



## 4. RECARGAR LOS ACUÍFEROS



## 4. RECARGAR LOS ACUÍFEROS

La recarga intencional representa una importante estrategia para la gestión integral del agua en la Cuenca de México, porque permite almacenar el agua sin pérdidas por evaporación, sirve para disminuir las tasas de sobreexplotación y generalmente sirve para mejorar la calidad de las aguas recargadas. Afortunadamente, existen condiciones geológicas favorables para la recarga intencional en la cuenca, especialmente en las permeables suelos agrícolas y cerros en el perímetro del área metropolitana. Posibles proyectos incluyen lagunas de infiltración, pozos de absorción e infiltración vía riego agrícola, siempre garantizando la calidad del agua infiltrada.

Actualmente, el 77% del agua utilizada en la Cuenca de México proviene de fuentes subterráneas, y dos de cada tres metros cúbicos extraídos, provienen de la sobreexplotación.<sup>1</sup> El hundimiento y el agrietamiento de la capa protectora de sus acuíferos son señales de la necesidad de reducir los volúmenes extraídos.

La Cuenca de México cuenta con condiciones favorables para realizar proyectos de recarga intencional,<sup>2</sup> como parte de una estrategia de gestión integral de sus acuíferos. Hacia este fin, este capítulo abre con una explicación de cómo funcionan las formaciones geológicas que almacenan agua subterránea en la Cuenca de México, seguido por una revisión de los factores en la superficie que intervienen en los procesos de infiltración. Luego, se presenta una serie de proyectos que permitirían almacenar volúmenes significativos de agua en los acuíferos de la Cuenca.

### CÓMO FUNCIONAN LOS ACUÍFEROS Y LAS ZONAS DE RECARGA EN LA CUENCA DE MÉXICO

Esta sección se propone explicar el funcionamiento del sistema de almacenamiento natural del agua subterránea en la Cuenca de México, como base para el desarrollo de un sistema de gestión equilibrada que incluiría estrategias de recarga intencional.

En su historia geológica, desde la formación de la Sierra Chichinautzin, la Cuenca ha sido regida por grandes lagos a lo largo de dos distintas épocas. Cada lago milenario dejó una capa gruesa de arcillas en su fondo. En medio de estas dos capas, existe un relleno de materia suelta por donde el agua fluye libremente. La capa más profunda es conocida como el acuitardo medio, y sirve como un piso prácticamente impenetrable.

Las arcillas en la superficie, conocidas como el acuitardo superior, tienen un grosor de 10 metros en sus orillas, y hasta 130 metros en el sur de la Cuenca, alrededor de la Sierra Santa Catarina. Esta capa sirve ahora para proteger el agua que la subyace de evaporación y de contaminación, pero no permite la entrada de agua de recarga.

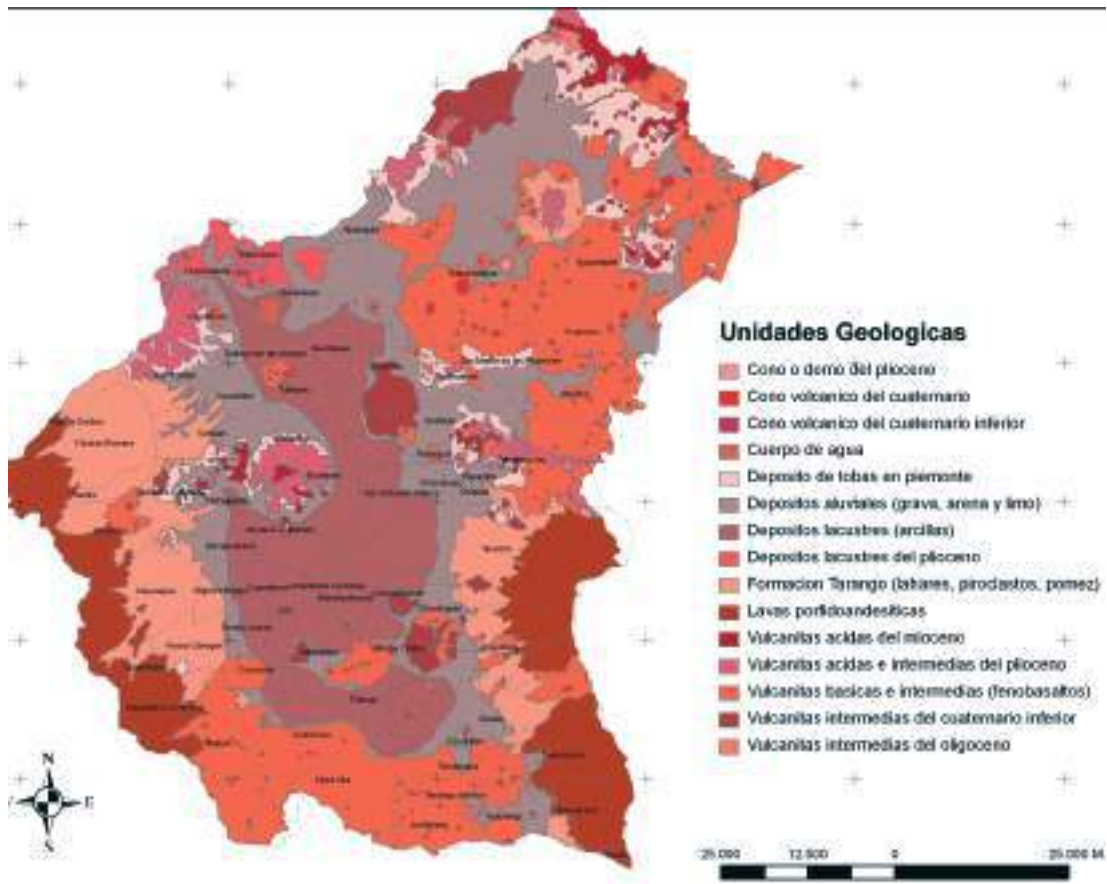
1 Aquí se Registro Público de Derechos al Agua, Diciembre 2007.

2 Gale, Ian, ed., "Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas", UNESCO, 2005.

El relleno en medio, conocido como depósitos aluviales, tiene un espesor de hasta unos 300 metros, y llega hasta la superficie alrededor del antiguo lecho lacustre. Este relleno es recargada directamente, en donde llega a la superficie, y a través de la mezcla de materia pétreo acumulada al pie de las montañas (Formación Tarango), y por las fisuras y fracturas en las sierras que le rodean (principalmente vulcanitas). Dado que tanto las vulcanitas y la Formación Tarango, como los depósitos aluviales permiten la entrada, circulación y extracción del agua, y están interconectados entre sí, se consideran que forman, en su conjunto, una unidad geológica, llamada “acuífero superior”. Este acuífero es la principal fuente de agua subterránea para los habitantes de la Cuenca de México.<sup>3</sup>

Los siguientes mapas y tabla describen estas formaciones, las cuales son de especial interés para el diseño de estrategias para la recarga intencional.

Ubicación de municipios y delegaciones en relación con las unidades geológicas de la Cuenca de México.



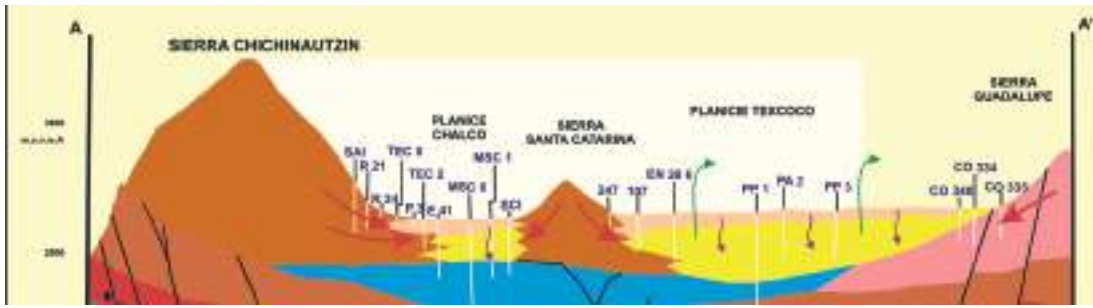
3 Cabe mencionar que, según Ariel (2004), las baterías de pozos Gran Canal y Ramal Ecatepec 2ª Etapa están explotando el acuífero medio.

Tabla 1. Unidades hidrogeológicas del acuitardo superior y el acuífero superior, con sus características y potencial para la recarga.<sup>4</sup>

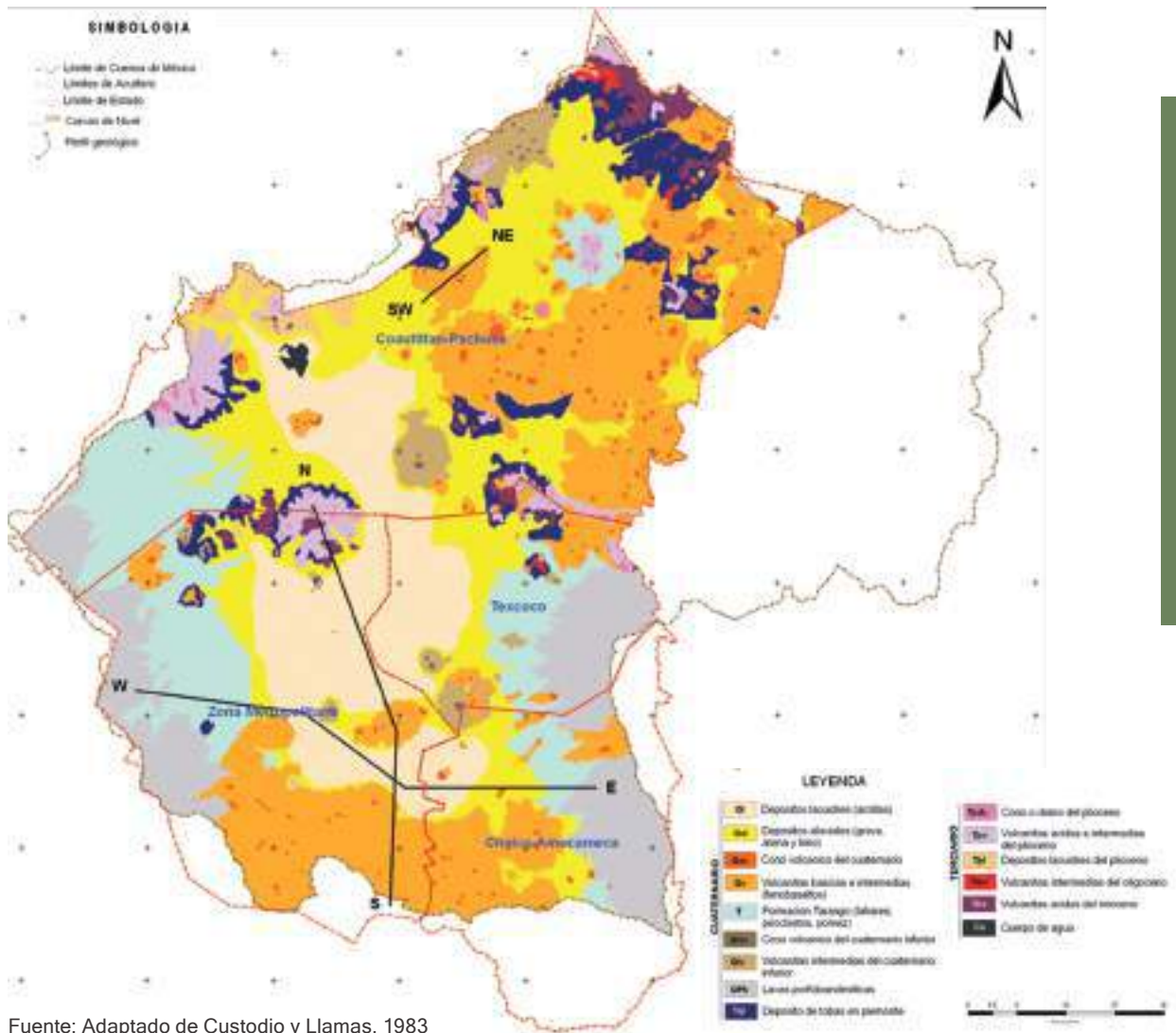
Clasificación hidrogeológica	Litología	Características	Potencial p/recarga (Porosidad eficaz) Tasa de extracción
Acuitardo superior	Arcilla lacustre.	Antiguo lecho lacustre. Profundidad entre 5-40 metros. En proceso de compactación y agrietamiento por desecación. La infiltración puede tardar 100 años.	Baja (3%)
Acuífero superior:  principal-fuente de agua subterránea en la Cuenca	Depósitos aluviales (del Cuaternario):  aflora en los suelos agrícolas de la planicie y subyace la capa de arcilla ocupada por la zona urbana.	Compuesto de arenas y gravas, intercaladas con lavas y piedras arrojadas por las emisiones volcánicas. Flujo simple entre materiales granulares. Gran parte de los pozos metropolitanos extraen de esta unidad, la cual sufre de un severo abatimiento, excepto en la zona de las presas. El agua recargada en esta zona puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización.	Alta (22%)  Tasa de extracción:  30-60 lps  Recarga local
	Vulcanitas del Cuaternario sierras Chichinautzin, Santa Catarina, y cerros como Chapultepec	Compuesto de piroclastos y lavas; permeabilidad por fracturas. Los pozos extraen del pie de monte bajo y la planicie aluvial. El agua recargada puede ser recuperada rápidamente, sin mineralización.	Muy alta (35%)  Tasa de extracción: 50-140 lps  Recarga local
	Formación Tarango  Pie de monte de las sierras Nevada y Las Cruces	Depósitos en pendiente compuestos de pómez, lahares, cenizas, suelos, gravas, arena, al pie de las sierras. Flujo simple, entre materiales granulares. El agua recargada puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización.	Alta (18%)  Tasa de extracción: 12-30 lps Recarga local
	Rocas ígneas del Cuaternario sierras Nevada, Río Frío, Las Cruces	Transmiten agua hacia la planicie a través de fracturas. El agua recargada sólo es recuperada en décadas ó siglos, con altos contenidos de minerales.	Muy alta (35%)  Recarga regional
	Vulcanitas del Plioceno  Sierra de Xochitepec y la base de Sierra de Guadalupe	Porosidad por fracturas. El agua recargada sólo es recuperada años después, con moderada mineralización.	Alta (30%)  Recarga subregional
Acuitardo medio	Depósitos lacustres del Plioceno	Arcillas intercaladas con lavas; Espesor máx. 300 m; Por compresión, son más impermeables que arcillas superficiales.	Muy baja

4 Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983.

Mapa 1. Corte transversal sur-norte de las capas del acuífero superior.



Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983.



Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983

Los colores en el recorte transversal y el mapa superficial (arriba), corresponden a los colores en la tabla descriptiva (izquierda)

RECARGA

## UNIDADES GEOLÓGICAS CON POTENCIAL DE RECARGA

A continuación, se describen las características, problemáticas y potencial de las tres principales unidades geológicas involucradas en la recarga de la Cuenca.

### Depósitos Aluviales

Esta unidad subyace a las arcillas de la antigua zona lacustre, y aflora en los límites de lo que fue el lago, extendiéndose hacia el norte, poniente y oriente, hasta llegar a las sierras que circundan la Cuenca. Estas son las tierras agrícolas, planas, profundas, fértiles y permeables (suelos tipo regosol y andosol), que han sido productoras de granos para las zonas urbanas durante siglos.

Estas zonas son sumamente aptas para proyectos de recarga a través de lagunas ó pozos de infiltración con aguas pluviales ó tratadas. Su tasa de infiltración es 5 cm por hora<sup>5</sup>, y pueden infiltrar hasta 200 metros de agua al año. El impacto de la recarga en los niveles freáticos locales es inmediato. Todas las superficies con sistemas de riego en la Cuenca se encuentran sobre esta unidad. A través del riego se logra infiltrar hasta 25% del agua empleada.

Estas zonas de recarga se encuentran altamente amenazadas debido a los acelerados procesos de expansión urbana.

### Vulcanitas del Cuaternario

Esta zona, compuesta de sierras y cerros, es sumamente permeable. Sus barrancas son aptas para represas, y en donde el pendiente lo permite, se puede infiltrar grandes volúmenes a través de pozos de absorción ó lagunas de infiltración, siempre asegurando que el agua no salga por fisuras, inundando colonias cuenca abajo.

La pendiente de este afloramiento oscila entre 4º y 10º. Es sumamente apta para ensayar lagunas y pozos de infiltración de aguas pluviales ó tratadas, siempre que sea segura la ausencia de fracturas que permitan la pérdida de agua cuenca abajo. El agua así recargada impactaría en el nivel freático de manera casi inmediata, y podría ser aprovechada a muy corto plazo.

Proyectos actuales en esta zona: En la Sierra Santa Catarina, la Delegación Tláhuac y la Universidad Autónoma Metropolitana están realizando proyectos para la captación e infiltración de agua pluvial. La planta de tratamiento de aguas residuales Cerro de la Estrella ha estado desarrollando técnicas para la infiltración de aguas tratadas en esta zona por varios años.

<sup>5</sup> Sánchez-Díaz, Luis Felipe. "Infiltración-Recarga Potencial y Catálogo de los Proyectos Prioritarios para la Sustentabilidad Hídrica de la Subcuenca Hidrológica del Río de la Compañía", proyecto de investigación realizado para el actual estudio. Septiembre, 2008.

En la Sierra del Ajusco, existe un sistema de cárcamos que está infiltrando agua pluvial. En el área natural protegida Ayaqueme (Temamatla, Tenango del Aire), se propone la infiltración de aguas pluviales del Río Amecameca, cerca de los pozos de extracción que proveen agua a los habitantes de ocho municipios de la región.

La cantidad y calidad del agua recargada en esta zona está amenazada por los procesos intensivos de urbanización en la Delegación de Tláhuac y, en el municipio de Juchitepec, por el uso extensivo de agroquímicos y la práctica nociva de depositar aguas residuales no tratadas en grietas en el territorio del municipio de Juchitepec.

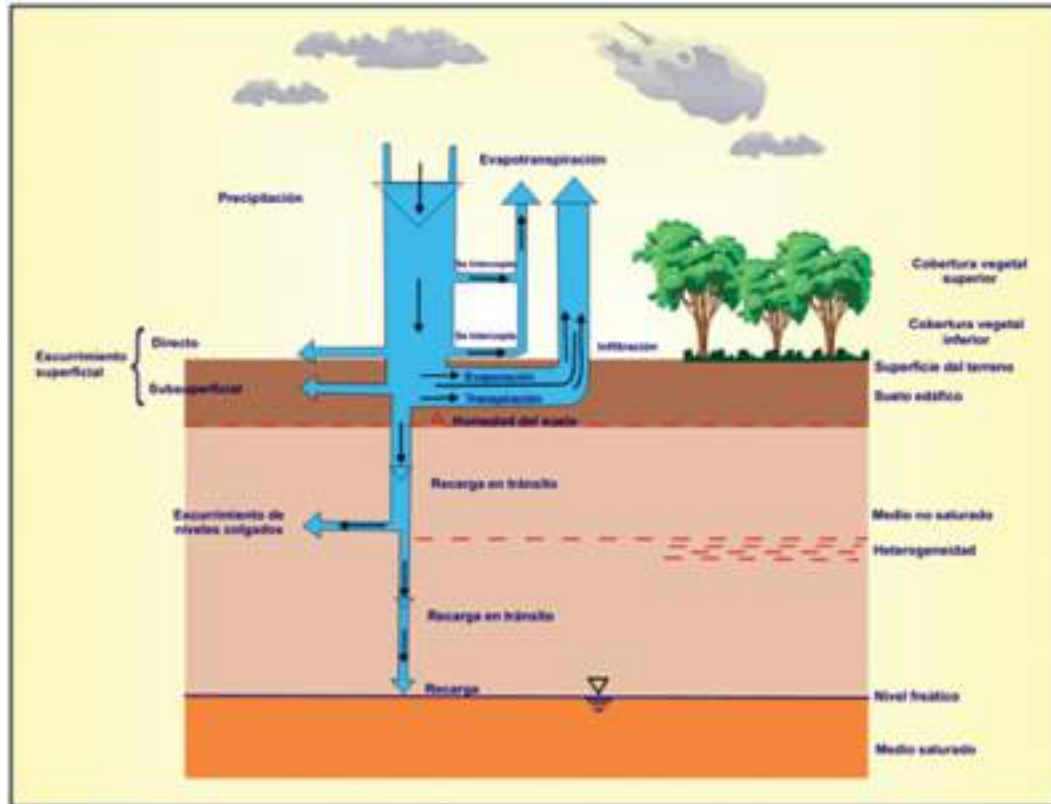
### Formación Tarango

Estas zonas se encuentran en los pie de monte de las sierras al oriente y poniente de la Cuenca. Se componen de una gran variedad de material granular, el cual permite el flujo libre del agua, hacia los Depósitos Aluviales de la cuenca baja que circundan y subyacen la zona urbana. Debido a su pendiente (entre 4 y 10°), estas suelos son de vocación forestal, aunque sus bosques han sido muy dañados.

Estas zonas son aptas para la captación e infiltración de picos de lluvia a través de lagunas de infiltración ubicadas antes de las zonas urbanas cuenca abajo. En la Sierra de Las Cruces, la zona correspondiente a la Formación Tarango ha sido urbanizada; y está en proceso de urbanización en municipios del oriente como Ixtapaluca y Chalco.

## El proceso de infiltración

### Diagrama del comportamiento del agua pluvial al infiltrarse



Fuente: Adaptado de Custodia-Jimena, 1998.

Mientras que las formaciones geológicas realizan un papel determinante en la capacidad de almacenamiento del agua y la facilidad de su extracción, varios factores relacionados con la superficie intervienen en los procesos de infiltración. Un factor es la “capacidad de campo”, la cual se refiere al contenido de humedad que queda retenido en el suelo contra las fuerzas de gravedad.<sup>6</sup> El agua que infiltra el suelo ocupa todos o parte de los poros del terreno y, si supera la capacidad de campo, tiende a descender vertical y lentamente. El agua que se queda en la capacidad de campo está disponible para ser transpirada por las plantas en la zona de raíces, o para ser evaporada por la energía solar sobre la superficie del terreno.

Tabla 2. Los factores que influyen en el proceso de infiltración

Características del terreno o del medio permeable	Condiciones de superficie	Tipo y densidad de vegetación que cubre al suelo; compactación del suelo; pendiente del terreno.
	Características del terreno	Textura y estructura del suelo; cantidad de arcilla; calor específico
	Condiciones ambientales	Humedad del suelo; temperatura del medio y del suelo.

<sup>6</sup> Custodio-Gimena y Llamas-Madurga, 1983.



A continuación, se presentará información describiendo el impacto de los factores que intervienen en la capacidad de infiltración.

Tabla 2. Coeficientes de infiltración en función de la pendiente del terreno

Pendiente (grados)	Coeficiente de infiltración	Potencial para la infiltración-recarga
< 2	0.30	Muy alta
2 a 4	0.20	Alta
8 a 12	0.08	Moderada
12 a 13	0.05	Moderada
14 a 16	0.03	Baja
> 20	0.01	Baja

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

Tabla 3. Coeficientes de infiltración en función de los usos del suelo

Usos del suelo	Coeficiente de infiltración	Potencial para la infiltración-recarga
Agrícola	0.10	Moderada
Bosque	0.20	Muy alta
Pastizal	0.18	Alta
Urbana	0.00	Baja
Sin vegetación	0.05	Baja

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

Tabla 4. Permeabilidad en función de las láminas de infiltración.

Permeabilidad	Valores (cm/hora)
Muy lenta	< 0.15
Lenta	0.15 – 0.50
Lenta a moderada	0.50 - 2.00
Moderada	2.00 – 5.00
Moderada a rápida	5.00 - 10.00
Rápida	5.00 - 15.00
Muy rápida	15.00 – 25.00
Extremadamente rápida	> 25.00

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

Tabla 5. Volumen drenable o infiltración del suelo, en función de la conductividad hidráulica.

Permeabilidad / Porosidad Eficaz	Tipo de suelo	Valores (cm/hora)	Volumen (%)
Muy lenta		< 0.15	< 2.00
Lenta		0.15 - 0.50	2.00 - 4.00
Lenta a moderada	Solochack, Cambisol	0.50 - 2.00	4.00 - 8.50
Moderada	Feozem	2.00 - 5.00	8.50 - 12.00
Moderada a rápida	Regosol, Andosol	5.00 - 10.00	12.00 - 17.60
Rápida		5.00 -15.00	17.60 -18.30
Muy rápida		15.00 - 25.00	18.30 - 22.00
Extremadamente rápida		> 25.00	> 22.00

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

## Factores relevantes al diseño de proyectos para la recarga intencional de acuíferos en la Cuenca de México

1. El acuífero superior tiene mayor potencial para esfuerzos de recarga intencional, dado que es más accesible, y el costo del bombeo para su extracción posterior sería menor. Actualmente, el nivel piezométrico del acuífero superior está descendiendo entre uno y dos metros al año.
2. Como consecuencia de más de un siglo de sobreexplotación, la capa protectora del acuífero se está agrietando, lo cual pone en riesgo la calidad del agua en el acuífero, y la integridad de viviendas en su superficie.
3. Se podría esperar resultados positivos de la recarga intencional en relativamente poco tiempo, principalmente cuando sean ubicadas en las planas zonas de recarga que rodean la impermeable zona urbana.
4. Cualquier daño a la calidad del agua del acuífero sería prácticamente irreversible.

## Proyectos para la recarga de acuíferos

A continuación se describen el tipo de proyecto que podría servir para aumentar la recarga de los acuíferos de la Cuenca, si se aprovechara los volúmenes actualmente expulsados.

Tabla 6. Métodos que permitirían almacenar en los acuíferos, los volúmenes de agua actualmente expulsados de la Cuenca de México

Fuente: Elaboración propia

Estrategia de infiltración	Volumen a utilizar (m <sup>3</sup> /s)	% Potencialmente recargable	Volumen Recargable
Aguas residuales disponibles para tratar e infiltrar <sup>1</sup>	31.5		13.5
Riego agrícola. <sup>2</sup> Sustitución de pozos agrícolas por aguas tratadas	23.0	25%	5.8
Lagunas de infiltración	7.5	75%	5.6
Pozos para la inyección de aguas tratadas	2.0	98%	2.0
Aguas pluviales disponibles para procesos de recarga	9.3		7.2
Lagunas de infiltración	7.1	75%	5.3
Pozos para infiltración de aguas pluviales	2.0	90%	1.8
Terraceo, represas y reforestación <sup>3</sup>	0.2	20%	0.1
<b>Total</b>	<b>46</b>		<b>20.7</b>

- 1 Según la Conagua (2007), en esta década, el volumen de aguas residuales disponibles empezó a disminuir por primera vez en la historia de la Cuenca, debido principalmente a estrategias de reuso. El actual estudio supone que esta tendencia continuará, de tal modo que para el año 2015, en vez de los 32 m<sup>3</sup>/s actuales, la disponibilidad será de 26 m<sup>3</sup>/s, por las siguientes reducciones: 3 m<sup>3</sup>/s en el rescate de concesiones industriales en desuso por causa del reciclaje; y 3 m<sup>3</sup>/s que se dedicarán a reponer volúmenes perdidos por evaporación en los vasos al norte de la Cuenca, y en lagos y chinampas en el sur.
- 2 Este volumen estaría dedicado a riego como sigue: 12.6 m<sup>3</sup>/s para sustituir pozos agrícolas; 5 m<sup>3</sup>/s para sustituir aguas de riego no tratadas; y 5.4 m<sup>3</sup>/s para abrir nuevas zonas de riego.
- 3 Véase Propuesta 3, en donde se explican los métodos, avances y alcances de esta medida.

## RECARGA CON AGUAS TRATADAS

Las aguas tratadas representan una fuente predecible para la gestión de la recarga de acuíferos. Los retos para el éxito de estas estrategias depende de la capacidad técnica de garantizar la calidad del agua a ser manejada, y la capacidad social de lograr la aceptación por parte del público.

### Recarga mediante riego agrícola

Gracias a los permeables suelos de la cuenca, el riego agrícola representa una excelente manera para lograr la recarga. De hecho, el “nuevo” acuífero de Tula, es un claro ejemplo de la efectividad de esta estrategia.

### Sustitución de agua subterránea, con aguas tratadas, para usos agrícolas

La Cuenca de México cuenta con cinco zonas de riego con agua subterránea, distribuidas en el perímetro de la zona metropolitana en los municipios del Estado de México: Zumpango, Tecamac y Ecatepec en el norte; y Texcoco<sup>7</sup> e Ixtapaluca, en el oriente. En total, estas zonas comprenden 34,170 hectáreas.<sup>8</sup> Sin embargo, en décadas recientes, estas tierras, y sus pozos, han dado lugar a fuertes procesos de urbanización.

Este trabajo propone el fortalecimiento de las funciones ambientales de estas tierras, de modo que logren conformar un dinámico “cinturón verde” eco-productivo, reciclador de aguas tratadas y residuos orgánicos, y generador de alimentos y empleos.

### Sustitución de aguas no tratadas, con aguas tratadas

Los Distritos de Riego Chiconautla 083 y La Concepción 073, y varias otras zonas en la Cuenca están utilizando para riego, 5.0 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales no tratadas.<sup>9</sup> El Programa para el Saneamiento ha previsto una serie de plantas de tratamiento en el norte de la Cuenca, con el objetivo de lograr que los agricultores de esa zona cuenten con aguas tratadas. Faltará incluir plantas adicionales en el oriente y sur de la cuenca, para el mismo fin.

7 Conagua, Estadísticas del Agua en México, 2008. Aunque los Distritos de Riego de Zumpango, Tecamac, Texcoco e Ixtapaluca aparecen en el “Mapa del Estado de México”, de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2006, y sus poligonales aparecen en el mapa de Conagua 2008, no forman parte de la lista de Distritos de Riego presentada en “Estadísticas del Agua en México”, 2008 de Conagua.  
8 CNA, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Informe Estadístico, México, D.F., julio 2005.  
9 CNA, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Informe Estadístico, México, D.F., Julio 2005.

## NUEVAS ZONAS DE RIEGO

### Zonas de riego asociadas con unidades habitacionales

En los municipios de Chicoloapan, Chimalhuacan, Texcoco, Atenco, Ecatepec, Acolman, Chiautla, Papalotla, Ixtapaluca y Chalco, se ha dado un fenómeno de urbanización dispersa, con la construcción de grandes bloques de miles de viviendas, en medio de tierras de cultivo. Este patrón de urbanización, estilo tablero de ajedrez, se ha estado extendiendo sobre los depósitos aluviales vitales e indispensables para la recarga de los pozos metropolitanos.



Se propone garantizar la recarga a futuro a través de decretos de protección y servidumbres ambientales para conservar los usos agrícolas de estos suelos, sin afectar su propiedad, tal como está previsto por la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental,<sup>10</sup> y que sean dotados con infraestructura de riego. El agua para riego provendría de las plantas de tratamiento de las unidades habitacionales vecinas, las cuales actualmente vierten sus descargas hacia los canales de desagüe, por medio de los cuales dichas aguas son expulsadas de la Cuenca.<sup>11</sup>

### Participación de los agricultores

Esta estrategia requiere iniciativa e innovación por parte de los agricultores, quienes cambiarían el agua de pozo por aguas tratadas, ó, en su caso, pasarían de una agricultura de

10 ARTÍCULO 23 de la LGEEPA: ...(L)a planeación del desarrollo urbano...considerará los siguientes criterios: II.- En la determinación de los usos del suelo, se buscará lograr una diversidad y eficiencia de los mismos y se evitará el desarrollo de esquemas segregados o unifuncionales, así como las tendencias a la suburbanización extensiva; III.- En la determinación de las áreas para el crecimiento de los centros de población, se fomentará la mezcla de los usos habitacionales con los productivos... y se evitará que se afecten áreas con alto valor ambiental; V.- Se establecerán y manejarán en forma prioritaria las áreas de conservación ecológica en torno a los asentamientos humanos.

11 La Propuesta 7 describe como se podría rehabilitar y bajar los costos de operación de estas PTAR.

temporal a una de riego. En ambos casos, sería importante diseñar, en coordinación con los agricultores, programas de apoyo para realizar la transición, la cual tendría que incluir la adopción de métodos de cultivo no contaminantes del acuífero.

### Lagunas de infiltración con aguas tratadas

Las lagunas de infiltración representan la manera más eficaz para recargar los acuíferos con aguas tratadas. Esta técnica, la cual aprovecha la capacidad de los suelos y las formaciones geológicas para tratar y filtrar el agua, está siendo utilizada con éxito en varios continentes.

Los suelos de las zonas de recarga de la Cuenca permitirían la recarga de unos 100 m/año, para suelos limosos, y 300 m/año, para arenas medianas limpias. Las tasas de evaporación de las superficies expuestas son de unos 3.3 cm/mes durante la temporada de lluvias, y hasta de unos 18 cm/mes, durante los meses más calurosos y secos.<sup>12</sup>

Las lagunas de infiltración se construirían en asociación con las plantas de tratamiento, para recibir las aguas tratadas que no podrían ser utilizadas para el riego, por la falta de tierras disponibles para este efecto, ó por reducciones temporales de los volúmenes requeridos.

Una laguna de una hectárea en una zona de recarga típica en la Cuenca, con suelos rego-sol ó andosol, podría infiltrar 2 Mm<sup>3</sup>/año; dicho de otra manera, se necesitan 15.8 hectáreas para infiltrar 1 m<sup>3</sup>/s. Por lo tanto, para infiltrar 7.5 m<sup>3</sup>/s de aguas tratadas, se requieren de 118 hectáreas en lagunas de regulación. Lo óptimo sería construir cinco lagunas para cada planta, para permitir un proceso de rotación, en donde uno de los lagos siempre tendría la posibilidad de pasar por un proceso de desecación con el objeto de eliminar algas. Si se ha generado una capa impermeable de depósitos en el fondo del lago, es posible desintegrarla con el uso del arado.

### Recarga vía inyección de aguas tratadas<sup>13</sup>

Existe el potencial para recargar acuíferos urbanos mediante la inyección de aguas tratadas. Este tipo de estrategia es sumamente costosa, tanto por las inversiones iniciales requeridas, como en gastos de operación, e implica mayor grado de riesgo de contaminación del acuífero. Sin embargo, representa una alternativa para ayudar a frenar la crisis de los acuíferos en el sur de la Cuenca.

Según Monroy (2008), los pozos de inyección deben de ubicarse a una distancia de al menos 600 metros de los pozos de extracción. El agua inyectada debe permanecer un mínimo de un año en el acuífero antes de su extracción. Son necesarios pozos de monitoreo y revisiones sistemáticas que aseguren la eficacia del tratamiento.

<sup>12</sup> UNESCO, 2005.

<sup>13</sup> Monroy, Oscar. "La digestión anaerobia como parte medular de la sustentabilidad." Ponencia presentada ante el XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades. 24 abril 2008.

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para inyección deben incluir múltiples barreras independientes para detener microorganismos y contaminantes químicos; continuo monitoreo tóxico y epidemiológico, así como evaluaciones de confiabilidad y riesgo

El costo de construcción de plantas de tratamiento y potabilización anaerobio, sería de unos \$506 millones por m<sup>3</sup>/s de capacidad.

El 3 de junio 2008, fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-014-CNA-2003, “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos” el cual establece los requisitos para la Recarga Artificial de Acuíferos, mientras que el anteproyecto de NOM-015-CNA-2005 establece los requisitos para la Disposición de Aguas al Suelo y Subsuelo. Por parte del D.F., la norma NADF-003-AGUA-2002, reglamenta la calidad requerida para las aguas tratadas para ser inyectadas en el acuífero “Zona Metropolitana de la Ciudad de México”.

## RECARGA CON AGUA PLUVIAL



Laguna de absorción, Santa Catarina Delegación Tlahuac

En 1994, en la Delegación de Tláhuac se construyeron lagunas de infiltración de aguas tratadas, de 4 hectáreas cada una. En uno de los caso, no se previó que fracturas en la formación geológica permitiría que el agua saliera en una colonia cuenca abajo. Actualmente, la Delegación de Tláhuac está impermeabilizando el fondo para captar agua pluvial para riego.

El reto para la gestión de la recarga con agua pluvial es el manejo de los volúmenes repentinos, los cuales requieren ser almacenados temporalmente, dado que los procesos de infiltración son más tardados.

### Lagunas de infiltración con aguas pluviales

La captación de picos de lluvia a través de lagunas de infiltración representa la estrategia con mayor potencial, y menos costo, para aumentar la recarga de los acuíferos que alimentan los pozos de la zona metropolitana.

La desviación e infiltración de picos de lluvia antes de su llegada a la zona urbana en la cuenca baja, convertiría los volúmenes de agua que ahora representan un riesgo para la ciudad, en un recurso valioso.

En experiencias internacionales, las lagunas de infiltración son creadas en tierras agrícolas sobre zonas de alta permeabilidad, de manera temporal, rotativa y voluntaria, en zonas de alta permeabilidad. Comúnmente, las tierras que son convertidas en lagunas de infiltración

(vía costales de arena puestos a su alrededor) son beneficiados por la materia orgánica depositada ahí por las lluvias. Estas lagunas, de una a diez hectáreas cada una, con un metro de profundidad, se ubicarían cerca de cauces de escurrimientos permanentes ó intermitentes, y recibirían su agua por un sistema de compuertas.

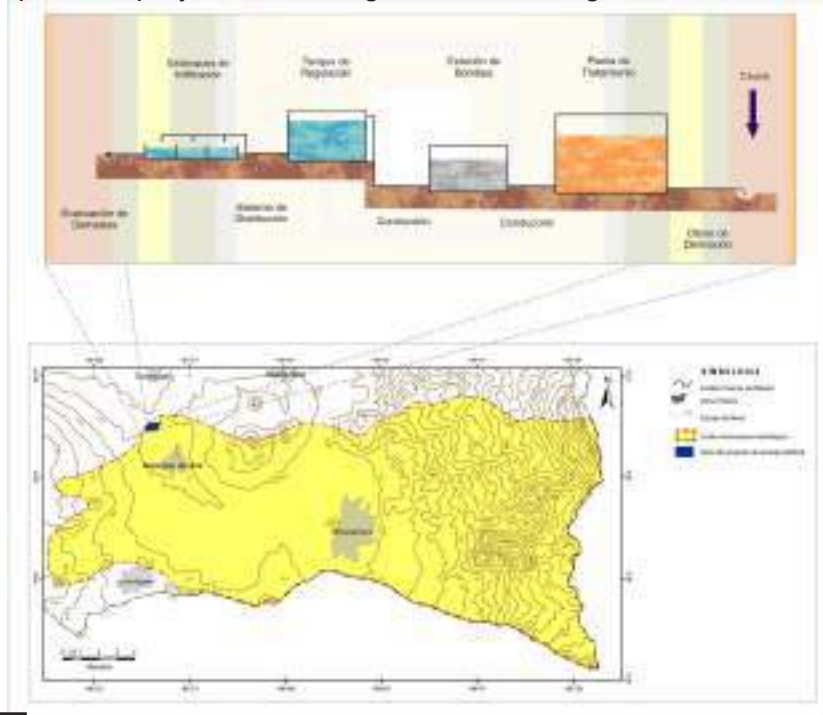
Dependiendo del tipo de suelo, el agua vertida sobre la laguna de regulación tardaría de uno a dos días en infiltrarse (tasa de infiltración 2.5 a 5 cm/hora). En total, la infiltración de 6 m<sup>3</sup>/s (189 Mm<sup>3</sup>/año) de agua pluvial en zonas de recarga en la cuenca media y baja, demandaría 473 hectáreas dedicadas a las lagunas de infiltración, cada a ser llenada 40 veces al año.<sup>14</sup>

Como ejemplo, 5 m<sup>3</sup>/s de agua originada por un pico de lluvia llenaría en una hora una laguna de infiltración, con una extensión de dos hectáreas y una profundidad de un metro. En 24 horas, esta agua habría sido absorbida por el acuífero subyacente, y la laguna estará lista para recibir el próximo volumen de agua.

## RECARGA CON ESCURRIMIENTOS

En el área natural protegida Ayaqueme en los municipios de Temamatla y Tenango del Aire, existen condiciones óptimas para un proyecto piloto de recarga de escurrimientos. El Ayaqueme consiste en un afloramiento de basaltos, sumamente permeables, ubicado por el cauce del Río Amecameca, cerca de la zona de pozos que alimenta 11 municipios del suro-riente del Estado de México. A continuación se presenta el diseño básico del proyecto.

Modelo conceptual del proyecto de recarga artificial con agua de escurrimiento.



14 "Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas", UNESCO, 2005.

## POZOS DE ABSORCIÓN EN ZONAS URBANAS

A mediados del siglo pasado, cuando se inició la etapa actual de acelerada urbanización, hubo varios intentos, muchos exitosos, de infiltrar agua pluvial en zonas de recarga en el área urbana, como medida para prevenir inundaciones y recuperar los niveles de agua en



los pozos, especialmente en el sur y poniente de la ciudad. Sin embargo, estas estrategias fueron abandonadas en los años 70, cuando la urbanización cuenca arriba contaminó las aguas de lluvia, y las tasas de sobreexplotación de los acuíferos llegaron a niveles tan altos que ya no fue perceptible el impacto de estos intentos de recarga.

Perforación de un pozo de absorción en Iztapalapa.  
Foto: Dr. Luis Felipe Sánchez-Díaz

A partir de los años 90, ante la creciente crisis de agua, esta estrategia ha sido retomada en el sur y oriente del área metropolitana. Estas experiencias recientes merecen ser evaluadas, para así generar programas estratégicos de mayor escala.

Las limitantes para los pozos de absorción de aguas pluviales en el área metropolitana son:

- Es necesario penetrar el acuitardo para llegar a las zonas de recarga;
- Los costos de mantenimiento son altos, por la acumulación de “basura”, azolve, ó algas;
- Puede haber taponamiento permanente de los poros de infiltración, por aceites u otras sustancias, así reduciendo la vida útil de los pozos;
- El agua pluvial a infiltrar puede contaminarse, con aditivos a la gasolina, aguas residuales, etc.;
- Existe la posibilidad de la erosión de la capa de arcilla cercana a los pozos de absorción. (En este respecto se menciona que, a nivel internacional, hay un aprovechamiento creciente del agua pluvial captada en los techos de inmuebles urbanos, la cual tiende a ser de mayor calidad.)



Tabla 3. Evaluación de experiencias de infiltración de agua pluvial en el Área Metropolitana de la Cuenca de México

Método	Resultados
Desviación Río Magdalena a basaltos de San Angel (CHCVM-SRH: 1944-60)	Infiltración de 73.5 Mm3  (4.6 Mm3/año)
Desviación Río Eslava hacia sumideros en basaltos del Xitle (CHCVM-SRH: 1953-54)	Alimentación de manantiales de Peña Pobre y Fuentes Brotantes
Infiltración de 6 lps, mediante 15-20 pozos de absorción de aguas pluviales y escurrimientos (CHCVM-SRH: 1953-57)	Recuperación de nivel en piezómetros ubicados a 50 m.
Recarga en 3 pozos de absorción, con agua de presa Mixcoac (CHCVM-SRH: 1956-75)	Excelente infiltración debido a inyección a presión; recuperación de los niveles en pozos cercanos
56 pozos de absorción, con profundidad de 35 m, en basaltos del Pedregal para drenaje pluvial de 260 has. (1970)	Unos funcionan hasta la fecha; otros fueron de tamaño insuficiente p/área drenada, otros se azolvieron
Pozos de absorción bajo áreas verdes de unidades habitacionales (Odpas Ixtapaluca: 1992-2008)	Se infiltra 60 lps de agua pluvial por cada pozo
126 pozos de absorción (Deleg. Iztapalapa: 2001-8)	Por evaluar
55 pozos de absorción (SACM/Deleg. Tlalpan 2004-6)	Infiltración 100 lps x pozo
Pozo de absorción para aguas pluviales (IEPSA-Médica Sur: 2005)	Tasa de infiltración 16.08 lps
Construcción de 75 de 500 pozos de absorción programados (GDF/Secretaría del Medio Ambiente: 2007-12)	Se proyecta inyectar al final del periodo, un caudal pico de 2.5 m3/s
3 pozos de absorción, con 10 cárcamos p/captación agua pluvial (GDF/Deleg Xochimilco: 2008)	Por evaluar

Fuente: Luis Felipe Sánchez-Díaz, "Recarga natural, inducida y artificial en la Cuenca de México (Definiciones y Ejemplos), realizado para el actual estudio.2008.

## Glosario de términos relacionados con la recarga de acuíferos

**Unidad hidrogeológica:** Un conjunto de formaciones geológicas interconectadas, entre las cuales el comportamiento del agua es relativamente homogénea.

**Acuífero:** Unidad hidrogeológica, compuesta de una ó más formaciones geológicas, que permite el almacenamiento, circulación y extracción de agua.

**Acuitardo:** Unidad hidrogeológica que muy difícilmente permite la entrada, circulación ó extracción de agua.

**Manto acuífero:** El nivel debajo del cual los espacios entre la materia pétreo están saturadas con agua.

**Recarga natural:** La infiltración de agua pluvial, escurrimientos ó deshielos, a través del suelo, que llegue hasta el manto acuífero.

**Recarga intencional:** El empleo de métodos para almacenar agua en los acuíferos para su posterior recuperación, también conocido como “recarga artificial”, “recarga gestionada” y “almacenamiento subterránea”.

**Lagunas de infiltración:** Terrenos excavados ó con bordes, ubicados sobre zonas de recarga, para lograr la recarga intencional de acuíferos con agua pluvial, residual tratada ó escurrimientos.

**Pozos de absorción:** Método para infiltrar, por gravedad y acción capilaria.

**Pozos de inyección:** Método para la infiltración acelerada de aguas tratadas, utilizando presión.

### EL ACUÍFERO COMO UNA UNIDAD ADMINISTRATIVA

Los “acuíferos” tal como han sido definidos por la Comisión Nacional del Agua, son más bien unidades de administración, y sirven principalmente para el manejo de concesiones de aguas subterráneas. Sus límites frecuentemente son determinados por criterios de gestión (por ejemplo, límites estatales) más que por criterios geológicos. Además, los “acuíferos” de la Conagua consisten de recortes verticales que incluyen todos los estratos que subyacen sus límites superficiales, aún si no están interconectados, ó si incluyen formaciones sin la capacidad para almacenar agua.