



COLABORACIÓN

Ingeniero Juan Manuel Lesser Illades

Juan Manuel Lesser Illades originario de la ciudad de México, obtuvo el título de ingeniero geólogo en 1971 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cursó estudios de posgrado y de especialización en geohidrología en Estados Unidos, Austria y Rusia. Tiene una amplia trayectoria en docencia y actualmente coordina los cursos internacionales de contaminación de acuíferos impartidos por la División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha participado como investigador principal en 107 proyectos gubernamentales.

En el año de 1997 recibió un reconocimiento por ser el primer mexicano certificado por la Asociación de Investigadores e Ingenieros en Aguas Subterráneas (Association of Ground Water Scientists and Engineers), división de la NGWA (National Ground Water Association).



Recarga del acuífero con agua residual tratada

► Introducción

La recarga artificial al acuífero de la ciudad de México puede presentar condiciones favorables para la disminución de la subsidencia del terreno; también el control del flujo subterráneo; en un mejor manejo del acuífero, así como el almacenamiento de agua para uso futuro, con lo que a largo plazo se podría reducir la importación de agua de cuencas externas. Para efectuar la recarga, **es necesario** que se cumplan las dos condiciones siguientes:

Primero. Que existan zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero.

Dichas zonas se pueden alcanzar por medio de pozos, lagunas y galerías filtrantes. Las lagunas de infiltración y galerías requieren de una gran superficie de terreno. Conviene hacer notar que las condiciones geológicas del valle de México impiden la infiltración de agua a través de lagunas en prácticamente toda el área del antiguo lago, por lo que este método de recarga sólo se puede realizar en los flancos de las sierras. Por otra parte, la recarga a través de pozos no requiere de gran extensión de terreno. Además, los pozos atraviesan la capa de arcillas impermeables que cubre la superficie.

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. La mayor parte de la cual se encuentra comprometida; sin embargo, se puede disponer de caudales tratados para este fin los cuales deben someterse a un tratamiento adicional para que alcance la calidad deseable para recarga.

En los últimos años, se han llevado a cabo actividades para la recarga artificial del acuífero de la ciudad de México. Entre ellas se incluyen estudios geohidrológicos (Referencia 1, 2 y 3); la aplicación de modelos para la simulación de la recarga (Referencia 4); la construcción y operación de modelos de laboratorio (Referencia 4 y 5); la construcción de una planta piloto de tratamiento a nivel avanzado que produce 20 l/s, los cuales son inyectados al acuífero (Referencia 5 y 6) y la construcción de una laguna de infiltración con capacidad inicial de 700 l/s de agua tratada (Referencia 7).

► **Características geohidrológicas de la Zona Metropolitana de la ciudad de México para la recarga**

En la zona estudiada se encuentran rocas que pueden agruparse de acuerdo a sus características las que permiten la infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el subsuelo. Se han identificado 9 zonas (figura número 1).

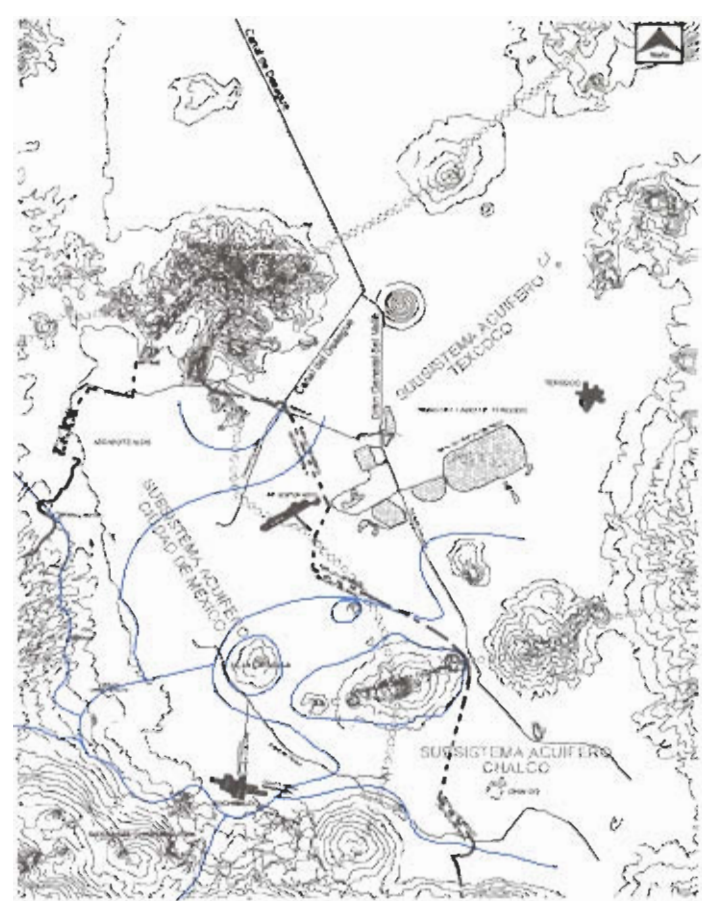


Figura 1. Zonificación geohidrológica

Zona 1. Lomas del Poniente

La zona 1 corresponde a las lomas del poniente de la ciudad de México, entre Chapultepec y Contreras. Esta porción se encuentra constituida por materiales granulares, cenizas, tobas y lavas. Las lavas generalmente son de composición andesítica y constituyen el núcleo de la Sierra de Las Cruces. La permeabilidad que presenta este conjunto de rocas se considera como baja, debido a que los caudales de extracción registrados en la mayor parte de los pozos que se ubican en ella varía entre 20 y 40 l/s. La conductividad hidráulica de estas rocas tiene un promedio de 2.3×10^{-5} a 4×10^{-6} m/seg (tabla número 1).

Zona 2. Area de transición del poniente

Corresponde a una franja alargada orientada norte-sur que se extiende desde Azcapotzalco hasta la Ciudad Universitaria. Esta zona se ubica al pie de la Sierra de Las Cruces y se le conoce como "zona de transición" por encontrarse formada por

materiales procedentes de la erosión de la mencionada sierra y el antiguo lago de México.

La erosión y transporte de materiales de la sierra acumularon arcillas, gravas y arenas, lo cual le imprime características geológicas y geohidrológicas especiales. En general, estos materiales presentan una permeabilidad que se puede considerar de media a baja. Los pozos existentes rinden caudales de entre 40 y 60 l/s y la permeabilidad o conductividad hidráulica promedio varía de 3×10^{-3} a 10^{-5} m/seg.

Dentro de esta región se encuentran un gran número de pozos actualmente en explotación. La zona se encuentra urbanizada.

Zona 3. Zona lacustre del centro de la ciudad

Corresponde a la zona plana de la ciudad, que incluye el centro histórico y sus alrededores.

Zona No.	Litología	Capacidad de infiltración	Caudal de recarga por pozo lps	Profundidad de los pozos de extracción m	Nivel estático Sep-98 m	Abatimiento anual 1997-1998 m/año	Conductividad hidráulica m/seg
1 Lomas del poniente	Fm. Tarango material granular, cenizas, tobas y lavas	Baja	20-40	300-350	100-180	0+1	0.00023
2 Zona de transición Lomas del Poniente	Fm. Tarango, arcillas lacustres, aluviones	Media a baja	40-60	250	50-100	Azcapotzalco (recuperación 1.0) Lomas 0.5-1.0	0.003
3 Zona de transición Tlalpán	Materiales granulares cubiertos por arcillas lacustres	Media a baja	60-80	200	30-50	0-1.0	
4 Zona de transición Sierra Sta. Catarina	Basaltos y aluviones cubierto por arcillas lacustres	Media a alta	60-90	150-350	30-60	0.5-1.0	0.000058
5 Sierra de Sta. Catarina y Chichinautzin	Gravas y piroclásticos basálticos	Alta	80-120	50-350	30-100	Sta. Catarina o Chichinautzin 0.0-0.5	0.07-0.007
6 Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués	Piroclásticos y lavas basálticas anteriores a Santa Catarina y Chichinautzin	Media a alta	80-100	50-200	50-70	0-1	
7 Zona Tlalpán Xotepingo	Basaltos intercalados con materiales granulares	Media a alta	40-70	200-400	45-100	-2	0.0058
8 Zona Ajusco	Andesitas y basaltos	Media a baja	-	-	> 100	0	
9 Sierra de Guadalupe	Andesitas y basaltos	Baja a nula	-	80-180	80	0-10	

Tabla 1. Características de las zonas geohidrológicas.

Se extiende desde Coyoacán al sur y se continúa al norte cubriendo la mayor parte de las delegaciones Benito Juárez, Cuauhtémoc y Venustiano Carranza. El subsuelo de esta zona se encuentra constituido principalmente por materiales granulares de permeabilidad media a baja. Pozos existentes en esta zona rinden caudales entre 60 y 80 l/s.

Zona 4. Zona de transición Sierra de Santa Catarina

Rodeando al Cerro de la Estrella y a la Sierra de Santa Catarina, se encuentra una zona plana que fue parte de los antiguos lagos de México. En el subsuelo de esta zona se presentan intercalados derrames lávicos de composición basáltica, procedentes de diferentes centros eruptivos, como los volcanes del Cerro de la Estrella, El Peñón del Marqués y los volcanes que constituyen a la Sierra de

Santa Catarina. Las lavas de basaltos de los volcanes se extendieron en el subsuelo y se intercalan con materiales granulares tales como gravas, arenas y arcillas, los que en su conjunto presentan una permeabilidad de media a alta. La mayor parte de los pozos que se encuentran perforados en esta zona, rinden caudales de extracción entre 60 y 90 l/s. Ejemplo de pozos en esta región son la batería Xotepingo, la batería Tláhuac-Neza; los pozos del oriente de la ciudad, como el pozo Santa María Aztahuacán, los pozos Iztapalapa número 4, 6 y 8, el pozo Santa Cruz Meyehualco y los pozos Purísima, entre otros.

Estos pozos se caracterizan por haber cortado en su construcción fuertes espesores de basaltos y piroclásticos de media a alta permeabilidad. La conductividad hidráulica de esta zona es de alrededor 5.8×10^{-5} m/seg.

Zona 5. Sierras de Santa Catarina y Chichinautzin

Corresponden a productos de emisiones volcánicas de composición basáltica y edad reciente. Predominan gravas de tezontle las cuales se encuentran intercaladas con cenizas volcánicas, arenas (lapilli) y lavas que en general le imprimen una alta permeabilidad. Los pozos perforados en estas zonas, rinden caudales entre 80 y 120 l/s.

La conductividad hidráulica media asignada a esta zona es de 7×10^{-2} a 10^{-4} m/seg. La Sierra del Chichinautzin ubicada en la zona sur del Distrito Federal, funciona en forma natural como una gran área de recarga del agua de lluvia, la que al precipitarse sobre el terreno se infiltra sin permitir la formación de corrientes superficiales que escurran y descarguen hacia los valles de Xochimilco y Tláhuac. Se hace notar que sí existen arroyos, pero que solamente en caso de lluvias extraordinarias alcanzan a presentar escurrimientos que se infiltran al subsuelo al llegar al valle.

En la Sierra de Santa Catarina la conductividad hidráulica es ligeramente menor que en la Sierra del Chichinautzin. Se encuentra constituida también por arenas (lapilli) y tezontles, intercalados con cenizas y lavas.

En el flanco sur de la Sierra de Santa Catarina se encuentra una batería de pozos (SC-1 al SC-10). El agua de los pozos es enviado para su potabilización a la planta ingeniero Francisco de Garay por presentar el agua un alto contenido de fierro manganeso y nitratos de origen natural, no se descarta la posibilidad de que estos elementos aumenten debido a la influencia de contaminación procedente de antiguos rellenos sanitarios.

Zona 6. Cerros de la Estrella y Peñón del Marqués

Está constituida por piroclásticos y lavas basálticas de mayor antigüedad que las rocas y materiales de la zona 5. Presentan una permeabilidad de media a alta. Los caudales extraídos son del orden de 80 a 100 l/s.

Zona 7. Zona Tlalpan-Xochimilco

En la zona sur y sur-oeste de la ciudad de México, entre Tlalpan y Xochimilco, se encuentra un área que presenta características geológicas y geohidrológicas peculiares.

Está constituida principalmente por basaltos intercalados con materiales granulares, los cuales presentan alta permeabilidad.

Existen más de 100 pozos que se encuentran ubicados en esta zona, que rinden caudales generalmente entre 40 y 70 l/s.

La conductividad hidráulica de las rocas es de 5.8×10^{-3} a 10^{-5} m/seg. Corresponde a una zona acuífera de alto rendimiento. La extracción por bombeo ha ocasionado la formación de un cono piezométrico.

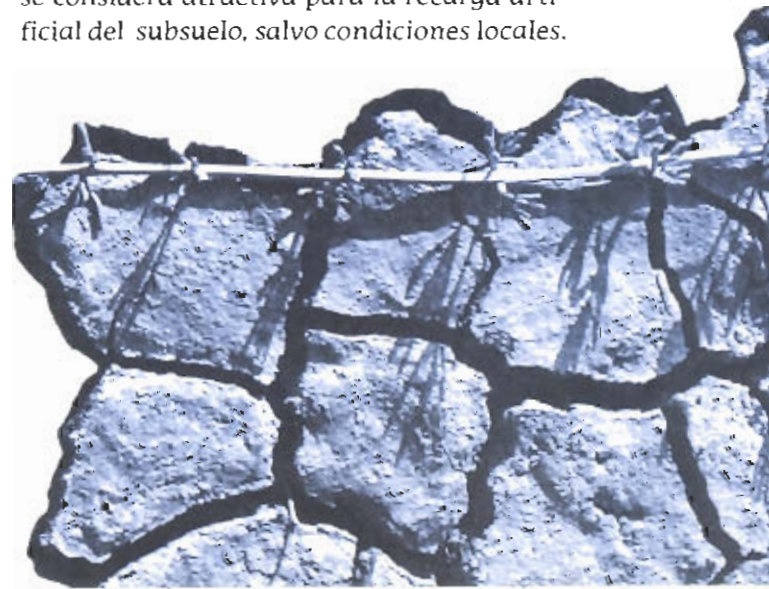
Zona 8. Zona Ajusco

La zona denominada Ajusco se encuentra formada por productos volcánicos entre los que predominan andesitas y basaltos. Tiene una permeabilidad de media a baja. Por su posición topográfica, el nivel estático es profundo.

Forma un área de alimentación de agua de lluvia al valle, no se considera apropiada para recarga.

Zona 9. Sierra de Guadalupe

En la parte norte de la ciudad de México se encuentra la Sierra de Guadalupe, la cual está compuesta por rocas volcánicas de baja a nula permeabilidad, razón por la que no se considera atractiva para la recarga artificial del subsuelo, salvo condiciones locales.



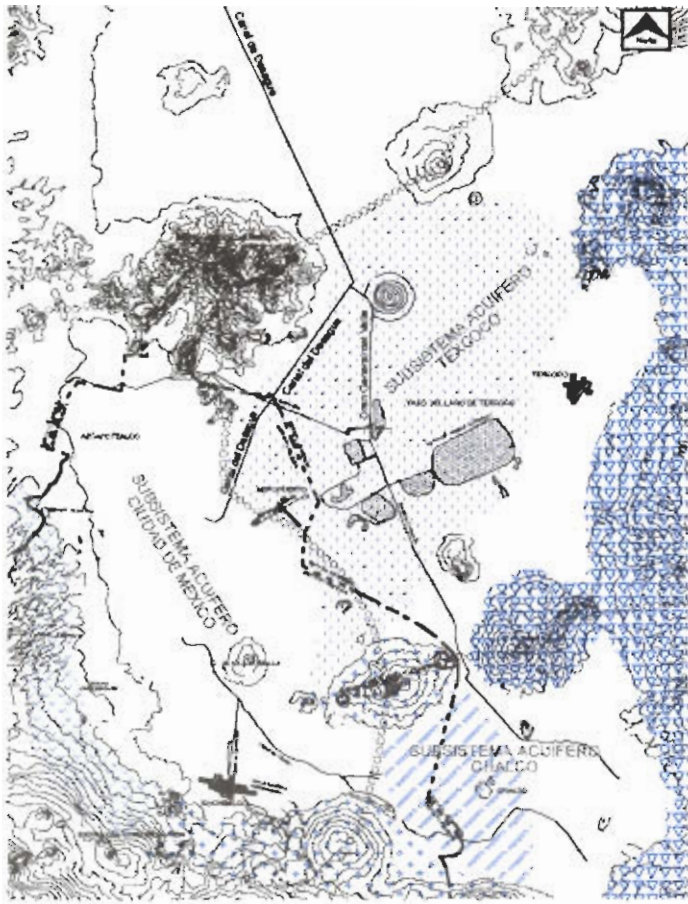


Figura 2
Zonas
apropiadas
para la
recarga
artificial del
acuífero.

► Zonas apropiadas para recarga

Las zonas que presentan condiciones favorables para la recarga se agrupan como sigue:

Basaltos y 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 (figura 2). Su alta permeabilidad permite la infiltración de agua, tanto a través de pozos como lagunas.

En los pozos se pueden recargar entre 60 a 80 l/s por pozo. A través de lagunas, se ha mostrado que en la Sierra de Santa Catarina se pueden infiltrar caudales superiores a los 700 l/s.

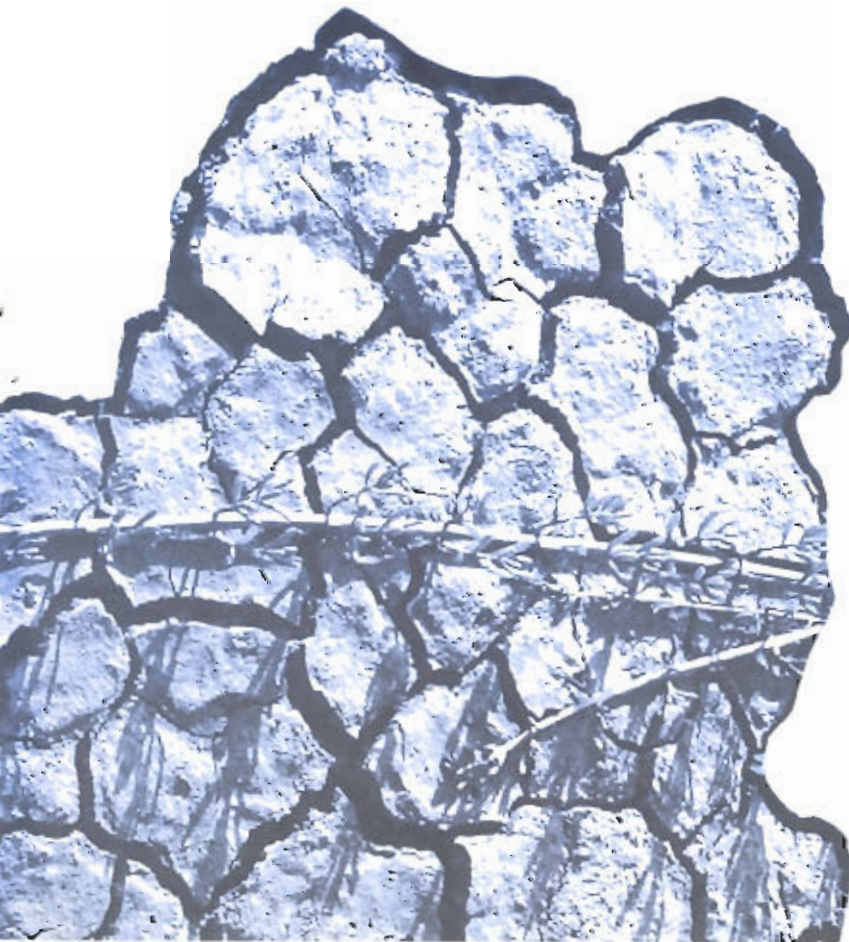
La Formación Tarango que aflora al pie de la Sierra de Las Cruces, se encuentra constituida por una serie de materiales entre los que predominan los de tipo granular, los cuales presentan una permeabilidad media.

En estos materiales es factible recargar agua al subsuelo en caudales de alrededor de 20 l/s por pozo.

En la Sierra Nevada que limita el oriente de la zona de trabajo, 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 l/s por pozo.

Los materiales granulares dentro de la ciudad de México, presentan una permeabilidad media. A través de ellos se puede efectuar una recarga artificial del orden de 10 a 30 l/s por pozo.

Hacia el valle de Texcoco, los materiales granulares que se encuentran en el subsuelo presentan una permeabilidad de media a baja. Permiten una recarga del orden de 5-10 l/s por pozo.



► Disponibilidad de agua para recarga

Uno de los primeros problemas que encara la recarga de acuíferos, es la fuente de agua o disponibilidad de agua para recarga. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México existen volúmenes de agua disponibles, principalmente de agua residual. La ciudad consume alrededor de 61.5 m³/s. Actualmente, una pequeña parte de ésta es tratada y reusada principalmente en riego de áreas verdes, industrias y llenado de canales como los 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.

Posibilidades de recarga con agua tratada a través de pozos, utilizando las plantas actuales (programa primera etapa)

En el Distrito Federal, existen 23 plantas de tratamiento. De ellas, 13 se encuentran ubicadas en sitios donde se puede realizar la recarga al acuífero a través de pozos. Las 10 restantes se localizan cerca de pozos de abastecimiento de agua potable, razón por la que no se consideraron.

Las 13 plantas de tratamiento seleccionadas se muestran en la figura 3. La mayor parte del agua actualmente 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, es la que podría destinarse para la recarga y se comenta a continuación.

La planta Acueducto de Guadalupe tiene una capacidad de operación de 57 l/s 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 permiten 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 l/s.

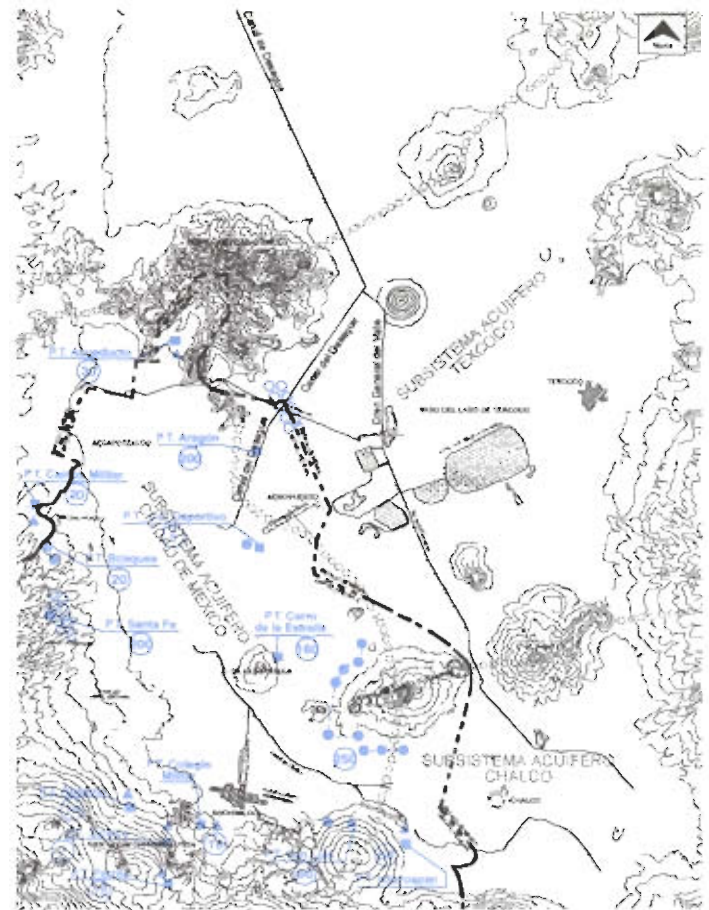


Figura 3

Proyecto de recarga artificial a través de pozos, utilizando agua residual tratada.

La planta de San Juan de Aragón actualmente tiene una capacidad de operación de 364 l/s. Considerando destinar 200 l/s para la recarga, ésta se puede llevar a cabo a través de 10 pozos, con un caudal de 20 l/s por cada uno. Se sugiere que los pozos se ubiquen en una batería a lo largo del límite del Distrito Federal. Hacia esta zona, los materiales que existen en el subsuelo permiten la recarga artificial; además, estarían alejados de actuales pozos de extracción y, por otra parte, en el sitio propuesto para la batería de pozos el flujo del 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 que abastece a la ciudad de México.

La planta de tratamiento de aguas residuales Ciudad Deportiva tiene un gasto actual de operación de 80 l/s. Existe la posibilidad de derivar 5 l/s para recarga, lo cual se puede realizar a través del pozo 28 (actualmente fuera de servicio). Alrededor del pozo 28 no hay extracciones que pudieran verse afectadas en forma directa. Además, en este sitio existen 3 pozos de monitoreo que permitirían conocer la modificación de la calidad del agua en el acuífero.

La planta de tratamiento Cerro de la Estrella es la más grande en el Distrito Federal. Actualmente tiene una capacidad de operación de 2300 l/s a nivel terciario. Podrían destinarse 410 l/s para ser recargados a través de 9 pozos ya existentes, ubicados en los alrededores de la Sierra de Santa Catarina, 5 en la porción sur y 4 en la porción norte. Existe una conducción de aguas tratadas que va de la planta Cerro de la Estrella hacia el área de Xochimilco, que parcialmente puede ser utilizada para este fin.

En los pozos ubicados al norte de la Sierra de Santa Catarina, la permeabilidad de los materiales permite la recarga de 40 l/s por pozo, para hacer un total de 160 l/s. Al sur de la sierra se encuentran los pozos SC, en los que se pueden recargar 50 l/s por pozo para sumar un total de 250 l/s. Uno de estos pozos, el SC-6, fue adaptado para recarga por la DGCOH y se encuentra operando. Incluye un tren de tratamiento avanzado previo a la inyección.

La planta de tratamiento Bosques de Las Lomas tiene una capacidad de operación de 27 l/s, de los cuales 20 pueden ser recargados al subsuelo a través de un pozo ya existente, que anteriormente se utilizaba para agua potable, pero que actualmente no funciona.

La planta de tratamiento del Campo Militar tiene una capacidad de operación de 30 l/s. Suponiendo que podrían destinarse 20 l/s de dicha agua para recarga, la inyección se podría realizar a través de un pozo a perforar 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 l/s. Se podrían derivar 60 l/s para recarga a través de un pozo nuevo que se requeriría perforar junto a la planta.

Las plantas de tratamiento ubicadas en la porción suroeste de la zona metropolitana correspondientes a Abasolo, II. Colegio Militar y Parres, tienen un caudal de operación de 15 l/s cada una de ellas. Se desconoce la utilización de estas aguas. Estos caudales pueden recargarse 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 l/s, de los cuales se estima que se pueden recargar 7 l/s 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 a través de él, recargar 60 l/s. Alrededor del pozo SL-15, existen 3 pozos de monitoreo para recarga.

En la planta de tratamiento Santa Fe actualmente se tratan 280 l/s a nivel secundario de los que 200 pueden ser recargados al subsuelo a través de una batería de 8 pozos ubicados en las cercanías de la planta.

En resumen, este programa inicial de recarga de agua tratada a través de pozos, involucra a 7 plantas donde se requiere la perforación de un pozo de recarga en cada una de ellas. Existen 2 pozos que se encuentran fuera de uso y que pueden utilizarse para recarga junto a las plantas Bosques de Las Lomas y Ciudad Deportiva. Caso similar se presenta en la planta de San Luis Tlaxialtemalco, donde aproximadamente a 4 kilómetros al oeste se encuentra el pozo SL-15, el cual ha sido adecuado con anterioridad para recarga. Las plantas que cuentan con mayores volúmenes de agua disponible corresponden a San Juan de Aragón, Santa Fe y Cerro de la Estrella. Las dos primeras se encuentran ubicadas de tal manera que pueden alimentar baterías de 8 y 10 pozos, respectivamente, y a través de ellos recargar 400 l/s de agua al subsuelo. De la planta Cerro de la Estrella, se estimó un volumen de recarga de 410 l/s a través de 9 pozos ya existentes. Este programa en conjunto incluye la recarga de 1057 l/s a través de 37 pozos, 12 de los cuales ya se encuentran perforados.

Para la recarga artificial al acuífero utilizando agua residual tratada, se deberá adecuar su calidad mediante tratamientos adicionales.





► Recarga a través de lagunas

La DGCOH construyó una laguna para la infiltración de aguas tratadas sobre el flanco sur de la Sierra de Santa Catarina. Las primeras experiencias obtenidas indican que se pueden recargar más de 700 l/s. Previamente a la continuación de la recarga masiva de agua a través de una superficie aproximada de 6 hectáreas, se recomienda realizar un monitoreo a fin de evaluar el impacto de la recarga sobre el acuífero.

Recarga de agua pluvial

En la ciudad de México se presentan precipitaciones del orden de 800 milímetros anuales. La recarga de aguas pluviales puede realizarse a través de pozos, lagunas 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, en forma general puede ser factible. Se requieren estudios de detalle para su ubicación y el cálculo de arrastre de sedimentos y vida útil de cada sitio.

La reforestación de las zonas topográficas altas es una acción benéfica, ya que por una parte evita la erosión y el arrastre de sedimentos, y por la otra incrementa la capacidad de infiltración de agua al subsuelo. Para recargar agua pluvial al subsuelo es necesario primeramente, localizar los sitios donde se captarían las aguas pluviales. Para ello se seleccionaron los cauces de arroyos en los flancos de las elevaciones topográficas que circundan a los valles de México, Texcoco y Chalco.

Destaca la zona poniente de la ciudad de México. Aquí el agua que escurre a través de ríos y arroyos generalmente presenta mala calidad, lo que limita su utilización para la recarga; por ello es necesario el saneamiento de esta zona, iniciando con la construcción de redes de drenaje en zonas donde se carece de ellas. Ya saneadas las cuencas, el agua de lluvia puede ser captada en los arroyos y recargada al subsuelo mediante pozos.

Con el objeto de mantener volúmenes que permitan la recarga por un tiempo largo, se recomienda construir tanques de almacenamiento y regulación. En la figura número 4 se muestra un tanque de regulación de volúmenes de inyección, que puede ser integrado como parte de las estructuras necesarias previas a la inyección. Deben de contar con un punto para el monitoreo de la calidad del agua de inyección, así como desinfección.

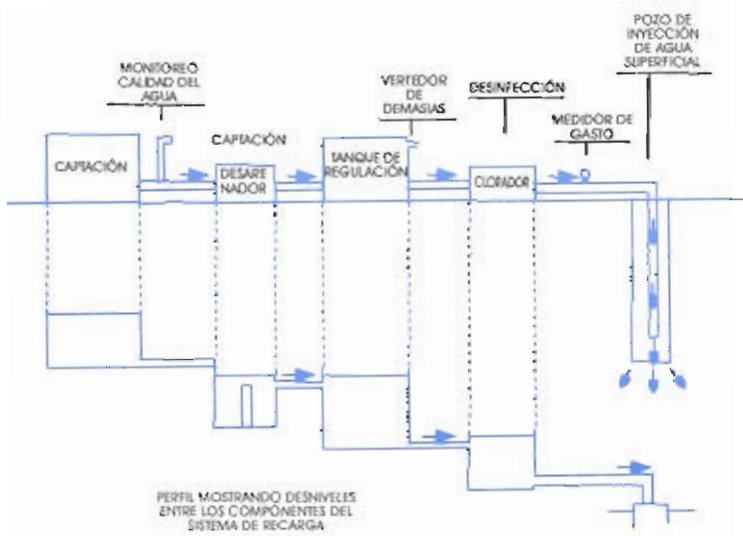
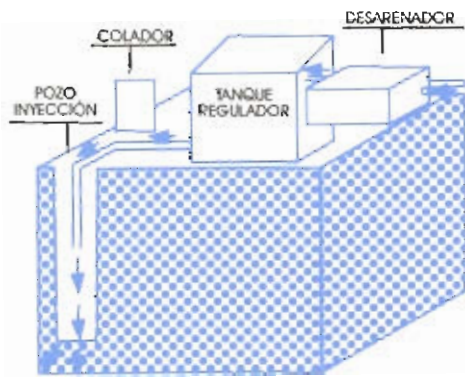
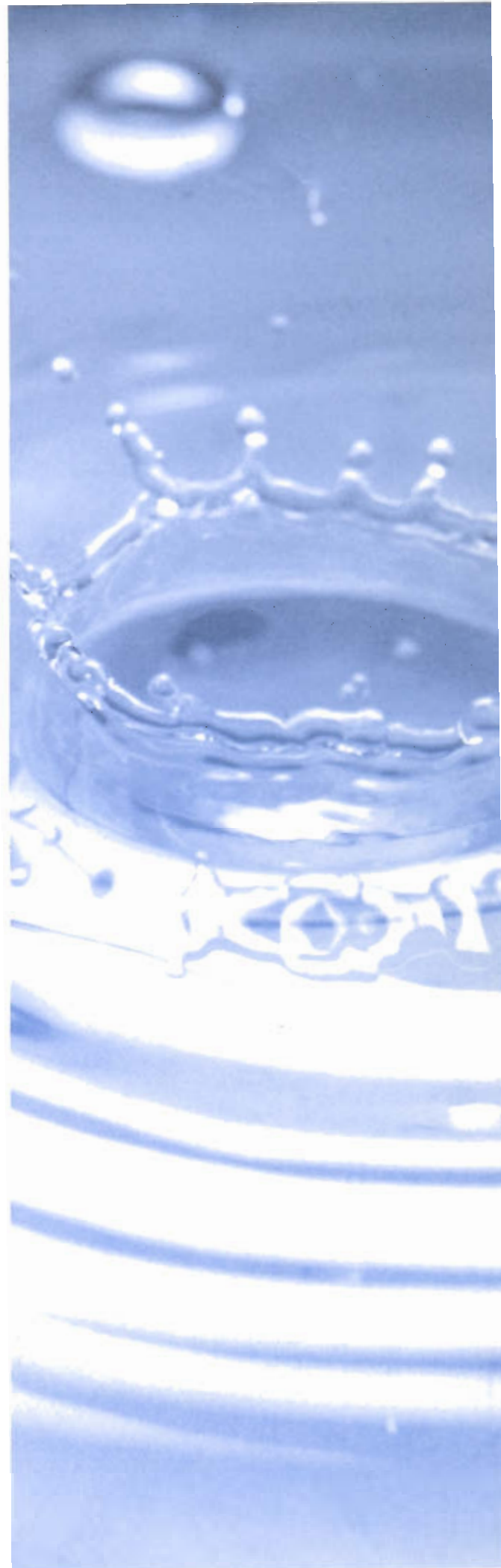


Figura 4

► **Mantenimiento de pozos de recarga para evitar la colmatación**

Al realizar la inyección de agua al subsuelo, el principal problema que se presenta en la operación de los pozos es la colmatación o taponamiento por crecimiento de materia orgánica y en menor proporción por la acumulación de sedimentos finos e incrustación.

El agua que se encuentra en la superficie, aun cuando se clasifique como de buena calidad, incluye microorganismos. El oxígeno presente en el agua facilita el crecimiento de colonias bacterianas que llegan a disminuir la capacidad de absorción de los pozos.



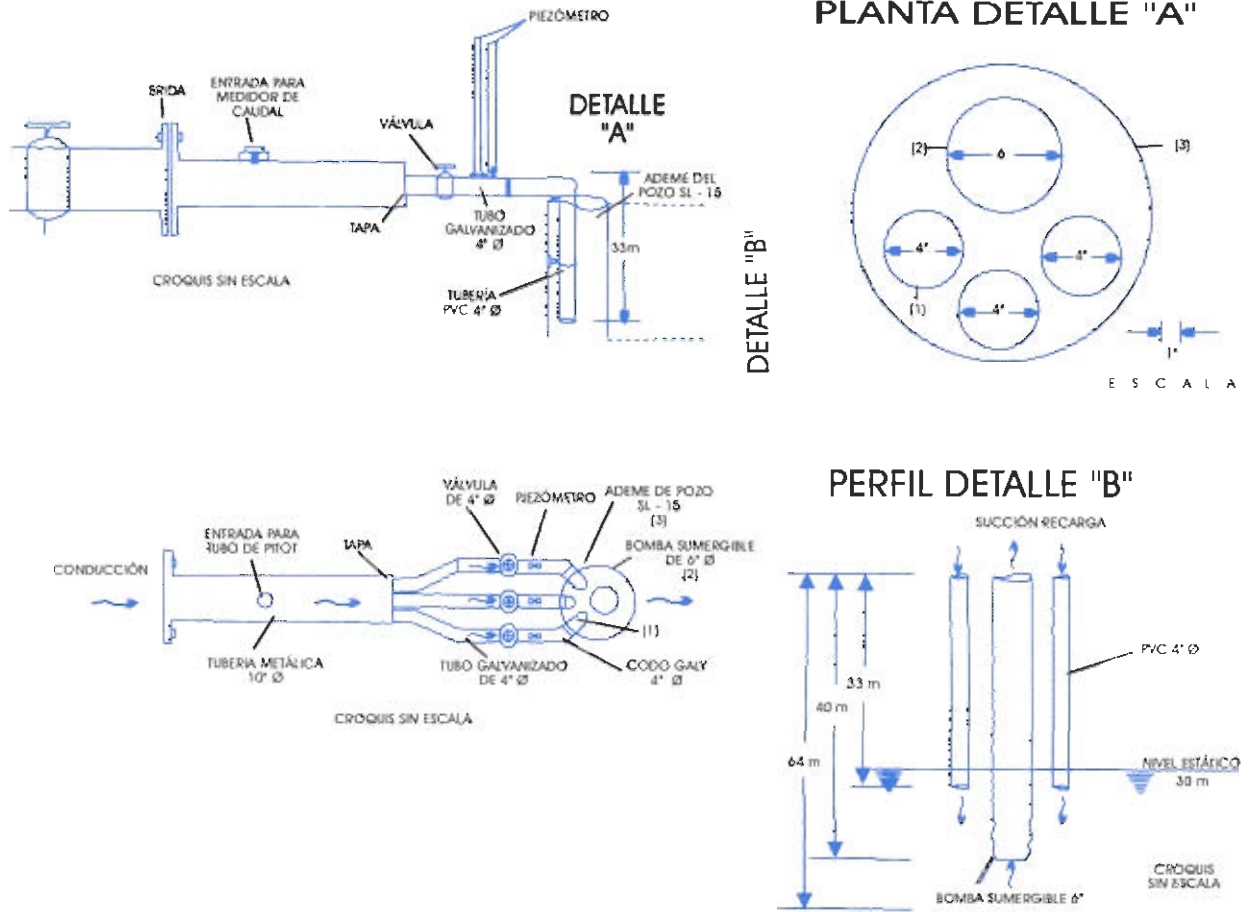


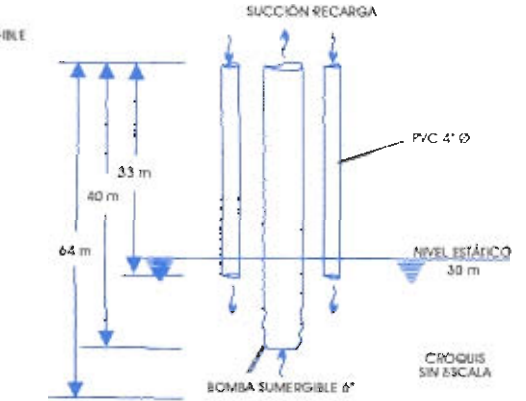
Figura 5
Adaptación de un pozo para recarga
(usado en el pozo SL-15 de la DGCOH)

Un ejemplo típico de recarga y que puede generalizarse, fue la adaptación del pozo SL-15 para recarga (figura 5). A través de él se proyecta la infiltración de agua por gravedad desde la superficie. De acuerdo con las experiencias de recarga artificial que se realizan en la planta Fred Herbey de El Paso, EUA, es conveniente disponer el agua de recarga abajo del nivel estático, a fin de evitar la aereación que provoca taponamiento del pozo. Tomando en cuenta el diámetro del pozo SL-15, la forma más apropiada consistió en colocar tres tuberías de inyección de 4 pulgadas de diámetro cada una, para permitir una recarga unitaria (por cada tubo de 4") cercana a los 20 litros. Además, se tiene la ventaja de que para caudales menores se utilizan sólo una o dos tuberías, según se requiera.

PLANTA DETALLE "A"

DETALLE "B"

PERFIL DETALLE "B"



► Calidad del agua para recarga

De acuerdo a los lineamientos sobre la calidad requerida para el agua que se utiliza en la recarga de los acuíferos, ésta debe 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 a un nivel terciario o avanzado según el tipo de rocas en donde se realice la recarga.

Cuando la recarga se efectúa a través de materiales granulares, estos tienen capacidad para "tratar" el agua. El subsuelo constituye una enorme planta de tratamiento natural. Sin embargo, en las zonas en donde

se encuentran materiales fracturados y piroclásticos de alta permeabilidad, el agua circula rápidamente y el único factor que podría disminuir la carga contaminante sería la dilución.

Un ejemplo de tratamiento avanzado previo a la recarga lo constituye la Planta de Tratamiento Santa Catarina 6, la cual trata 20 l/s que son recargados al acuífero a través del pozo SC-6, constituyendo el primer sitio piloto en el Distrito Federal para recarga de acuíferos con agua tratada.

► Conclusiones

Para efectuar la recarga artificial al acuífero es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes. Primero. La existencia de sitios y zonas permeables. Segundo. La existencia de volúmenes de agua susceptibles de destinarse para la recarga.

La recarga puede realizarse a través de pozos o de lagunas.

La capacidad del acuífero de la ciudad de México para recarga es muy grande, por lo que ésta se deberá medir con base en la disponibilidad de agua.

En una alternativa preliminar se obtuvo la posibilidad de recargar 1057 l/s a través de 37 pozos, 12 de los cuales ya se encuentran perforados.

La recarga de agua tratada a través de lagunas, actualmente se realiza con un caudal reducido en Santa Catarina. Es factible incrementar el volumen.

Es viable la captación y recarga de agua de lluvia, utilizando dispositivos a lo largo de arroyos y en áreas tales como estacionamientos o techos de centros comerciales, etcétera, de tal manera que permitan su captación y tratamiento previamente a su inyección al subsuelo.

► Recomendaciones

Sanear los flancos de las sierras que bordean a la zona metropolitana para procurar la recarga artificial con agua de lluvia, antes de que ésta se contamine a lo largo de los cauces de los arroyos.

Monitorear el acuífero para conocer los efectos de la actual recarga artificial a través de la laguna de Santa Catarina.

► Referencias

DGCOH-DDF. 1990. Recarga Artificial sobre el Acuífero en el Pozo SC-6. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V. para la Subdirección de Desarrollo, contrato 033-1-1018.

DGCOH-DDF. 1995. Balance Geohidrológico y Recarga Artificial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V. para la Subdirección de Programación, contrato 5-111-1-0415.

DGCOH-DDF. 1997. Monitoreo de la Calidad del Agua en la Zona de Recarga de Santa Catarina. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V. para la Subdirección de Desarrollo, contrato 7-CO4-1-0577.

PETTER, C.W. 1993. Contaminante Hydrogeology. Macmillan Publishing Company. 458 p.

KERR, J.S. 1997. An Introduction to the Technology of Subsurface Wastewater Injection. Environmental Protection Technology Series. EPA-600/2-77-240.

KNOOR, D.F. 1979. Direct Recharge for El Paso, Texas. Proceeding-Volume 1. Water Reuse Symposium, Washington, D.C. AWWA Reaseanch Foundation, Denver, Colorado.

LERNER, D.F., A ISSAE an I. SINMERS. 1980. Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. Inernational Association of Hidrogeologist, vol. 8.

Pettyjohn, W.A. 1981. Introduction to Groundwater Recharge, NWWA/EPA serie 5.

United Nations, 1975. Groun-Water Storage and Artificial Recharge. Natural Resources/Water Series No. 2.