptor del Poniente (donde los colectores pierden pendiente), es decir, desde el periférico hasta Insurgentes, pero ocurren también en depresiones (en los llamados columpios y los pasos a desnivel). Estos encharcamientos producen daños económicos por el retraso en las actividades de la población y efectos negativos en la imagen del Gobierno del Distrito Federal.

Aunque es práctica y económicamente imposible resolver definitivamente estos problemas, sí pueden lograrse mejoras importantes que permitan reducir el nivel y el tiempo de los encharcamientos. Así, en los últimos años se ha trabajado con buenos resultados en los pasos a desnivel de avenida Chapultepec con Insurgentes; Diagonal San Antonio con Periférico; la zona del Caracol, frente a Periférico Sur, etcétera, y se tienen estudiados 80 sitios adicionales para reducir sensiblemente los encharcamientos los próximos años.

c) Problemas en zonas bajas

En muchas ocasiones se han asentado desarrollos urbanos en zonas bajas bastante amplias, en las que naturalmente el escurrimiento tiende a acumularse. Estos casos, de los cuales el conjunto "Ejército de Oriente" es un ejemplo claro, aunque pueden clasificarse como locales, requieren de soluciones ligadas al Sistema General de Drenaje; esto es; requiere hacer una conexión a algún punto de la red primaria con menor cota que el punto más bajo del asentamiento y, a su vez, verificar que la red primaria escogida tenga capacidad para conducir la descarga adicional hasta el Sistema Principal.

Por otra parte, dado que tanto los colectores de la red primaria, como el Sistema Principal de Drenaje, trabajan frecuentemente con carga, puede ocurrir (como ya ocurrió en "Ejército de Oriente") que los niveles en estos sistemas (ya sea la red primaria o el Sistema Principal) induzcan un derrame de aguas



negras que inunde la zona baja. La solución a este problema es compleja y está ligada a los problemas globales que se comentarán más adelante.

B. Problemas Globales

Los problemas globales de control de avenidas en la ciudad, están relacionados con lluvias más persistentes y generalizadas en la cuenca que, afortunadamente, ocurren con menor probabilidad que las típicamente convectivas. No obstante, es muy importante darles solución porque la insuficiencia del Sistema General de Drenaje puede dar lugar a inundaciones verdaderamente catastróficas.

En la actualidad ya se han presentado evidencias de que la capacidad de descarga del sistema general es insuficiente: Muchos tramos del Sistema de Drenaje Profundo han trabajado con carga varias veces al año y ya se ha presentado el caso de que el agua negra suba por las lumbreras y se derrame en las calles (el caso más reciente fue el derrame por la lumbrera 3 del Interceptor Oriente-Oriente, que inundó la zona de Ejército de Oriente). Lo mismo ha ocurrido con el Interceptor Poniente, donde ha sido necesario tapar la parte superior de las lumbreras más bajas y en el río Churubusco, que ha derramado por sus chimeneas.

Las razones por las que el Sistema General está en una situación tan crítica, son diversas. A continuación se describirán las más importantes:

El balance entre la capacidad de descarga y el área incorporada al servicio, ha sido cada vez más desfavorable para la primera. Por una parte de las tres salidas del valle (tajo de Nochistongo, emisor profundo y Gran Canal), el Gran Canal ha venido reduciendo paulatinamente su capacidad de descarga de 90 m³/s hace 30 años a 12 m³/s actualmente, y por la otra, el Sistema de Drenaje Profundo, además de suplir la falta de capacidad del Gran Canal, ha recibido la conexión de áreas cada vez mayores para drenar las zonas Sur y Sureste de la ciudad.

La solución a este problema, para un horizonte de unos 25 años, fue planteada en el Plan Maestro de Drenaje en 1995. Está integrada por obras que incrementarán la capacidad de descarga en 40 m³/s por el oriente y 30 m³/s por el poniente, así como la capacidad de almacenamiento para regulación de avenidas



en 5.5 millones de m³, las cuales implican inversiones cuantiosas y tiempos de construcción de varios años.

Ante lo dramático de la situación, es necesario que, antes de la temporada de lluvias del año 2001, se realicen trabajos urgentes, dentro de los que destacan.

a) La construcción de un dique en el Gran Canal, aguas abajo de su confluencia con el Dren General del Valle, y una planta de bombeo con capacidad de 40 m³/s para traspalear el agua hacia el norte del dique. Esta obra beneficiará a toda el área Metropolitana (inclusive al riego en Hidalgo) y es urgente concertar con la Comisión Nacional del Agua su realización inmediata y la aportación económica que corresponde a cada entidad beneficiada.

b) La construcción de una estructura de control entre las lumbreras 3 y 6 del Interceptor del Oriente para, teniéndola abierta, permitir el drenaje de "Ejército de Oriente" frente a una lluvia local, pero cerrándola, impedir que una sobrecarga en el Drenaje Profundo provoque un derrame por la lumbrera 3.

c) La construcción de una planta de bombeo de 30 m³/s a la salida del Interceptor poniente, para evitar el remanso que produce actualmente la descarga ahogada.

d) Debido a la falta de capacidad del Gran Canal, el Emisor Profundo tiene que trabajar inclusive en la época de estiaje, por lo que no ha sido posible hacer labores de mantenimiento desde hace años

Consideraciones finales

Como ha venido sucediendo, desde la época de los Aztecas, las inundaciones forman parte fundamental de la problemática de la Ciudad de México. Actualmente se tiene un rezago acumulado en la capacidad de descarga, de tal forma que el riesgo de inundaciones catastróficas es ya muy alto.

Las obras de emergencia que aquí se proponen deberán estar en funcionamiento para la próxima temporada de lluvias y las de la solución a mediano plazo, que se plantearon en lo fundamental desde 1995, deben realizarse con un programa intenso que debe aplicarse lo antes posible, aunque signifique



grandes inversiones. En caso contrario, no pasarán muchos años para que se presenten inundaciones que podrían afectar a millones de personas.

Debemos pensar también en el largo plazo, tomando en cuenta que, si no se detiene el crecimiento de la población en el Valle, las soluciones serán cada vez más difíciles y costosas, no sólo en relación con las inundaciones, sino con todos los servicios, dentro de los que destaca el abastecimiento de agua potable y el problema del transporte.

5.2.3 Químicos

Desde 1950 se ha acelerado el desarrollo industrial y tecnológico de México, lo que conlleva el uso de una amplia variedad de sustancias químicas, necesarias para la elaboración de nuevos productos para uso doméstico, agrícola e industrial; esto genera residuos de diversos tipos, tanto tóxicos como no tóxicos, los cuales se vierten al suelo, agua y aire, ocasionando la consecuente contaminación del ambiente.

Las zonas industriales se encuentran distribuidas en toda la extensión del país, aunque existen sitios donde su número es mayor, como sucede en la zona centro (Estado de México, Querétaro, Puebla, Ciudad de México, Guanajuato), zona norte (Baja California Norte, Chihuahua, Nuevo León) y zona sureste (Oaxaca, Veracruz, Tabasco).

Las materias primas en ciertas zonas se transportan por diversas vías (carretera, ferro-carril, barco y tubería) hacia otro lugar donde se usan en distintos procesos de fabricación. El transporte de las sustancias químicas implica un riesgo, ya que en caso de que ocurra un accidente que provoque eventos como fuga, incendio, explosión o derrame del material, se puede ocasionar daño físico al ser humano, al medio ambiente o a la propiedad.

Por lo anterior, se debe conocer dónde se producen las sustancias químicas, cuáles son las rutas utilizadas en su transporte y cuáles son los sitios donde se utilizan, así como los residuos que se generan en los procesos de transformación y las características de peligrosidad que presentan. Los sitios donde se tratan o depositan las sustancias estabilizadas también deben de estar perfectamente bien ubicadas.



El objetivo principal, como hemos visto a lo largo de este trabajo de tesis, es minimizar los riesgos a los cuales está expuesta la población debido a la presencia de los materiales peligrosos que se tienen en territorio nacional.

Definición de los riesgos y accidentes de origen químico

Los riesgos que implica una actividad industrial pueden ser clasificados de la siguiente manera:

Riesgos convencionales. Son aquellos ligados a las actividades laborales (por ejemplo: riesgo de caídas desde escaleras, accidentes por descargas eléctricas, riesgos derivados de maquinaria, etc.).

Riesgos específicos. Relacionados con la utilización de sustancias particulares y productos químicos, que por su naturaleza, pueden producir daños de corto y largo alcance a las personas, a las cosas y al ambiente.

Grandes riesgos potenciales. Ligados a accidentes anómalos, que pueden implicar explosiones o escapes de sustancias peligrosas (venenosas, inflamables, etc.) que llegan a afectar vastas áreas en el interior y exterior de la planta. El riesgo total que presenta una instalación industrial está en función de dos factores (SEDESOL, 1994).

Riesgo intrínseco del proceso industrial, que depende de la naturaleza de los materiales que se manejen, de las modalidades energéticas utilizadas y la vulnerabilidad de los diversos equipos que integran el proceso, así como la distribución y transporte de los materiales peligrosos.

Riesgo de instalación, el cual depende de las características del sitio en que se encuentra ubicada, donde pueden existir factores que magnifiquen los riesgos que puedan derivar de accidentes (condiciones meteorológicas, vulnerabilidad de la población aledaña, ecosistemas frágiles, infraestructura para responder a accidentes, entre otros). Se definen a continuación los términos relativos a los principales accidentes:



➤ Derrame

Es el escape de cualquier sustancia líquida o sólida en partículas o mezcla de ambas, de cualquier recipiente que lo contenga, como tuberías, equipos, tanques, camiones cisterna, carros tanque, furgones, etc.

➤ Fuga

Se presenta cuando hay un cambio de presión debido a rupturas en el recipiente que contenga el material o en la tubería que lo conduzca.

➤ Incendio

Es la combustión de materiales.

➤ Explosión

Es la liberación de una cantidad considerable de energía en un lapso de tiempo muy corto (pocos segundos), debido a un impacto fuerte o por reacción química de ciertas sustancias. Desde el punto de vista del diagnóstico del riesgo, el manejo de las sustancias químicas representa una amenaza o peligro cuyo potencial es difícil de establecer debido al número indeterminado de sustancias químicas que se tienen en los parques industriales, y aun dentro de la misma instalación.

Es por esta razón que las empresas presentan los estudios de estimación de riesgo para las sustancias que tienen mayor probabilidad de ocasionar un accidente, en función de las cantidades que se manejan y de sus propiedades fisicoquímicas y tóxicas.

En cuanto al diagnóstico del peligro para los fenómenos químicos, éste se puede expresar en términos de concentración de la sustancia que se fugó o derramó y para el caso de un incendio o explosión se considera la cantidad de calor expresada en las unidades correspondientes, así como la fuerza necesaria para desplazar a un individuo una cierta distancia sin causarle un daño al organismo.

Con base en estos datos, se determinan las zonas de afectación y las de amortiguamiento, sobre las cuales se deben de evitar los asentamientos humanos. Para el caso de los eventos causados por materiales químicos, el peligro se puede definir en términos de parámetros con un significado físico preciso que permite utilizar una escala continua de la intensidad de la dispersión de la sustancia que se



puede transferir al ambiente y que tenga un límite de concentración establecido, el cual no afecte a la salud de un individuo expuesto a la sustancia tóxica.

Los modelos matemáticos son una herramienta para determinar un posible radio de afectación y definir la exposición, la cual puede comprender: el tamaño del sistema expuesto al fenómeno químico en términos de la cantidad de población afectada, el costo de la infraestructura, así como el costo de actividades de restauración de los ecosistemas dañados.

Todos los modelos y metodologías para estimar el riesgo químico tienen sus limitaciones y la interpretación de los resultados requiere de personal capacitado y con gran habilidad, ya que es bien sabido que no hay dos accidentes químicos iguales.

Además los modelos no abarcan las combinaciones sucesivas y paralelas de eventos ocasionados por dos o más sustancias, ni las reacciones combinadas de los di-versos materiales dentro de una o varias industrias de la zona. Se menciona que otro aspecto esencial de los diagnósticos de riesgo es la necesidad de plantear en términos de probabilidades los distintos factores que influyen en él.

Los fenómenos que pueden provocar desastres químicos son, en general, altamente impredecibles en cuanto al momento de ocurrencia, pero pueden estimarse en cuanto a su magnitud y sitio específico de impacto, si se utilizan los datos de ubicación de los materiales peligrosos que pueden causar el daño.

Es factible definir escenarios de accidentes extremos si se consideran los eventos máximos catastróficos en función de una serie de variables que se fijan, como son: las características específicas de las sustancias involucradas (peso molecular, punto de ebullición, densidad, volumen en condiciones normales, capacidad calorífica, límites inferior y superior de explosividad, calor de combustión, entre otras), las condiciones del proceso (temperatura, volumen del contenedor, diámetro del orificio en caso de fuga) y condiciones meteorológicas.

El potencial del desastre químico también depende de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos, o sea de su predisposición a ser afectados por un agente químico perturbador. Así un parque industrial donde todas las plantas químicas manejan programas de preparación y respuesta a emergencias a nivel interno



y se coordinan con las otras plantas químicas, las autoridades y la comunidad aledaña, para manejar el accidente a nivel externo, resulta menos vulnerable ante la ocurrencia de un accidente, que otra zona industrial donde no exista preparación para responder a una emergencia.

Lo mismo sucede con la preparación para la atención de emergencias en el transporte de sustancias químicas: la vulnerabilidad en las vías de comunicación se reduce cuando se capacita al personal que se vería involucrado en la emergencia, como son los empleados de las empresas transportistas, las autoridades locales y los servicios de apoyo (Cruz Roja, Bomberos, Ejército y Marina, etc.). La responsabilidad en el manejo de las sustancias se comparte entre las empresas, las autoridades y la comunidad en riesgo.

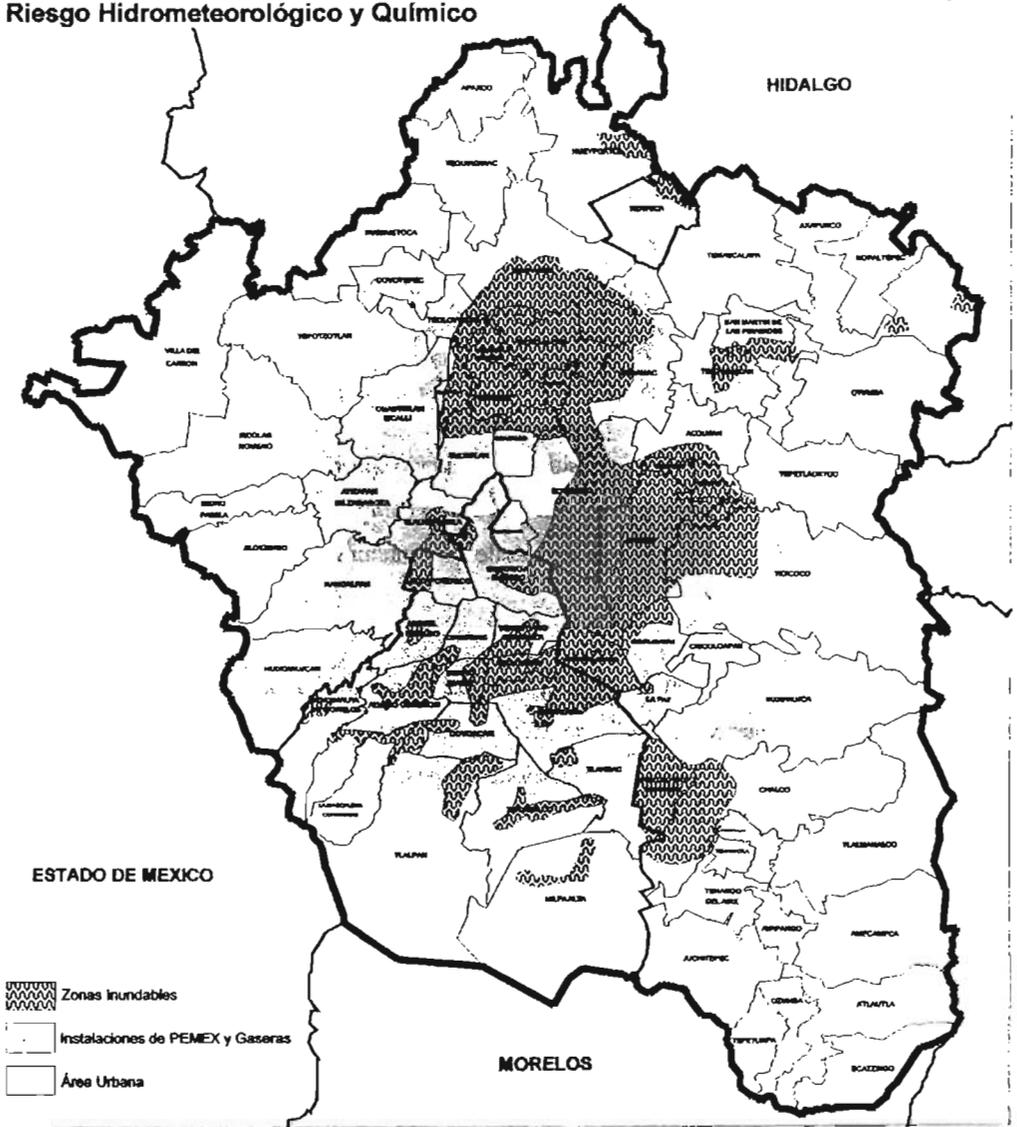
La calificación de riesgo que representa un sitio contaminado con sustancias químicas peligrosas se basa en el potencial de afectar la salud pública y/o ambiente. Para evaluar el riesgo se debe considerar la concentración y las características físico-químicas de los contaminantes en cada medio y la presencia de receptores que puedan ser afectados.

Para terminar en la (Figura 5.20) se presenta el mapa de riesgos tanto hidrometeorológicos como los químicos dentro de la cuenca del Valle de México, este mapa nos presenta las zonas de riesgo por inundación, así como la localización de instalaciones de posible riesgo químico, para la cuenca del Valle de México.



Zona Metropolitana del Valle de México Riesgo Hidrometeorológico y Químico

Mapa 3



- Zonas inundables
- Instalaciones de PEMEX y Gaseras
- Área Urbana

- Límites**
- Límite de la ZMVM
 - Límite estatal

Capítulo VII
Zona Metropolitana del Valle de México
Riesgo Hidrometeorológico y Químico
 Unidad de Estudios Tecnológicos
 Marzo de 2000
 Fuente: Elaboración propia con base en el Atlas Nacional de México

Escala aproximada
1 : 580,000

INEGI **Instituto de Estadística y Geografía**

Fig. 5.20 zonas de riesgos Hidrometeorológicos y Químicos, para la Cuenca del Valle de México



CAPITULO VI

CASO HISTORICO, ZONA DE SANTA CATARINA

Como parte de este trabajo de tesis se planteo analizar un caso real de riesgo que ocurre dentro de las limitaciones de la Cuenca del Valle de México, se escogió el área de Santa Catarina Yacahuizotl, éste lugar es muy representativo del tema de este trabajo, ya que como sabemos las fuentes de abastecimiento de agua potable más importantes de la zona metropolitana de la Cd. de México son los mantos acuíferos subterráneos. En la zona de Santa Catarina se encuentra un acuífero muy importante, ya que este abastece la Delegación Tláhuac, Chalco, Los reyes La Paz, San Miguel Teotongo y parte de la Cd. Nezahualcoyotl, desafortunadamente también en esta zona, por las características geológicas que presentaba el cráter del volcán de La Caldera, se escogió como tiradero de basura, convirtiéndose como uno de los más grandes de la zona metropolitana de la Cd. de México. En éste tiradero llegan todo tipo de desperdicios municipales, industriales y de hospitales; propiciando la generación de lixiviados que han llegado a contaminar el manto acuífero que se encuentra en la zona.

6.1 Descripción de los factores que intervienen en la formación de lixiviados.

En el caso como es México considerado como un país en vías de desarrollo, los sitios de disposición de residuos sólidos, la mayoría de las veces, se ubican en lugares seleccionados arbitrariamente. Estos sitios, como lo es el de Santa Catarina, suelen convertirse en una fuente potencial de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. En estas condiciones inapropiadas se produce la infiltración del agua de lluvia hacia los residuos sólidos, generando líquidos que se percolan extrayendo el material disuelto o suspendido (lixiviado).

En este capítulo se describirá la formación de lixiviados en un sitio de disposición de residuos sólidos, para explicar la posible contaminación del agua cerca de uno de los tiraderos más grandes de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

El suelo que rodea a este tiradero expuesto a disposición de residuos sólidos es de gran importancia, tanto por su naturaleza, litología, concentración en materia orgánica y en organismos vivos, así como por



sus características hidrogeológicas, debido a que existe la posibilidad de escurrimientos y dilución de los lixiviados. El volumen de lixiviación producido en un sitio es función de la capacidad de absorción del suelo, área expuesta, composición, localización, material de cubierta y cantidad de recarga por infiltración.

Cuando el agua se pone en contacto directo con los residuos sólidos, se abre la posibilidad de iniciar procesos de contaminación. Muchos materiales en los residuos sólidos son solubles en el agua, en cambio otros se forman como productos solubles de la degradación natural de los residuos sólidos. En general, la mayor parte de agua que fluye a través de los residuos sólidos, arrastra una alta concentración de contaminantes.

Un sitio de disposición de residuos sólidos, se debe considerar, como un medio en constante evolución, en donde se realizan reacciones fisicoquímicas, químicas y biológicas. Estas reacciones son las responsables de: la solubilización, precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico o generación de gases de algunos materiales contaminantes. También contribuyen las reacciones de degradación biológica de materiales disueltos y suspendidos que se efectúan por vía aerobia o anaerobia, según las condiciones del medio.

Estas reacciones tienen como resultado la formación de metabolitos susceptibles de interactuar con otros elementos contaminantes por ejemplo, la formación de complejos metálicos. Las consecuencias directas de estas transformaciones son la liberación de gas y la formación de lixiviado.

Los factores que influyen principalmente en la formación de lixiviado son el agua de lluvia que se infiltra en la masa de residuos, las condiciones hidrogeológicas del sitio de disposición y las etapas bioquímicas de la degradación de los residuos sólidos.

Son importantes las características hidrogeológicas de los sitios de disposición de residuos sólidos debido al escurrimiento y dilución de los lixiviados. La contaminación que puede resultar de la migración de los lixiviados, depende de:



- a) la capacidad de retención de la zona no saturada de agua respecto a la cantidad global de contaminación liberada, y
- b) la capacidad de dilución y dispersión de la zona saturada de agua.

En la figura 6.1 se pueden apreciar los mecanismos de atenuación de contaminantes en las zonas saturada y no saturada de agua.

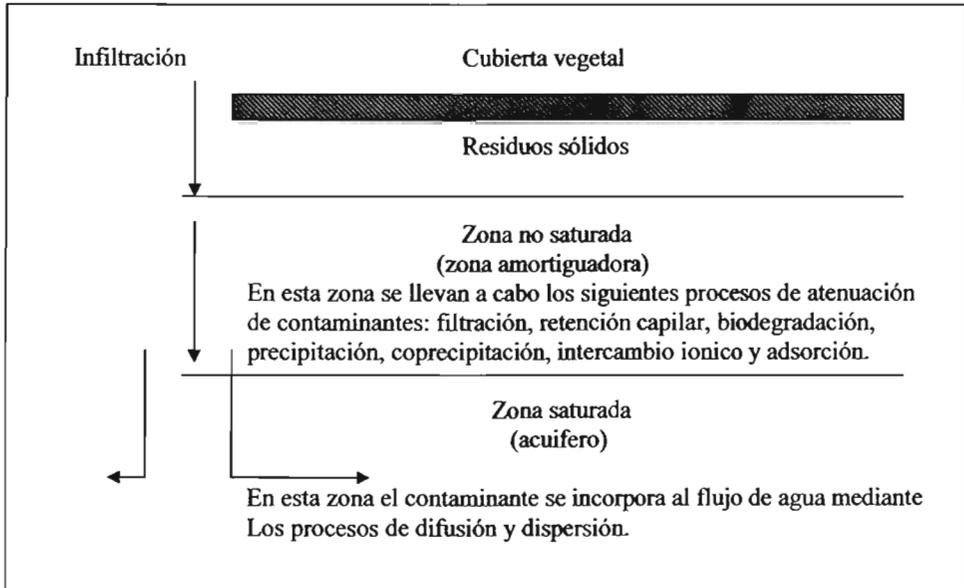


Fig. 6.1 Mecanismos de atenuación en la zona no saturada y mecanismos de incorporación del contaminante en la zona saturada de agua.

Escurrecimiento de los lixiviados en la zona no saturada. La zona no saturada, es decir, la franja de terreno situada, entre la superficie del suelo y la zona saturada está caracterizada por la presencia de tres fases: líquida, sólida, y gaseosa. El escurrecimiento en esta zona es esencialmente vertical; el agua y los productos disueltos (solutos) se desplazan a velocidades diferentes debido a la acción de las fuerzas ocasionadas por las tensiones superficiales. El escurrecimiento es mucho más lento que en la zona saturada de agua.



En la zona no saturada, es en donde se elimina la mayor parte de la contaminación acarreada por los lixiviados, mediante procesos físicos, químicos y bioquímicos.

Los procesos físicos de atenuación de contaminantes, que se llevan a cabo en la zona no saturada son:

- a) filtración, al llevarse a cabo este proceso, los medios porosos juegan el papel de filtro para el lixiviado, atrapando una parte de la materia orgánica en suspensión y a los microorganismos.
- b) Retención capilar, en este caso, a medida que la contaminación llega a la zona saturada, una parte de la carga contaminante es detenida en el agua capilar de la zona no saturada.

Dentro de los procesos bioquímicos, se lleva a cabo la biodegradación de la materia orgánica mediante los microorganismos que se desarrollan en los residuos, aunque estos no pueden sobrevivir al pasar el suelo, debido a que las condiciones de vida son muy diferentes en estos dos medios.

Los procesos químicos que se llevan a cabo en esta zona son:

- a) precipitación y coprecipitación, estos procesos se podrán llevar a cabo dependiendo de las condiciones de PH, produciéndose una disminución importante de la carga contaminante por precipitaciones de hidróxidos metálicos y de sales como, carbonatos, fosfatos y/o sulfatos.
- b) Intercambio de iones, ciertos constituyentes del suelo tienen la propiedad de intercambiar iones presentes en el lixiviado que se infiltra. El intercambio iónico puede incluir a los cationes y en menor medida a los aniones; el intercambio iónico se lleva a cabo por contacto de las estructuras coloidales. Las principales sustancias capaces de realizar intercambio iónico son la materia orgánica, como el humus; los minerales zeolíticos, el hidróxido férrico y ciertas arcillas. Entre las arcillas, la montmorillonita tiene la característica de fijar cationes sobre los lados y los planos de sus hojas, esto le permite tener una capacidad de intercambio iónico superior a la caolinita y a la illita, que fijan iones solamente sobre los lados de sus hojas. Esta capacidad de intercambio aumenta con el pH.
- c) Adsorción, las sustancias disueltas o en suspensión en el lixiviado pueden ser adsorbidas sobre las partículas que constituyen el subsuelo. Esta adsorción es muy variable, según el tipo de contaminante y de suelo; un suelo podrá adsorber más, a medida que su superficie específica sea



más grande; así un suelo con gran cantidad de materia orgánica adsorbe mucho más que el mismo suelo sin materia orgánica.

6.2 Daños causados por lixiviados.

En un relleno sanitario, la acumulación de agua causa que los lixiviados fluyan hacia abajo y transversalmente. El flujo hacia abajo puede llegar a contaminar el agua subterránea. Los flujos transversales de lixiviados se dispersan en la periferia del tiradero o se filtran en corrientes o en otros cuerpos de aguas superficiales.

En situaciones donde los tiraderos de basura están localizados sobre materiales relativamente permeables, tales como arena, grava o rocas fracturadas, la migración de los lixiviados puede causar contaminación en áreas muchas veces tan grandes o más que las ocupadas por los tiraderos de basura.

La contaminación de aguas superficiales y subterráneas se puede evitar si los tiraderos se ubican en sitios hidrogeológicamente apropiados. Aún cuando éstos se cambiaran de sitio, la contaminación por lixiviados puede continuar por varias décadas.

Además de la producción de lixiviados, su infiltración en el terreno puede generar gases, al llevarse a cabo la descomposición bioquímica de la materia orgánica. Los gases que más se producen son el CO_2 y el CH_4 .

El metano tiene una baja solubilidad en el agua, no tiene olor, y generalmente tiene poca influencia en la calidad del agua subterránea. Sin embargo, la producción de metano puede llegar a niveles peligrosos, cuando por difusión pasa a través de la zona insaturada a terrenos adyacentes, donde puede dañar a la vegetación y producir problemas de olor.

La contaminación por lixiviados puede causar daños agudos y crónicos sobre la salud de la población en general. Lo anterior incluye enfermedades, daños en la piel, parálisis parcial, daños cerebrales y hasta la muerte. Además puede causar severos daños económicos, tensiones, inconveniencias y pérdidas para los



dueños de la tierra, así como afectar animales, plantas de ornato y otro tipo de vegetación.

6.3 Marco Geológico.

La Cuenca de México como se ha visto es de carácter lacustre, donde la corteza ha sufrido grandes esfuerzos, produciéndose un intenso fracturamiento. Está circundada por elevadas montañas y cubierta en diferentes puntos por áreas lacustres producto de los lagos que existieron al final de la época glacial. Al cerrarse la cuenca, en el Cuaternario Superior, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros. Podrían mencionarse en el centro, el lago de México, al Este el de Texcoco, al Sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban uno solo y al Norte el de Zumpango.

El área de estudio se encuentra en lo que fisiográficamente se denomina Faja Transvolcánica Mexicana, en el centro de la Cuenca del Valle de México y en particular para este caso lo que se llama la Subcuenca de Chalco.

La Subcuenca de Chalco se localiza al Sur de la Cuenca de México y de la zona urbana de la Ciudad de México (figura 6.2 y 6.3). Queda limitada al norte por las estribaciones de la Sierra de Santa Catarina, constituida principalmente por lavas fenobasálticas y tobas del plioceno y del Cuaternario, ubicándose también en el Cerro El Pino, caracterizado por rocas más antiguas que la Sierra de Santa Catarina. Presenta sucesiones de lavas basáltico-andesíticas, con intercalaciones de piroclastos. También se observan algunos depósitos calcáreos en las partes altas.

Tomando parte de esta formación los conos cineríticos de san Nicolás y Xaltepec y el volcán con dos conos anidados conocidos como la Caldera, que constituye una prominente estructura que se eleva directamente del piso del antiguo lago. Estos conos parecen ser morfológicamente intermedios entre conos de escoria y anillos de tefra. La permeabilidad de las formaciones de Santa Catarina es de media a alta. Al sur encontramos algunas estructuras constituidas por tobas, andesitas, dasitas y riolitas, pertenecientes al grupo Chichinautzin. Al Oeste se encuentra el área chinampera de Tláhuac, sobre depósitos lacustres y aluviales. Este paquete sedimentario se encuentra constituido principalmente por cenizas volcánicas, material piroclástico, tobas, brechas y arcillas. Al Este, se encuentra limitada por la Sierra Nevada

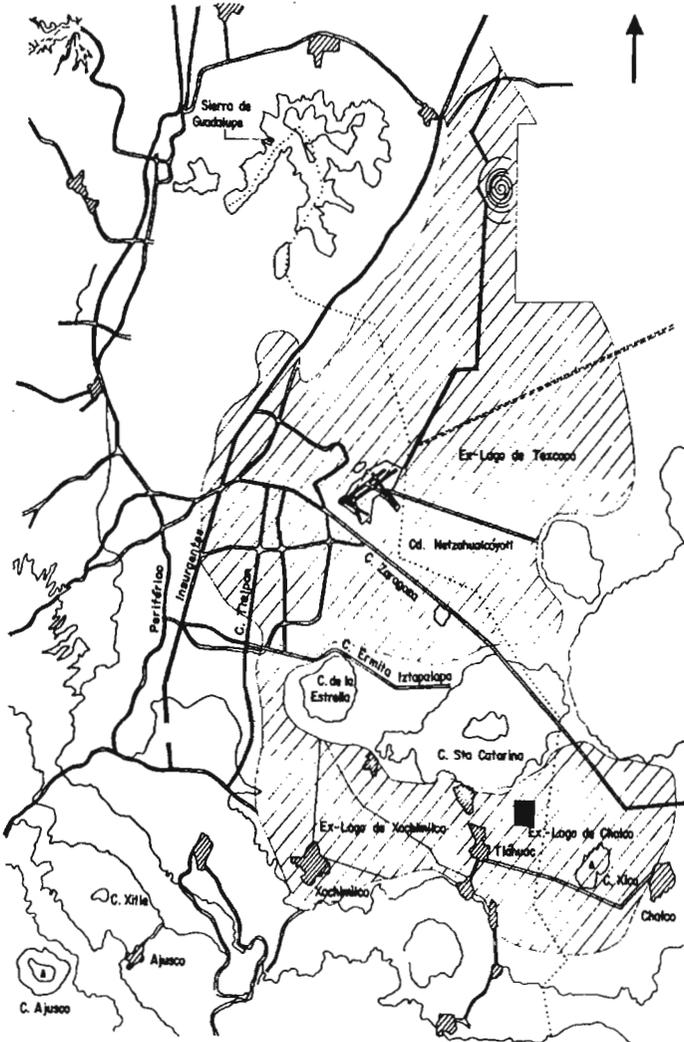


Figura 6.2 Ubicación de Santa Catarina



6.4 Situación Hidrogeológica.

En el área de Santa Catarina hasta antes de la perforación de la batería de pozo profundos (1981), solo existían norias y pozos someros que producían agua mineralizada, con un contenido de sales entre 1,100 y 1,160 mg. /l y nivel estático entre los 1 y 5 metros de profundidad.

En 1981, con la construcción de la batería de pozos se pudo tener un mejor panorama hidrogeológico de la zona (Fig. 6.2).



Figura 6.4. Batería de Pozos

El acuífero se encuentra principalmente en depósitos lacustres y sedimentos del cuaternario (aluviones con cenizas volcánicas y arcillas bentónicas). El espesor de éstos se estima mayor de 600 m. en estos sedimentos se identificaron dos lentes de arcillas de poca extensión y espesor. La zona saturada con agua mineralizada presentó un espesor medio de 220 m. está se encontró sobre un cuerpo de agua dulce cuyo espesor es difícil de precisar considerándose un mínimo de 200 m. es posible que bajo de él existan otros depósitos de agua mineralizada. En la primera zona, en los pozos 8 y 9 de la batería se detectó un lente de agua de buena calidad, con un espesor de 36 m.



Se cuenta con una batería de 14 pozos de extracción separados 400 metros en serie, su profundidad es de 400 m. la batería opera las 24 días con gastos del orden de 90 m/s por pozo.

El sistema acuífero local está constituido por un acuitardo y un acuífero confinado, cambiando su carácter hidráulico en sus límites.

El paquete sedimentario presenta un amplio intervalo de variación debido a la heterogeneidad del material granular.

El régimen del flujo subterráneo, al nivel regional, se caracteriza por tener una dirección preferencial N-S en la parte norte de la Subcuenca de Chalco y la dirección contraria en la parte Sur, resultado de la ubicación de las Sierras circundantes que actúan como zonas preferenciales de recarga del sistema. Este flujo alimenta directamente el material granular, los piroclastos y rocas fracturadas que constituyen el acuífero en explotación y que se encuentran bajo los depósitos lacustres.

Superficialmente, no se puede hablar de recarga por infiltración en toda la zona, debido al contenido de material, de grano fino de los suelos, que confiere una baja permeabilidad a los mismos, por lo que en la parte central se observan acumulaciones someras de agua.

En las márgenes sur de la Subcuenca de Chalco han existido manifestaciones superficiales del nivel freático (tanto manantiales de agua dulce como mineralizada), que han desaparecido en razón directa del descenso paulatino del nivel piezométrico tornándose en sumideros que son actualmente aprovechados por los habitantes de la zona para canalizar sus descargas de aguas negras.

El acuífero actualmente en explotación puede presentar entre 3000 y 400 m de espesor en sus partes más profundas. Los pozos de explotación ubicados en él son diseñados con ademe ciego en su parte superior y rasurados en la inferior, para evitar afectar el cuerpo de agua mineralizada. El acuífero anterior presenta contenidos entre 300 y 300 mg/l de sales.

Se ha generado una zona de transición del proceso de mezcla entre el agua mineralizada del acuitardo y



la dulce del acuífero inferior. La extracción se efectúa en el acuífero lo que ha provocado flujo vertical descendente del acuitardo hacia el acuífero, por compactación del material. No es posible evaluar este aporte, ya que el acuitardo está constituido por una alternancia de material granular (arcillas, arenas) cuyos valores de compresibilidad y permeabilidad son variables y difíciles de evaluar.

El agua del acuífero proviene de la recarga por infiltración de la precipitación de las Sierras del Chichináutzin y Guadalupe. Su circulación es relativamente rápida ya que se da a través de un medio fracturado de alta permeabilidad en las zonas de infiltración para fluir después por formaciones granulares de porosidad variable. La saturación del acuitardo ocurrió paralelamente al proceso de sedimentación en un ambiente lacustre lo que provocó también su mineralización.

El origen de los depósitos lacustres está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra Chichináutzin.

La configuración obtenida para la cima del acuitardo explica en parte la dirección del flujo regional, sugiriendo que la recarga proviene de la Sierra de Guadalupe y que alimenta las partes más profundas del acuífero, ubicadas aproximadamente bajo la zona urbana de San Pedro Tláhuac. Sin embargo, la recarga por infiltración es mayor en las partes Sur y Este donde los espesores del acuitardo son menores; el flujo parece dirigirse hacia la misma zona, ya que la principal batería de pozos del área se encuentra ubicada en la parte Oriental del máximo espesor del paquete arcilloso.

En esta zona se detectaron dos lentes arcillosos, una a la altura del pozo 3 con un espesor entre 15 y 20 m, y poca continuidad lateral y otro mucho más grueso cercano al pozo 8 con un espesor cercano a los 90 m. todo hace indicar de que se trata de un paquete arcillo-arenoso.

La parte inferior corresponde a un paquete granular saturado con agua de buen calidad su espesor es mayor de 200 m.



6.5 Consideraciones sobre la vulnerabilidad de la Subcuenca de Chalco.

En la Subcuenca de Chalco las formaciones de buena permeabilidad se encuentran por debajo de mantos lacustres cuyo espesor va de unos cuantos metros en las márgenes hasta más de 300 metros en la zona de Tláhuac. Esta configuración geológica juega un papel relevante en los procesos de lixiviación de contaminantes superficiales.

El acuífero semipermeable, en gran parte asociado a la misma formación lacustre, sobre los acuíferos granulares actualmente en explotación, presenta en la Subcuenca de Chalco espesores variables de algunos cientos de metros y mineralización del agua (1000–1200 mg/l). La baja permeabilidad del primero disminuye pero no anula del todo la infiltración al acuífero granular al que esta unido. Por ello, resultan evidentes las siguientes consideraciones:

- 1) la presencia señalada de una zona de transición, caracterizada por la mezcla de agua de un acuífero con cierta salinidad, y el acuífero granular que presenta contenidos relativamente bajos de sales (200-300 mg/l).
- 2) la variación en la concentración de alguna especie química en el agua extraída del acuífero, con respecto al régimen pluviométrico. Estas variaciones pueden ser fácilmente explicadas en términos de los intercambios entre los acuíferos.
- 3) La coherencia en la variación de las especies químicas con la localización de pozos y su relación con las fuentes contaminantes, principalmente en la batería de pozos de Santa Catarina.

Estos hechos evidencian la crítica situación del sistema acuífero de Chalco, caracterizado en su parte superior por un acuífero salino de mayor densidad. Resultan por ello tan evidentes las atribuciones naturales de esta agua al mezclarse con el agua que presenta menor densidad. El riesgo de que sustancias contaminantes, relacionadas con actividades humanas, se transfieran al acuífero de poca salinidad, actualmente en explotación, es una evidencia que debiera ser constantemente vigilada. A la luz de todas estas consideraciones deberá establecerse un cuidadoso balance de entradas y salidas del sistema, con la finalidad de estudiar la eventual disminución del gradiente piezométrico, afortunadamente aun elevado, que podría favorecer una más fácil propagación del frente contaminante.



No es factible, con la información con que se cuenta en este momento, establecer el grado de contaminación del flujo subterráneo, entre otras razones por la ausencia de análisis químicos de compuestos orgánicos.

El canal de desagüe del Río de la Compañía, que fluye de oriente a nor-poniente en la zona, también puede presentar lixiviaciones en aquellas áreas donde predominen arenas de granulometría variable en los sedimentos lacustres y aluvionales de grano fino. Su papel como fuente potencial de contaminación aún no es del todo claro y es difícil de diferenciar del basurero de Santa Catarina. El mismo carácter revisten las infiltraciones que pudieran provenir de las letrinas del área urbana de Santa Catarina, que carecía de servicios de drenaje hasta el año de 1990, cuando se inicia un ambicioso proyecto de dotación de servicios a la comunidad.

Esta hipótesis es corroborada por las acumulaciones someras de agua que se forman en la zona de reserva ecológica después del inicio de la época de lluvias y permanecen un par de meses después.

6.6 El basurero de Santa Catarina.

Este basurero o tiradero a cielo abierto está ubicado en el municipio de la Paz del Edo de México en los límites de la delegación política de Iztapalapa, a un costado de la autopista México-Puebla. Cubre un área de más de 50 hectáreas de las cuales aproximadamente 15 se encuentran sobre la ladera de un cuerpo volcánico, el volcán La Caldera, una gran estructura de forma elipsoidal irregular que se eleva directamente del piso del antiguo Lago de Chalco. Como ya hemos visto forma parte de la Sierra de Santa Catarina integrada por materiales piroclásticos interestratificados de origen basáltico-andesítico. Este volcán de dos cráteres, está formado por material piroclástico, principalmente cenizas basálticas y lapilli, con escasos bloques, lo que le confiere un amplio rango de permeabilidad, de nula a muy alta. Pruebas de permeabilidad con carga variable, realizadas en muestras de suelo del área, han dado valores del orden de 10^{-6} *cm/s*, lo cual indicaría que el terreno es adecuado para la disposición final de residuos; más sin embargo la heterogeneidad litológica y la subsidencia de los sedimentos circundantes pueden generar porosidad secundaria alterando la permeabilidad del medio.



Al inicio de sus operaciones, en diciembre de 1982, era un tiradero a cielo abierto, siendo manejado actualmente como un relleno sanitario. Entre 1985 y 1988 llegó a recibir hasta 8000 ton/día de basura. Recibe desechos domiciliarios y algunos industriales, así como material de demolición (escombro). Se le considera un tiradero de tipo regional ya que da servicio a varias delegaciones urbanas, Iztapalapa, Iztacalco, Benito Juárez y Cuauhtémoc. Actualmente se ha terraceado la falda del volcán para ampliar el área de depósito, al igual que en otros lugares de depósito no existe control de la producción de lixiviados.

Hasta el momento no se han detectado manifestaciones importantes de lixiviación en las márgenes de La Caldera, más sin embargo la comunicación hidráulica entre la parte superficial y los depósitos y/o material que se encuentra al nivel de la carretera, es evidenciada por fugas de humo en las laderas del basurero. La reinterpretación de sondeos eléctricos verticales, efectuados en estudios geofísicos realizados en la zona después del sismo de 1985, ha puesto de manifiesto la posible existencia de una pluma contaminante que alcanza profundidades de hasta 250 metros a un kilómetro hacia el sureste del basurero.

Como punto de referencia para la alteración de la calidad natural del agua subterránea, en el estudio de la pluma contaminante asociada al basurero se tomó la caracterización físico-química y bacteriológica del lixiviado de Santa Catarina que se realizó en los años 90's en la época de lluvias.

Aunque las determinaciones efectuadas son más bien de tipo inorgánico, este antecedente es de gran utilidad, ya que sirvió como marco de comparación para los análisis de las muestras tomadas en los pozos. Un análisis de lixiviado tipo, así como las principales características de construcción y operación de este basurero son resumidos en las tablas VI.1 y VI. 2.

Para finalizar podemos comentar que el tiradero ha sido cerrado debido a que su capacidad fue rebasada y el problema se ha trasladado actualmente al Tiradero del Bordo de Xochiaca, en el que diariamente se reciben cerca de doce toneladas, es decir el 85 % del la basura que genera la Ciudad de México y su zona metropolitana.



Por las razones expuestas podemos comentar que el área que ocupa la Subcuenca de Chalco se encuentra actualmente en un estado de evolución, caracterizado por un desequilibrio más bien delicado.

TIRADERO DE SANTA CATARINA			
Época de lluvias			
TIPO DE ANÁLISIS			
GRUPO	PARAMETROS	UNIDADES	VALOR
FÍSICOS	Ph		5.000
	temperatura	°C	-
	sólidos totales	mg/l	76894
	conductividad eléctrica	Mhos	-
QUÍMICOS	alcalinidad total	mg/l	13600
	dureza total	(CaCO ₃)	4479
	cloruros	mg/l	-
METALES PESADOS TOTALES	hierro total	mg/l	83.350
	cromo total	mg/l	0.830
	zinc total	mg/l	2.600
NUTRIENTES	nitrógeno total	mg/l	3183.000
	fósforo	mg/l	40.800
MATERIA ORGÁNICA	D.B.O (5) total	mg/l	n.e.
	D:Q:O. total	mg/l	105200.000
BIOLOGICO	coliformes fecales	col/100	-
	coliformes totales	col/100	2300.000
ORGANICO	S.A.A.M	mg/l	5.8

n.d. No detectado

TABLA VI.1 Análisis de lixiviado de Santa Catarina

n.e. No existe

- Sin determinación



Inicio de operación	noviembre-diciembre de 1982
Tipo de residuo	domiciliario, mercado, escombro
Recolección de lixiviado	no
Espesor de la capa de residuos	Variable
Densidad de los desechos compactados	.8 ton/ m ³
Volumen diario de desechos depositados	2500 - 2000 ton / día
Profundidad del sitio	D.D.
Área del sitio	>>50 Has
Producción de lixiviado	D.D.
Tipo de material del piso	Tobas intermedias básicas y depósitos volcano-clásticos
Control de fuentes de agua	Ninguno
Inicio de operación como relleno sanitario	1987

TABLA VI.2 Características del basurero Santa Catarina

D.D. Dato desconocido



CAPITULO VII

CONCLUSIONES

7.1 Riesgos

Con la realización de éste trabajo podemos concluir que desde el punto de vista humano muchas de las ciudades constituyen un riesgo ya que un gran número de personas y un enorme patrimonio se concentran en una cierta región, como es el caso del Valle de México y en especial de la Ciudad de México, una de las ciudades más pobladas del mundo. Por este y muchos otros motivos la cuenca de México representa un serio problema debido a su amplia gama de riesgos, naturales y de otro tipo, la Cuenca de México representa un ejemplo de área en donde se concentran los más importantes riesgos relacionados con aspectos naturales (de origen geológico, hidrogeológico, sísmico, hidrometeorológico, ambiental y hasta social).

Los riesgos naturales mayores que nos han interesado en este trabajo son el riesgo sísmico, se recordó en este trabajo el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985, que trastornó un área de unos 800, 000 km², el riesgo por inundaciones, se hizo notar que la ciudad está construida en un área de origen prevalentemente lacustre en que se descarga un sistema de drenaje natural de tipo endorreico que contribuía al levantamiento de los niveles hídricos de los antiguos lagos, provocando terribles inundaciones y favoreciendo la amplificación de las ondas sísmicas a causa de las características litológicas de los terrenos.

Podemos comentar que a partir del temblor de 1985 la Cuenca del Valle de México ha sido estudiada más a detalle mediante la aplicación de metodologías de investigación de tipo geofísico y de tipo directo como ha sido la creación de pozos explorativos profundos, que han permitido, entre otras cosas, la reinterpretación de perforaciones ya realizadas y definir mejor las sucesiones estratigráficas reconstruidas para el subsuelo de la misma cuenca.

7.1.1 Riesgo sísmico

En mucho el riesgo sísmico en la cuenca del Valle de México depende de las condiciones geotécnicas.



El crecimiento de la ciudad de México se ha caracterizado, entre otros aspectos, por la ausencia de un plan de ordenamiento territorial y por una completa anarquía en el cambio de uso de suelo, con ello se ha propiciado que la vulnerabilidad de la población ante fenómenos geológicos se incremente considerablemente. Debe mencionarse, dadas las características geológicas por una parte y la diversidad de usos de suelo, que en el valle de México existen igualmente diversas zonas más o menos seguras para diferentes eventos catastróficos de origen geológico. sin embargo hasta el momento no se cuenta con un documento confiable que conceda a los ciudadanos y a la sociedad en general este derecho básico para un mejor desarrollo.

Por ello es urgente y sumamente necesario que la sociedad cuente con un organismo que se encargue de generar, integrar y estudiar y difundir amplia y sistemáticamente el conocimiento de la geología tanto superficial como del subsuelo de la cuenca de México, no únicamente con fines de establecer los programas de prevención ante los desastres naturales, sino también como un apoyo fundamental en el desempeño urbano.

La sismicidad esta considerada como el riesgo de impacto inmediato repentino más grave que se tiene en la ciudad de México, debido al fenómeno de subducción entre las placas de Cocos y Norteamericana, donde esta asentada la republica mexicana.

Una de las principales realidades que hacen a la ciudad de México vulnerable ante los sismos es su densidad de población. Otro factor de vulnerabilidad es el suelo, que se caracteriza por estar formado de tipos que van desde el suelo blando y de transición hasta el duro. De acuerdo con sus propiedades estos pueden amplificar o amortiguar las ondas sísmicas, y de la misma manera, magnificar o disminuir daños en vidas y bienes.

En relación con infraestructura tecnológica, existe desde hacia varias decadas el servicio sismológico nacional, dependiente del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., también se cuenta con el sistema de alerta sísmica de la fundación Javier Barros Sierra. Además en la actualidad, el CENAPRED ha estado desarrollando un sistema de microzonificación sísmica que brindara información sobre los posibles daños y efectos en zonas específicas ocasionandos por sismos de cierta magnitud., además se ha creado



el Servicio Geológico Metropolitano, cuya función es orientar sobre la utilidad racional del suelo considerando su origen geológico.

7.1.2 Riesgo vulcanológico

Algunos fenómenos de los volcanes como la actividad sísmica, la deformación del suelo, las emanaciones de gas o actividad fumarólica y la composición química del agua y los vapores que salen de las fumarolas, ayudan a los científicos a saber cuando se empieza a activar un volcán. Si se logran entender estos cambios, se puede tratar de saber las posibilidades de que ocurra una erupción volcánica. De cualquier manera, es casi imposible predecir el día, la hora, lugar y tamaño de una erupción.

Por ello la sociedad y sobre todo las poblaciones aledañas a un volcán deben de estar constantemente informadas sobre la actividad del volcán.

En períodos de quietud volcánica, las personas que viven en zonas de influencia, deben elaborar planes de contingencia, de posible evacuación parcial o total y otras medidas preventivas que garanticen la supervivencia de las personas y sus bienes materiales, y en general todo el sistema ecológico. Por eso se deberá estar en permanente comunicación con los organismos de socorro, prevención y atención de desastres (Cruz Roja y la Defensa Civil, por ejemplo).

7.1.3 Inundaciones

Aunque no son eventos tan dramáticos como un temblor, ni tan espectaculares como una erupción volcánica, las inundaciones son los fenómenos más letales de los desastres naturales.

Las inundaciones representan aproximadamente el 40% de las víctimas de los desastres naturales. Estas son catastróficas simplemente porque el hombre se instala en sitios propensos a ser inundados.

Para reducir el efecto de las inundaciones es importante la colaboración comunitaria con los programas de las autoridades locales y el establecimiento de medidas por parte de instituciones gubernamentales.



Algunos ejemplos para la organización local son: 1) Creación de un Comité de Desarrollo para la identificación de su propia vulnerabilidad a inundaciones y adopción de soluciones factibles; 2) Reubicación de familias damnificadas a terrenos más altos y uso de materiales adecuados de construcción; 3) Instalación de Sistemas de Alerta Temprana; 4) Capacitación en primeros auxilios e integración de equipos de rescate; 5) Identificación de lugares seguros para refugiarse en caso de emergencia.

Las instituciones gubernamentales desarrollan una serie de medidas de protección que pueden clasificarse como estructurales e institucionales. Las medidas de estructurales están constituidas por obras hidráulicas destinadas a controlar inundaciones: 1) Presas que almacenan temporalmente el agua para después descargarla en forma controlada; 2) Conductos de drenaje que permiten el transporte rápido del agua en ríos y canales para evitar que se desborden; 3) Muros de protección que confinan el agua dentro del cauce del río o para evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de importancia económica.

Las medidas institucionales consisten en la difusión de boletines de alerta, la operación de la infraestructura hidráulica y la evacuación de personas y bienes afectables. También incluye la reglamentación y control del uso del suelo. El objetivo de las medidas estructurales e institucionales no es evitar las inundaciones sino disminuir los daños que causan.

Mitigación de los efectos de las inundaciones.

Son muy pocos los casos en los cuales es posible solucionar los problemas de inundaciones de forma permanente. Algunas de las razones más importantes que no permiten la solución son el costo de las obras, los conflictos socioeconómicos de las regiones que conllevan intereses en el uso de la tierra, y la escasa factibilidad económica de este tipo de proyectos. Por esta razón se utilizan los términos Control de Inundaciones o Mitigación de los efectos de las Inundaciones para indicar que estos proyectos tratan de prevenir daños mayores y ofrecen protección hasta un cierto nivel de riesgo.

El costo de las obras está en función de la frecuencia del evento de inundación. En la protección de campos agrícolas, por ejemplo, la frecuencia de diseño contra inundaciones puede estar entre 5 a 25 años porque eventos mayores pueden requerir de obras que valen más que los cultivos que se van a proteger. En otros casos, en los cuales las inundaciones pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas puede ser



preferible instalar sistemas de alerta o reubicar la población que se encuentra en peligro, antes que proyectar obras para frecuencias de 10.000 años o más.

Dependiendo de las características particulares de los casos que requieren de estudios de control de inundaciones, el procedimiento general que se sigue es el siguiente:

1. Delimitar las zonas inundables. Puede hacerse utilizando cartografía, fotografías aéreas, topografía de campo, encuestas e inventario de eventos históricos.
2. Determinar las causas de las inundaciones. Pueden ser desbordamientos, encharcamientos, deficiencias de drenaje, avalanchas, obstrucciones o sedimentación.
3. Realizar estudios Geológico, Geotécnico, Socioeconómico, Ambiental e Hidrológico para delimitar cuencas vertientes, analizar el uso de la tierra y las corrientes naturales que afectan la zona que se va a proteger, cuantificar clima, lluvias y caudales líquidos y sólidos. Definir magnitudes de los eventos extremos que pueden generar inundaciones.
4. Realizar estudios económicos para cuantificar los perjuicios que han causado inundaciones anteriores y para estimar los perjuicios futuros, con niveles de riesgo determinados, sobre las actividades agropecuarias, industriales y habitacionales de la zona.
5. Realizar estudios Geomorfológicos y de Hidráulica Fluvial para conocer la dinámica fluvial y estimar capacidades de los cauces, estabilidad, trayectorias y tendencias futuras, delimitación de zonas inundables para eventos extraordinarios e incidencia de obras civiles existentes y proyectadas.
6. Diseñar las obras de mitigación de los efectos de las inundaciones y estimar sus costos.

De una manera general los proyectos de control de inundaciones estudian las siguientes opciones:

- Establecer sistemas de alerta para que la población pueda ponerse a salvo.
- Proyectar la construcción de obras civiles:
 - Terraplenes protegidos por obras marginales.
 - Muros en concreto o en gaviones.



- Diques longitudinales, denominados también Jarillones.
- Embalses de regulación.
- Canales de desviación o By-pass.

Como una referencia sobre una obra para la mitigación de las inundaciones podemos mencionar la planta de bombeo del Gran Canal en Ecatepec, en donde se habían presentado inundaciones en algunas colonias, el cuál fue proyectado para disminuir en un 30 % el riesgo de inundaciones en el distrito federal y área metropolitana de la cuenca del Valle de México, al aumentar en 40 m³/s la capacidad de desalojo del agua. Además se rehabilita el cauce del Gran Canal y la capacidad de desagüe que se había perdido por causa de los hundimientos. Dicha obra fue inaugurada en el año de 2002. Dicha obra tuvo una inversión de 230 millones de peso

7.1.4 Riesgo hidrogeológico

Las investigaciones de tipo geológico y geofísico sirvieron también para el estudio de los mecanismos de circulación hídrica en el subsuelo de la cuenca y para predisponer instrumentos más sofisticados para previsión y evolución de los fenómenos de subsidencia debidos a la intensa explotación de los acuíferos subterráneos del valle de México.

Después de la realización de este trabajo pudimos diferenciar 3 subsistemas acuíferos correspondientes, el primero al de la Ciudad de México limitado al norte por la Sierra de Guadalupe, al oeste por la Sierra de las Cruces, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oriente por una línea entre el Peñón Marqués y el aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El segundo subsistema acuífero corresponde al Lago de Texcoco, ubicado al oriente del subsistema de la Ciudad de México y que se extiende al norte hasta el Cerro de Chiconautla al oriente hasta las estribaciones de la sierra Nevada y al sur hasta la Sierra de Santa Catarina. El subsistema acuífero de Chalco, limitado al norte por las Sierras de Santa Catarina y el Pino, al oriente por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oeste por un partearguas subterráneo que permite separarlo del subsistema acuífero de la Ciudad de México(Fig. 7.1)

Después de diferenciar estos subsistemas pasaremos a comentar cual es la distribución y las características actuales de las arcillas que se encuentran cubriendo la parte plana del valle de México.



Estas tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas. En las partes centrales de las zonas de Texcoco y Tláhuac-Chalco, se encuentran intercaladas y/o mezcladas con horizontes de arenas, y llegan a presentar espesores de más de 100 metros.

Las arcillas están saturadas, presentando un nivel freático entre 2 y 3 metros de profundidad. Bajo las arcillas se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como semiconfinado. Actualmente, en la mayor parte de la Zona metropolitana de la Ciudad de México, la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento de los niveles piezométricos, modificando el tipo de acuífero, de semiconfinado a libre por disminución en la presión hidráulica que el acuífero ejercía en la base de las arcillas.

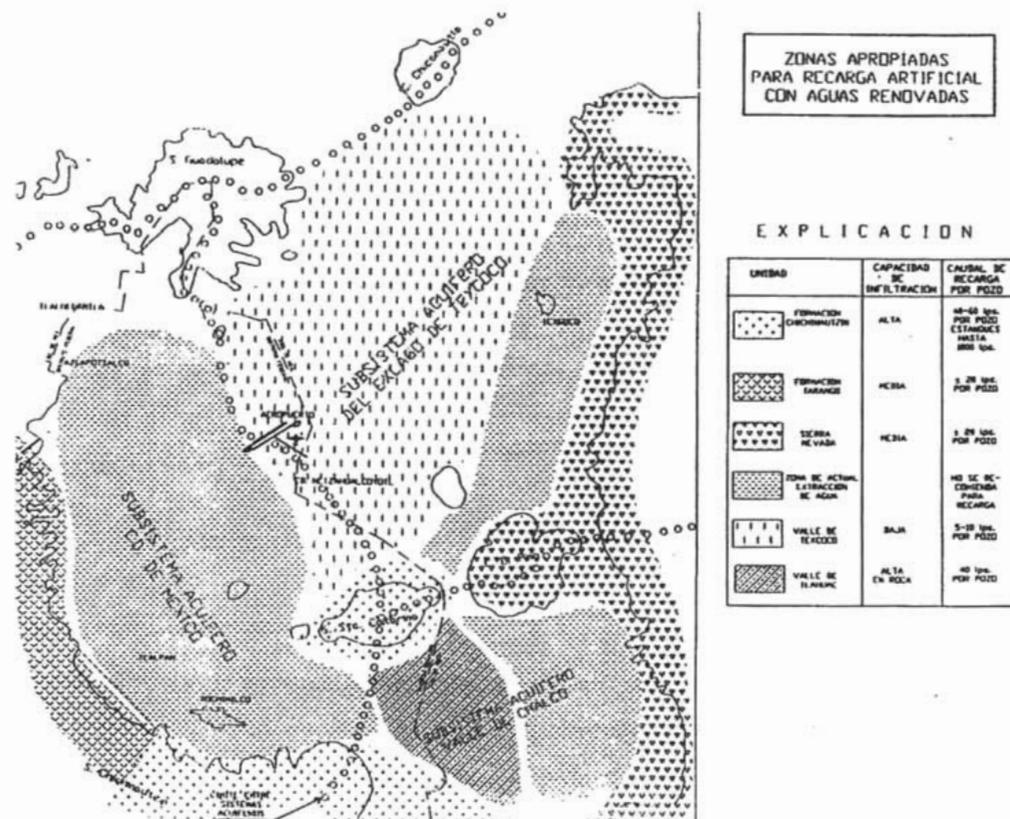


Figura 7.1 Zonas apropiadas para la recarga artificial



Como sabemos la alta compresibilidad de las arcillas, así como la sobreexplotación de los acuíferos dan como consecuencia que exista una pérdida de presión como ya lo hemos mencionado, más sin embargo acarrea otro gran problema que es el de la subsidencia.

Como lo menciona Nabor Carrillo, “desde el momento en el que se disminuye la presión piezométrica en el acuífero, se provoca una consolidación en las arcillas superiores. Por lo tanto en el estado actual del acuífero, aun la suspensión total de la extracción ya no detendrá el hundimiento.”

Ahora, la recarga artificial al acuífero de la Ciudad de México puede presentar las condiciones necesarias para disminuir la subsidencia del terreno con tres propósitos indispensables y necesarios:

- Control del flujo subterráneo.
- Mejor manejo del acuífero
- Almacenamiento de agua para usos futuros, que a lo largo del tiempo podría disminuir la extracción de agua de cuencas externas.

Para efectuar una recarga es necesario que se cumplan las condiciones siguientes:

- existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero. Estos sitios se pueden detectar por medio de pozos, estanques y galerías filtrantes, además se requiere que se efectúen pruebas de transmisibilidad así como de permeabilidad como se ha hecho en la Sierra de Santa Catarina, muy cerca del tiradero del mismo nombre, en el que se han hecho varios sondeos exploratorios de entre 85 y 95 metros de profundidad y en que se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeon y de gravedad encontrando coeficientes de permeabilidad del orden de 4×10^{-4} y 6×10^{-5} cm/s, por lo que se puede concluir que los materiales que constituyen el subsuelo de esta zona son de media a alta permeabilidad, dando como consecuencia un sitio apropiado para la recarga, como lo veremos más adelante. Por otra parte, el método de



recarga a través de pozos, no requieren de gran extensión de terreno, además de que estos atraviesan las capas arcillosas.

- Existencias de volúmenes de agua susceptible de utilizarse para la recarga. Los volúmenes disponibles en la Ciudad de México, corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento distribuidas prácticamente en toda la ciudad, que se deben someter a un tratamiento adicional para que alcancen la calidad deseable para la descarga.

Otra posible fuente es el agua de lluvia utilizando dispositivos de captación e inyección al subsuelo.

7.1.4.1 Zonas apropiadas para recarga.

Existen una gran cantidad de materiales que pueden agruparse de acuerdo a sus características para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el subsuelo en:

Basaltos piroclásticos de la formación Chichinautzin.- Constituyen la sierra del mismo nombre ubicada al sur de la zona metropolitana, así como la Sierra de Santa Catarina. Ya hemos mencionado su alta permeabilidad que permite la alta infiltración de agua, tanto a través de pozos y estanques. En los pozos se recargan alrededor de entre 40 y 60 lps por pozo. A través de estanques, como el existente en la Sierra de Santa Catarina, se pueden infiltrar caudales de hasta 1000 lps.

La formación Tarango que aflora al pie de la Sierra de las Cruces, se encuentra constituida por una serie de materiales entre los que predominan los de tipo granular, los cuales presentan una permeabilidad media. En estos materiales es factible recargar agua al subsuelo en caudales de alrededor de 20 lps por pozo.

En la Sierra Nevada se encuentran intercalaciones de materiales granulares con volcánicos que, en su conjunto, permiten la infiltración o recarga artificial con caudales variables, del orden de 20 lps por pozo.



Los materiales granulares dentro de la Ciudad de México, presentan una permeabilidad media. A través de ellos se podría efectuar una recarga artificial del orden de 10 a 30 lps por pozo.

Hacia el Valle de Texcoco, los materiales granulares que se encuentran en el subsuelo, presentan una permeabilidad de media a baja, por lo cual podrían permitir la recarga del orden de 56-10 lps por pozo.

7.1.4.2 Disponibilidad de agua para recarga.

Uno de los principales problemas que encara la recarga de acuíferos, es la fuente de agua o disponibilidad, ya que generalmente la demanda supera a la oferta. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México existen volúmenes de agua disponibles, principalmente de agua residual. La ciudad consume alrededor de 60m³/s. actualmente una pequeña parte es tratada y reusada principalmente en riego de áreas verdes, industrias y llenado de canales de Xochimilco. Existe un remanente de agua residual tratada que se ha programado para recarga artificial, además de volúmenes adicionales provenientes de nuevas plantas y ampliaciones de las actuales.

7.1.4.3 Recarga con agua tratada.

Recarga a través de pozos.

En el D.F., existen 23 plantas de tratamiento cuya localización se incluye en la (Figura 7.2). De dichas plantas, 13 se encuentran ubicadas en sitios donde podría realizar la recarga al acuífero a través de pozos. Las 10 restantes se localizan cerca de pozos de abastecimiento de agua potable, razón por lo que no se consideraron.

Las 13 plantas de tratamiento seleccionadas se muestran en la (Figura 7.3). La mayor parte del agua tratada se destina al riego de áreas verdes. Una parte de esta agua o bien la proveniente de futuras ampliaciones o de incrementos en su eficiencia de operación, son los que podrían destinarse para la recarga.



La planta acueducto de Guadalupe tiene la capacidad de operación de 57 lps y no se encuentran pozos de agua potable cercanos, en dirección al flujo en que circula el agua subterránea. La zona se encuentra sobreyaciendo a materiales permeables que permitirían la recarga artificial a través de un pozo perforado dentro de la planta o en sus alrededores. Se estima factible recargar un caudal de 30 lps (Figura 7.3).

La planta de san Juan de Aragón, actualmente tiene una capacidad de operación de 364 lps. Considerando que se pudieran destinar 200 lps para la recarga, ésta se podría llevar a cabo a través de 10 pozos, con un caudal de 20 lps por pozo. Se sugiere que los pozos se ubiquen en una batería a lo largo del límite del Distrito federal. Hacia ésta zona, los materiales que existen en el subsuelo permiten la recarga artificial, estarían alejados de actuales pozos de extracción y; por otra parte, en el sitio propuesto para la batería de pozos el flujo de agua circula de poniente a oriente, o sea hacia el lago de Texcoco, lo que evitaría un flujo de agua hacia la zona de pozos de la Ciudad de México.

La planta de tratamiento de aguas residuales Ciudad Deportiva tiene un gasto actual de operación de 80 lps. Desde años anteriores, se encontró que existe la posibilidad de derivar 5 lps para recarga, lo cual se podría realizar a través del pozo 28, el cual no se encuentra en operación para agua potable. Alrededor del pozo 28 no existen extracciones que pudieran verse afectadas en forma directa. Además en este sitio se perforación 3 pozos de monitoreo que permitirán conocer la modificación de la calidad del agua en el acuífero.

La planta de tratamiento Cerro de la Estrella es la de mayor capacidad en el distrito Federal. Actualmente tiene una capacidad de operación de 2300 lps a nivel terciario, de los cuales se sugiere utilizar 410 lps para ser recargados a través de 9 pozos ya existentes, ubicados 4 de ellos al norte de la Sierra de Santa Catarina y 5 en la porción sur de la misma Sierra, como se muestra en la (Figura 7.3).

Existe una conducción de aguas tratadas, que va de la planta Cerro de La Estrella hacia el área de Xochimilco, la cual parcialmente podría ser utilizada para este fin.



En los pozos ubicados al norte de la Sierra de Santa Catarina, hemos hablado que la permeabilidad de los materiales permitiría la recarga de 40 lps por pozo, para hacer un total de 160 lps. Al sur de la sierra se encuentran los pozos Santa Catarina, en los que se podrían recargar 50 lps por pozo para hacer un total de 250 lps. Uno de estos pozos, el Santa Catarina 6, fue adaptado para recarga y se encuentra en operación, incluye tratamiento previo a la inyección.

La planta de tratamiento del Campo Militar tiene una capacidad de operación de 30 lps. Estamos suponiendo que podrían destinarse 20 lps de dicha agua para la recarga. La inyección se podría realizar a través de un pozo que se perforaría junto a la planta de tratamiento, donde se encuentran materiales de alta permeabilidad.

La planta de tratamiento San Juan Ixtayoapan tiene una capacidad de operación de 106 lps. Sería factible inyectar 60 lps a través de un pozo que se requeriría perforar junto la planta.

Las plantas de tratamiento ubicadas en la porción suroeste de la zona metropolitana correspondientes a Abasolo, H. Colegio Militar y Parres, tienen un caudal de operación de 15 lps cada una de ellas. Se desconocimos hasta el momento la utilización de esta agua. Estos caudales podrían ser recargados al subsuelo en su totalidad, mediante 3 pozos ubicados uno en cada planta.

En la planta de tratamiento San Miguel Xicalco, se tiene una capacidad de operación de 75 lps, de los cuales se estima que se podrían recargar 7 lps a través de un pozo.

En la planta de tratamiento San Luis Tlaxialtemalco, desde hace varios años se construyó y adaptó el pozo San Luis 15, para que a través de este recargar 60 lps. Alrededor del pozo SL-15 existen 3 pozos de monitoreo.

En la planta de tratamiento de Santa Fe, actualmente se tratan 280 lps a nivel secundario, de los cuales 200 podrían ser recargados al subsuelo a través de una batería de 8 pozos ubicados en las cercanías de la planta, que corresponde a la zona de lomas de poniente.



Plantas piloto experimentales

Actualmente, en el 2005 se tienen Plantas piloto experimentales, bajo diferentes enfoques, algunas son las siguientes:

Planta piloto experimental para la potabilización de aguas de primer uso en Santa María Aztahuacán. Su objetivo es definir la ingeniería básica de procesos para el diseño de plantas potabilizadoras y resolver la problemática del deterioro de la calidad del agua en el acuífero de la zona sur-oriente de la Ciudad de México.

Planta piloto experimental para el tratamiento avanzado de aguas residuales. Sus objetivos son los de definir las opciones de proceso necesarias para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización, así como los requerimientos de calidad de las aguas residuales tratadas en función de sus usos potenciales y desarrollar metodologías para la identificación de elementos tóxicos remanentes en las aguas residuales tratadas, mediante ensayos con seres vivos-truchas-para garantizar su uso en el consumo humano.

De los trabajos desarrollados en esta planta destaca la definición destaca el caudal que se destina a la recarga artificial del acuífero en el pozo Santa Catarina 6 y para la potabilización del efluente secundario de la planta Cerro de la Estrella.

Planta experimental para la recarga artificial del acuífero de Santa Catarina 6. Tiene la finalidad de inyectar en el acuífero, de manera directa y permanente, 20 lps, a fin de evaluar el impacto en la calidad del agua en el entorno del pozo de inyección.

El afluente secundario proviene de la planta cerro de la Estrella y es tratado por los procesos de despumación, filtración adsorción y desinfección. Se cuenta con dos pozos de observación y monitoreo colocados a 30 y 60 metros del punto de inyección. Desde 1993 se ha inyectado más de un millón de metros cúbicos, con un estricto control para que las aguas de recarga estén libres de patógenos y manteniendo asimismo el monitoreo sistemático de la evolución desfavorable del acuífero del subsuelo



en sus características. Se abre así la posibilidad del suministro de agua potable a partir de aguas residuales tratadas con procesos avanzados.

Recarga a través de estanques.

Lo que era la DGCOH construyó estanques para la infiltración de aguas tratadas sobre el flanco sur de la Sierra de Santa Catarina. La recarga posible a través de las primeras experiencias de la operación es de 600 lps y se tiene en proyecto la ampliación a 1000 lps, la cual sería suministrada a través de ampliaciones de la planta del Cerro de la Estrella.

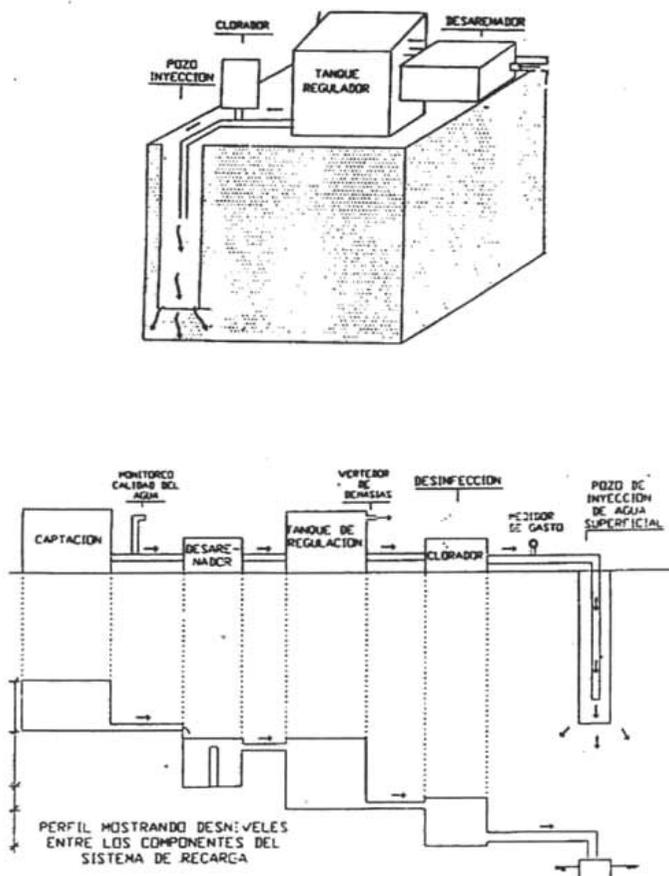


Figura 7.4 Diseño preliminar de recarga artificial a través de pozos



Encontramos en la elaboración de este trabajo que para este tipo de estanques, se recomienda que antes de continuar con la recarga masiva de agua, se realice un monitoreo durante un periodo a fin de evaluar el impacto en el acuífero. Posteriormente, de acuerdo a los resultados, programar la factibilidad de construir nuevos estanques de infiltración.

De acuerdo a los lineamientos sobre la calidad del agua requerida para el agua que se utiliza en la recarga de los acuíferos, esta debe de ser prácticamente potable.

En general las plantas de tratamiento en el Distrito federal alcanzan un nivel secundario, por lo que será necesario adecuar la calidad del agua a un nivel terciario o avanzado, de acuerdo al tipo de rocas en donde se realice la descarga (Figura 7.4).

Recarga de agua pluvial.

En la Cuenca del valle de México se presenta anualmente precipitaciones del orden de 800 mm anuales. Para la recarga de aguas pluviales está puede realizarse a través de: pozos, presas y/o incrementando la reforestación de las zonas altas.

La recarga a través de bordos o presas construidas sobre los flancos de las elevaciones topográficas que circundan al Valle de México puede ser factible en forma general. Es conveniente realizar estudios de detalle para su ubicación.

La reforestación de las zonas topográficamente altas, es una acción benéfica desde varios puntos de vista, entre ellos, evita la erosión, el arrastre de sedimentos e incrementa la infiltración de agua en el subsuelo.

En la sierra de Chichinautzin, al sur de la Ciudad, las rocas presentan tan alta permeabilidad que prácticamente todos los escurrimientos superficiales se infiltran en forma natural antes de llegar al valle.



Este tipo de recarga se ha empezado a utilizar actualmente en las zonas de Iztapalapa, es decir, el agua de lluvia que escurre a lo largo de arroyos puede ser captada para su inyección al subsuelo.

Megapozo en Iztapalapa

En lo que va del 2005 se ha puesto en marcha lo que es la construcción de un megapozo en la Sierra de Santa Catarina, en la Delegación Iztapalapa, este pozo es de absorción y de almacenamiento de agua de lluvia y se construye sobre una superficie de 30 mil metros cuadrados.

El megapozo tendrá una capacidad estimada de 150 mil metros cúbicos de líquido. Esta obra se unió a los 87 pozos que ahora existen en Iztapalapa, en los cuales se captan 11 mil millones de litros, que se compara con el agua potable que consumen los 2 millones de habitantes de la demarcación en un mes.

El suelo donde se construye es un suelo que presenta, como hemos visto, una muy alta permeabilidad ya que presenta grava y tezontle, que servirá de filtro del agua antes de llegar al manto, lo que permitirá una rápida absorción. La lluvia es captada por rejillas que conectan con la excavación. El líquido baja al subsuelo 25 centímetros por año, por lo que para llegar a los mantos acuíferos requiere de cerca de 80 años.

Proyecto de recarga

Con el propósito de recargar el subsuelo con agua de lluvia, se ha creado lo que se llama Programa de Construcción de Pozos de absorción para Recarga del Acuífero. El programa tiene como meta la construcción de 600 pozos de infiltración, que coadyuvará a la recarga del acuífero mediante el agua de lluvia, a la vez que permitirán disminuir la frecuencia de los encharcamientos. Lamentablemente no se pudo conseguir la información de la ubicación exacta de los pozos, sin embargo contamos con la fortuna de estar en la inauguración de uno, que fue el pozo de absorción en Tlalpan.

Pozo de absorción en Tlalpan

Esta obra inaugurada en la delegación Tlalpan, a la altura de las avenidas Insurgentes y Periférico, cumple la meta de los 47 pozos que el Gobierno prometió edificar en el 2004.



7.2 Recomendaciones

Como parte final de este trabajo de tesis se dan las siguientes recomendaciones:

- Realizar balances hidrogeológicos cada 10 años para comparar la evolución y retraso en los niveles piezométricos.
- Aplicar un modelo matemático de acuífero, actualizando datos de extracción, recarga, con el fin de hacer un buen simulamiento de lo que sucede en la Cuenca.
- Hacer un estudio más detallado, para encontrar los sitios más adecuados para la recarga artificial.
- Tener una medición piezométrica constante en los pozos, en periodos no mayores de 1 año.
- En las zonas del tiradero de Santa Catarina, procurar hacer estudios detallados que nos informen si los contaminantes no han deteriorado la calidad de las aguas subterráneas.
- La capacidad del acuífero para recarga es muy grande, por lo que ésta se deberá medir en base a la disponibilidad de aguas para la recarga.
- Monitorear el acuífero para conocer los efectos de la actual recarga artificial a través del estanque de Santa Catarina.
- Efectuar estudio de detalle para incrementar la infiltración de agua sobre los flancos de las sierras, mediante reforestación.

Finalmente podemos comentar que las autoridades y las dependencias de gobierno deben, en conjunto con la sociedad, aprender y entender los problemas de los diferentes tipos de riesgos que afectan no solo la Cuenca del Valle de México, sino de todo el país, para que se tomen las medidas necesarias en diseño, inversión, construcción y sobre todo prevención que permitan disminuir los daños y el riesgo que puedan afectar a nuestra sociedad.



BIBLIOGRAFIA

I. OBRAS CONSULTADAS

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES CENAPRED, (2001), Diagnostico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México, 1era edición, México.

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES CENAPRED, (1997), Fascículo II "Sismos", 3era edición , México.

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES CENAPRED, (2001), Inestabilidad de laderas, fascículo 11, 2da edición, Secretaria de gobernación, Sistema nacional de protección civil, México.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA CNA, (1994), Programa de desarrollo urbano, tema:agua, México.

COMISIÓN DE VIALIDAD Y TRANSPORTE URBANO, (1986), Características geológicas y geotécnicas del Valle de México, 100 kilómetros de Metro, México.

GONZÁLEZ DE VALLEJO LUIS I. (2002), Ingeniería Geológica, Prentice Hall, España.

HERRETA T. C. , (1996), La infraestructura urbana y la disponibilidad de agua, Academia mexicana de ingeniería, México.

MARSAL R; HIRIART F. Y SANDOVAL R, (1951), Hundimiento de la Cd. de México, Observaciones y estudios analíticos, ingenieros civiles asociados, serie b ingeniería experimental #3, México.

OCTAVIO RIVERO S, GUADALUPE P. R., (1996), Riesgos ambientales para la salud en la Ciudad de México, Coordinación de investigación científica, Programa universitario de medio ambiente, U.N.A.M, México.

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), (1990), Simposio sobre tópicos geológicos de la Cuenca del Valle de México, México.

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS),(1990), El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones, México.

VILLANUEVA MANZO JESUS,(2002), Cuenca hidrográficas de México, universidad autónoma de Chapingo, México.



II. TESIS

AGUILAR ROSALES MIGUEL ANGEL, (2004), Determinación del tipo de fuentes sísmicas dentro de la cuenca de México y sus relaciones con la Geología local. Clasificación: 001-00323-A6-2004

BECCERIL ALBARRAN JOSEFINA PAZ, (1991), Estudio de la calidad del agua en pozos cercanos al tiradero de basura de Sta. Catarina. Ingeniero civil, F.I., U.N.A.M. Clasificación: 001-01177-B1-1991-1M

CABRALES QUEZADA ELADIO, (1986), Geohidrología en la parte sureste de la cuenca del valle. Clasificación: 001-01121-C4-1986-2

CEVALLOS FERRIZ RICARDO JOSE, (1981), Soluciones al problema de las zonas minadas de la ciudad. Clasificación: 001-01121-C12-1981-2

CUETO MIRANDA MARCO A., (1969), Algunos problemas urbanos de la zona metropolitana del valle. Clasificación: 001-00821-C10-1969-94

DIAZ MOLINA OSCAR, (2001), Determinación de zonas de riesgo geológico-ambiental en la cuenca de México mediante sensores remotos y radar de penetración somera. Clasificación: 001-01131-D1-2001-1

DURAN FLORES FRANCISCO JAVIER, (1985), Descripción del deterioro ecológico de la cuenca. Clasificación: 001-01026-D1-1985-1

GARNICA PEÑA RICARDO JAVIER, (2004), Riesgos por inundaciones e inestabilidad de laderas en el municipio de Tecolutla Ver. Lic. en Geografía, Fac. de Fil. y letras, U.N.A.M. Clasificación: 001-01026-G1-2004

GARZA MALDONADO FRANCISCO, (1988), Los problemas de abastecimiento de agua potable y el alcantarillado de la ciudad de México. Clasificación: 001-01121-G10-1958.94

GOMEZ GARCIA CELIA, (2001), Riesgo por inundaciones en la zona metropolitana de la ciudad, Lic. en Geografía, Fac. de Fil. y letras, U.N.A.M. Clasificación: 001-01026-G3-2001-2

HERNANDEZ AGUILAR ABEL EDI, (2003), Inundaciones: riesgo y mitigación. Ingeniero Civil, F.I., U.N.A.M. Clasificación: 001-41121-H2-2003

HERRERA LEGARRETA ANA MARIA, (1983), Síntesis ecológica de la cuenca de México. Clasificación: 001-00322-H4-1983-3

LOZANO VELAZQUEZ LAURA CRISTINA, (1997), Reconocimiento de los riesgos geológicos y de carácter antrópico en la Del. Tlalpan. Clasificación: 001-01123-L1-1997-2



LASSER ILLADES GUSTAVO GUADALUPE, (1970), Hidrogeología de la subcuenca de Cuernavaca. Clasificación: 001-01123-L2-1970-00

MATIAS SANTIAGO B, (2001), Riesgos geológicos asociados a la sobreexplotación del agua subterránea. Clasificación: 001-01123-M2-2001-1

MENDOZA BLACKALLER ROBERTO LUIS, (1962), Condiciones geohidrológicas de la zona acuífera Chiconautla Cerro Gordo de la Cuenca de México. Clasificación: 001-01121-M9-1962-128

MONTAÑO FUENTES JESUS RUBEN, (1987), Estudio geohidrológico regional de la zona de Chalco-Amecameca Edo de Mex. Ingeniero Geólogo, F.I., U.N.A.M.

MORALES PEREZ ROSALBA ESTHER, (1985), Hidrogeología del valle del Vizcaino, BCS. Clasificación: 001-01123-M-2-1985-1

MORALES RECINOS CARMEN LAURA, (1990), Hidrogeología de la cuenca oriental Tlaxcala. Clasificación: 001-01123-M4-1990-3

PEREZ ENRIQUEZ ALEJANDRO, (1993), Análisis de la problemática por inundación en la cuenca del Valle de México. Clasificación: 001-21121-P2-1993-2

RAMIREZ FIGUEROA JAVIER, (1961), Condiciones geológicas de la cuenca de México y sus relaciones con la Ingeniería Civil. Clasificación: 001-01123-R1-1961-00

RAMOS MURGUIA LAURA, (1984), Estudio geomorfológico del extremo norte de la Cuenca de México. Clasificación: 001-01026-R1-1984-2

RIVAS RIVAS DAVID, (1985), Uso, contaminación y agotamiento del agua en la cuenca. Clasificación: 001-01026-R4-1985-2

SOMALLERA PULIDO AGUSTIN, (1983), Riesgos geológicos en asentamientos. Clasificación: 001-01123-S3-1983-2

VAZQUEZ DE LA ROCHA OSCAR ARMANDO, (1979), Estudio hidrológico aplicado a problemas de inundaciones en la cuenca Guanajuato-Silao.F.I., U.N.A.M. Clasificación: 001-01121-V1-1979-6

VAZQUEZ SANCHEZ ELISEO, (1995), Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación de la cuenca. Clasificación: 001-03090-V1-1995-1

ZABALLA ROQUERO RAFAEL, (1985), Alternativas para la solución de problemas de la contaminación en el Valle de México. Clasificación: 007-300615-Z1-1985-1

ZAMORA BARRIENTOS BERNARDO A., (1989), Estudio geohidrológico de la cuenca de la lata Babicora en el Edo. De México. Clasificación: 001-01121-Z2-1989-1



III. PÁGINAS WEB

<http://www.geologia.uson.mx/academicos/lvega/contenido.html>

<http://www.pvem.org.mx/2001/diciembre/asamblea1.htm>

<http://coremi01.coremisgm.gob.mx/cenapred/temasRiesgos.html>

<http://www.sipse.com.mx/ci/basura.php>

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/contami/contami.html>

<http://www.obras.df.gob.mx/Protecci%F3n%20civil/Comisi%F3n%20Interdependencial%20de%20Protecci%F3n%20Civil.html>

http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Organismos/Central/Estadisticas/EstadisticasAgua_CNA.htm

http://www.ccvn.org.mx/index_cuenca.htm

<http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/index.html>

http://www.tlahui.com/medic/medic17/agua_popo1.htm

<http://www.coremisgm.gob.mx/especialidad/ehidrogeo.html>

http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/homeC.htm

<http://www.edomexico.gob.mx/newweb/archivo%20general/contexto/reportaje/Gran%20Canal.htm>

<http://pumas.iingen.unam.mx/asa/riesgeos/>

<http://www.ifai.org.mx/>

http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/ponencias_cuencas.html

http://www.eurosur.org/medio_ambiente/bif74.htm

<http://es.encarta.msn.com/>

<http://geologia.igeolcu.unam.mx/SeGeoMet/Peligro.html>

<http://www.ipgh.org.mx/publications/periodicals/rgf057.htm>

<http://www.uaemex.mx/plin/psus/rev2/b03.html>