



MEMORIAS DEL TALLER

# RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO

8 de junio de 2017



---

## **Autores**

Fernando J. González Villarreal

Angélica Mendoza Mata

Jorge Alberto Arriaga Medina

## **Diseño Gráfico**

Joel Santamaría García

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL.</b>	<b>5</b>
<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
Objetivos generales:	5
Aplicaciones	5
<b>Criterios técnicos</b>	<b>6</b>
Localización	6
Fuentes y calidad del agua de recarga	7
Factibilidad hidrogeológica y caracterización	9
Operación y monitoreo	10
<b>Marco legal</b>	<b>11</b>
NOM – 014 – CONAGUA – 2003 y	
NOM – 015 – CONAGUA – 2007	11
Cambios sugeridos en la normatividad y gestión	11
<b>Criterios socio – económicos</b>	<b>12</b>
Incentivos económicos para promover la recarga	13
<b>METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS POTENCIALES DE RECARGA ARTIFICIAL.</b>	<b>14</b>
Evaluación de sitios	14
Sitios potenciales y dispositivos	15
Operación y monitoreo	16
Problemas frecuentes de operación y limitaciones	16
<b>RECOMENDACIONES PARA EL PLAN DE GESTIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO</b>	<b>18</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>20</b>
<b>ANEXO 1. DIAGNÓSTICO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DE MÉXICO</b>	<b>21</b>
<b>Inventario de experiencias</b>	<b>21</b>
Etapa I: 1940 – 1980	21
Etapa II: 1980 – 2000	22
Etapa III: 2000 – actual	24

## INTRODUCCIÓN

El pasado 8 de junio, la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Red del Agua celebró el taller Recarga Artificial del Acuífero del Valle de México, teniendo como sede la sala de seminarios Ignacio Chávez. Al taller asistieron más de 30 expertos, en donde académicos (UNAM, IMTA y UAM), representantes del gobierno federal (CONAGUA y CFE), personal de organismos operadores (OOMAPAS Sonora) y miembros de la iniciativa privada (Soluciones Hidropluviales, BETSCO, Suez y FICUASA), así como de asociaciones profesionales (Asociación Geohidrológica Mexicana), se dieron cita para discutir, analizar y generar propuestas de solución a la situación actual y los retos que enfrenta la implementación de la recarga artificial en el acuífero del Valle de México.

Estas memorias recuperan el conjunto de ideas discutidas y las conclusiones más importantes a las que se llegó en el taller, el cual contempló las siguientes actividades:

- Una introducción, respecto al diagnóstico y la situación actual de la recarga artificial en el acuífero del Valle de México.
- Dos mesas de trabajo bajo los temas:
  - Criterios para la implementación de la recarga artificial; y
  - Metodología para la determinación de sitios potenciales de recarga artificial
- Recopilación de recomendaciones para un Plan de Gestión del Acuífero del Valle de México.

El taller Recarga Artificial del Acuífero del Valle de México no solo ofreció a los asistentes un panorama actual de la situación del acuífero y de los grandes retos por los que atraviesa, sino que presentó propuestas sobre metodologías, cambios legales, innovaciones tecnológicas y nuevos enfoques de participación para hacer realidad los principios y recomendaciones que permitan una gestión sostenible e integral del acuífero, dentro del contexto de un manejo conjunto de los recursos hídricos en el Valle de México.



Figura 1. Durante la inauguración del taller



Figura 2. Grupo de trabajo: criterios de selección (izquierda) y determinación de sitios potenciales (derecha) de recarga artificial

## CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial pretende contribuir, dentro de una factibilidad técnica, institucional, social y económica, a una gestión más racional del potencial hídrico que presenta una determinada cuenca o sistema de explotación. Los objetivos que persigue generalmente se engloban en dos grandes vertientes: aumento u optimización del volumen del recurso hídrico y la prevención o corrección del deterioro de la calidad del agua.

### Objetivos

En el contexto delimitado por la cuenca del Valle de México, los expertos mencionaron tres objetivos principales.

### Objetivos generales:

- Preservar la reserva estratégica del acuífero en cantidad y calidad, garantizando el abastecimiento a la población.
- Lograr el equilibrio entre la extracción y la recarga, promoviendo la recarga natural y artificial del acuífero como elemento de mitigación ante el cambio climático.
- Promover el aprovechamiento de aguas pluviales y el reúso de agua residual tratada.

### Aplicaciones

El cumplimiento de estos objetivos puede lograrse mediante la aplicación inmediata de acciones especí-

ficas que incluyan:

- Almacenamiento subterráneo de escurrimientos superficiales no regulados.
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico.
- Control de hundimientos.
- Reducción de costos de transporte, almacenamiento y/o bombeo.
- Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona vadosa como elemento de tratamiento para agua residual tratada.
- Dilución del excesivo contenido en nitratos, cloruros u otros constituyentes químicos.

Los miembros del taller determinaron que resulta difícil establecer un orden prioritario entre los aspectos mencionados anteriormente, ya que la mayor o menor importancia de uno respecto a otro varía en función de múltiples factores existentes en el lugar específico donde se pretende ejecutar una experiencia concreta, tales como el clima, las presiones sociales, los condicionantes económicos, entre otros.

Se concluyó que la complejidad del medio en el que subyace el Valle de México ha dado oportunidad a que en un mismo sitio se hayan presentado distintos objetivos a lo largo del tiempo.

## **Criterios técnicos**

---

### **Localización**

De manera introductoria, los miembros del taller mencionaron que para efectuar la recarga es necesario que se cumplan dos condiciones iniciales básicas para su implementación:

- Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración al acuífero mediante pozos y estanques. Estos últimos requieren de una gran superficie, por lo que se realizó hincapié en que las condiciones geológicas de la cuenca impiden la infiltración con este método en prácticamente toda la zona del antiguo lago, pudiéndose realizar sólo en los flancos de las sierras y en la zona norte del Valle (acuífero Cuautitlán Pachuca).
- Existencia de volúmenes de agua disponibles para utilizarse en la recarga. Los volúmenes disponibles en la Ciudad de México corresponden principalmente a las aguas residuales tratadas provenientes de las plantas de tratamiento distribuidas en toda la ciudad, las cuales, en algunos casos, se recomienda se sujeten a un tratamiento adicional para que logren la calidad requerida para la recarga. Otra posible fuente es el agua de lluvia, utilizando dispositivos de captación.

## Fuentes y calidad del agua de recarga

Otra condición necesaria para implementar cualquier tipo de dispositivo encomendado a la recarga artificial es disponer de agua para su infiltración. De manera general, se concluyó que los principales aspectos a considerar son: la localización de los puntos de toma, el caudal disponible y régimen temporal, así como las características de su calidad y variabilidad temporal.

Se identificaron dos fuentes principales:

- Agua superficial continua (agua fluvial) o discontinua (agua pluvial).
- Agua residual tratada.

Se enfatizó también en la necesidad de identificar que no toda la aportación excedente de la cuenca es susceptible de aprovechamiento mediante recarga artificial, ya que la distribución espacial y temporal no es uniforme, presentando puntos máximos de caudal que obligan a sobredimensionar el tamaño de las instalaciones, lo que implica un aumento en el precio de éste, para una utilización reducida y complicada de los dispositivos de infiltración que, incluso, en el caso de grandes avenidas, puede llevar a su destrucción.

Por otro lado, resultó relevante la cuantificación de aportaciones y volúmenes potenciales infiltrables con agua de lluvia, en el cual se determinó:

- La necesidad de un análisis climatológico y de distribución espacio – temporal: la cuantificación de la lluvia y el análisis de caudales deben dar lugar a modelos lluvia – escurrimiento – infiltración, que ofrezcan una herramienta de predicción para simular diferentes alternativas de gestión.
- Generación de series de los volúmenes a infiltrar: donde se deberá considerar una simulación de los volúmenes potencialmente infiltrables en el periodo analizado, suponiendo instalaciones de recarga trabajando en un punto óptimo o teórico de funcionamiento.

Se puntualizó que la recarga con agua pluvial puede realizarse a través de bordos o presas construidas sobre los flancos que circundan el Valle de México, para los cuales se consideró conveniente realizar estudios de detalle para su ubicación. Se sugirió la reforestación como medida de implementación crítica en las zonas altas topográficamente, con la finalidad de evitar procesos erosivos y de arrastre de sedimentos que pueden ayudar al incremento de la infiltración en el subsuelo.

Con relación a la infiltración de agua de lluvia a través de pozos, se destacó la localización de los sitios donde se captarían las aguas pluviales, los cuales corresponden a cauces de arroyos en los flancos contiguos al Valle de México, en Texcoco y Chalco.

En la zona poniente de la Ciudad de México, el agua que escurre a través de ríos y arroyos presenta mala calidad, lo que limita su utilización para la recarga. Una alternativa expuesta fue el saneamiento de la cuenca para evitar el deterioro del agua de lluvia al circular por los cauces.

Respecto a la zona Sur, específicamente en la Sierra Chichinautzin, las rocas presentan buena permeabilidad, por lo que todos los escurrimientos superficiales se infiltran de manera natural antes de llegar al Valle.

En el oriente (Texcoco y Sierra Nevada) se considera factible captar agua superficial de buena calidad para inyectarse al subsuelo. En las estribaciones de la Sierra Nevada se ha identificado menor densidad de asentamientos humanos, por lo que se recomienda la recarga con escurrimientos superficiales en época de lluvia.

Finalmente, se destacó la escasa sistematización de información (respecto a ubicación, funcionamiento y caudal) referente a los pozos de ab-

sorción distribuidos en prácticamente la totalidad de la Ciudad de México y que tienen como principal objetivo la mitigación de inundaciones.

Respecto al agua residual tratada, existen alrededor de 150 plantas de tratamiento cuya localización se extiende en todo el Valle de México. Considerando el funcionamiento conjunto de todas ellas, se trata un caudal aproximado de 5 m<sup>3</sup>/s, parte del cual se reusa en distintos cuerpos receptores, tales como ríos, arroyos, lagos y al riego de áreas verdes.

Se estima que al menos 50 plantas se encuentran ubicadas en sitios donde se podría realizar la recarga al acuífero a través de pozos. Las restantes se localizan cerca de pozos de abastecimiento de agua potable, razón principal por las que no se consideran.

Una parte del agua tratada por estas plantas, o bien la proveniente de futuras ampliaciones o de incrementos en la eficiencia de su operación, es la que podría destinarse a su infiltración en el subsuelo. Los expertos recomendaron la adaptación y acondicionamiento de pozos cegados y la utilización de infraestructura existente.

En cuanto a la calidad del agua, los principales controles periódicos son exigidos por las Normas Oficiales Mexicanas NOM – 014 – CNA – 2007



y la NOM – 015 – CNA – 2007. En el caso de la primera, se diferencian de acuerdo al tipo de dispositivo de recarga utilizado: superficial, subsuperficial y directo, en el cual el límite de contaminantes está condicionado por el cumplimiento de la NOM – 127 – SSA1 – 1994. Respecto a los contaminantes no regulados por norma, tales como DBO, se establece un límite máximo de 30 mg/l y COT igual o menor a 16 mg/l para el tipo superficial, mientras que para la inyección directa no se permite que supere 1 mg/l.

### **Factibilidad hidrogeológica y caracterización**

La recarga artificial se puede practicar en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua.

Aunado a las condiciones previamente mencionadas, la efectividad de la recarga artificial está condicionada por las características hidrogeológicas, hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor, así como a su régimen de explotación. En sentido estricto, el agua recargada debe permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior.

En términos generales, la mayor parte de las actuaciones de recarga artificial se realizan en acuíferos libres con el nivel freático a profundidad

media o próxima, en materiales granulares o consolidados fracturados. Sin embargo, en acuíferos confinados o localizados a mayor profundidad, como es el caso del Valle de México, también puede realizarse a través de caudales de admisión menores.

Para lograr el éxito de las actuaciones en campo de la recarga artificial es necesario disponer de información detallada relativa a los siguientes puntos:

- Geometría, litología y aspectos geológicos de los materiales presentes en el acuífero.
- Piezometría, velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo.
- Hidroquímica y calidad del agua.
- Parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad, porosidad, coeficiente de almacenamiento y capacidad de infiltración).
- Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero.
- Zonas de descarga natural.
- Relaciones río – acuífero.
- Usos, demanda y consumos de agua.
- Balances hídricos.

El acuífero del Valle de México, se encuentra en su gran mayoría carac-

terizado y con los elementos anteriormente mencionados identificados y cuantificados.

Es importante mencionar que el planteamiento de procesos de recarga llevan a su vez el requerimiento del contexto específico del área a evaluar, por lo que se recomienda establecer estudios de cuantificación, exploración geofísica de detalle, construir pozos y piezómetros para validar información y obtener parámetros hidrodinámicos que permitan desarrollar modelos conceptuales y matemáticos que logren establecer una pre-evaluación del contexto delimitado por las condiciones anteriores.

### **Operación y monitoreo**

El éxito de los sistemas de recarga artificial depende en gran medida de otro aspecto importante: la correcta ejecución y aplicación de operaciones de control y seguimiento, que permitan, por un lado, cuantificar los efectos que se producen en la cantidad y calidad de las aguas del acuífero y, por otro, una toma de decisión rápida y adecuada para lograr una correcta gestión de la operación, así como de permitir la posterior recuperación del agua infiltrada.

De acuerdo con los expertos, los parámetros que deben controlarse con mayor rigurosidad son el nivel piezométrico y la hidroquímica del

agua subterránea, así como el caudal y la calidad del agua de recarga. Se mencionó que la medida de estos parámetros puede realizarse de manera continua o discontinua. Si se opera de manera discontinua se tendrá que implementar una campaña de medición y tomas de muestras lo suficientemente amplia en espacio y tiempo para poder disponer de una serie de datos que permitan analizar el comportamiento de la recarga con un alto grado de confianza.

El control continuo, por su parte, proporciona información más amplia y detallada, que permite conocer reacciones puntuales de corta duración que no pueden ser detectados mediante un control discontinuo. De manera general, todo proyecto de recarga artificial debe registrar los siguientes aspectos básicos:

- Calidad del agua de recarga (antes y durante la operación).
- Calidad del agua de la mezcla del agua de recarga y nativa.
- Variación de niveles piezométricos.

Lo anterior, logrado a través de las siguientes acciones elementales:

- Construcción de red de monitoreo.
- Gastos (flujos de agua) de infiltración vs tiempo (volumen total).

- Impactos en fuentes de abastecimiento de agua potable.

### **Marco legal**

#### **NOM – 014 – CONAGUA – 2003 y**

#### **NOM – 015 – CONAGUA – 2007**

México es uno de los pocos países que cuentan con normatividad vigente para el desarrollo y aplicación de proyectos de recarga artificial de acuíferos. En este sentido, las normas NOM – 014 – CONAGUA – 2007 y NOM – 015 – CONAGUA – 2007 han sido decretadas para comunicar los propósitos de contribución para la recuperación de acuíferos y protección de calidad de agua subterránea.

El objetivo de la norma NOM – 014 – CONAGUA – 2007, “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”, es establecer las obligaciones y exigencias que deben cumplir la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Es aplicable a obras nuevas y existentes, cuya función sea almacenar e incrementar el volumen de agua en los acuíferos, para su posterior recuperación y reúso.

En específico, la NOM – 015 – CONAGUA – 2007, “Infiltración artificial de agua a los acuíferos – características y especificaciones de las obras y del agua”, promueve obras para el desalojo de aguas pluviales y de escu-

rrimientos superficiales mediante la adecuada disposición del subsuelo, con el fin de evitar inundaciones y afectaciones a la red sanitaria local, daños a la población o a bienes materiales.

Ambas normas consideran al subsuelo como una planta de tratamiento natural que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de pretratamiento, compatible con los métodos de recarga.

Respecto a éstas, los miembros del taller discutieron en torno a algunos posibles cambios de su estructura y requerimientos, con el fin de incentivar la recarga artificial sin poner en riesgo al acuífero.

### **Cambios sugeridos en la normatividad y gestión**

El conjunto de aspectos legislativos y de gestión a considerar en la planeación e implementación de los proyectos MAR que los expertos destacan, son aquellos relacionados con los derechos del agua, la tenencia de la tierra, qué actores pagan y quiénes se benefician de la recarga, así como quién la gestiona. Se subrayó la necesidad de una coordinación entre todos los actores que incluyan al gobierno federal, local, organismos operadores, comités y consejos con el fin de lograr una gestión integrada del recurso.

Se dialogó acerca del uso del agua destinada a operaciones de recarga artificial, que deberá someterse a las disposiciones contenidas en la ley. Respecto a lo anterior, se destacaron dos supuestos:

- a) Si la recarga artificial es realizada por la iniciativa privada, involucra un uso privativo de las aguas, y por tanto, la disposición de los caudales necesarios deberá estar sometida al régimen de concesión administrativa.
- b) De manera contraria, si la recarga artificial es llevada a cabo dentro de las actividades de investigación de la administración pública, o dentro de los objetivos establecidos por la planificación hidrológica, será necesario sólo una autorización especial extendida a favor de la administración pública que se trate.

En torno a éstas, los expertos profundizaron en la necesidad de una flexibilización que permita adecuar la legislación existente, a través de algunas sugerencias:

- Cancelar aprovechamientos cuya situación administrativa sea irregular.
- Reglamentar y regular el uso de aprovechamientos.
- Considerar la interacción de aguas superficiales y subterráneas.

- No exigir una calidad superior del agua de recarga a la nativa del acuífero.
- Elaboración de manuales de operación a través de NMX, y términos de referencia.
- Introducir incentivos fiscales mediante la Ley Federal de Derechos.

### **Criterios socio – económicos**

Entre las objeciones que recibe la aplicación de las técnicas de recarga artificial de acuíferos, destacan las relacionadas con los altos costos asociados. Este factor, como mencionaron los expertos, es relativo y debatible, puesto que la decisión de efectuar estos proyectos no solo depende de un análisis estrictamente económico, sino también de consideraciones legales y ambientales.

En el caso del acuífero del Valle de México, la mayor parte de la recarga artificial propuesta se lograría a través de pozos de inyección con agua residual tratada, uno de los métodos de recarga en donde el costo es superior debido a los conceptos correspondientes por procesos adicionales de tratamiento y depuración.

Se recomendó que la evaluación económica de cualquier proyecto u obra de recarga artificial se realice en distintos estados del proceso: el agua infiltrada y puesta en almacenamiento, y el agua recuperada o

puesta nuevamente a disposición. Para lograr un cálculo de estos dos conceptos deberá tomarse en cuenta los siguientes costos:

- De investigación hidrogeológica.
- De adquisición de terreno.
- De instalaciones de pretratamiento.
- De instalaciones auxiliares.
- De instalaciones de recarga.
- De instalaciones de control y seguimiento.
- De explotación y conservación.

La explotación de las aguas superficiales requiere de grandes inversiones respecto a sus costos de operación, que suelen ser menores. En contraparte, las aguas subterráneas requieren de inversiones pequeñas con costos de operación más elevados. La recarga artificial de acuíferos presenta elementos comunes a ambas técnicas, por lo que sus factores económicos estarán relacionados a proyectos tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas. La incidencia que pueda tener la utilización de un dispositivo en específico dentro de un estudio de recarga artificial dependerá de los condicionantes presentes en cada caso en concreto.

La viabilidad económica de un proyecto de recarga artificial dependerá del precio que los usuarios estén dispuestos a pagar por una determinada cantidad de agua. Una vez confirmada dicha viabilidad, es necesario distribuir los costos de creación y operación de infraestructura entre los distintos usuarios implicados en el proyecto. Evidentemente, los costos a aplicar, salvo que contemplen beneficios de tipo social, no deberán ser uniformes, sino proporcionales al uso que haga cada uno del agua subterránea, así como la localización de cada captación en relación al efecto beneficioso que sobre el acuífero produce la infiltración artificial.

Concretar algunos de estos aspectos puede resultar complejo para usuarios que operen a nivel individual.

### **Incentivos económicos para promover la recarga**

Se realizaron algunas recomendaciones específicas para incentivar la implementación de la recarga artificial. Dentro de las principales destacan:

- Cambiar sistema de derechos, estableciendo una categoría de emergencia por sobreexplotación en la que se cancele la tarifa eléctrica número nueve y se cobre derecho de extracción para el riego en agricultura en misma cantidad que en el uso urbano.

- Establecer que un porcentaje de la recaudación por uso, aprovechamiento o explotación se destine al estudio, manejo y recarga del acuífero.
- Otorgar el derecho al recaudador de aumentar la concesión en proporción a los volúmenes infiltrados.
- Amortizar la inversión en obras de recarga contra el pago de derechos por extracción.

## METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS POTENCIALES DE RECARGA ARTIFICIAL

### Evaluación de sitios

Anteriormente se expusieron los principales criterios que la experiencia nacional considera esenciales para iniciar un proyecto de recarga artificial. Dentro de los objetivos planteados por los expertos para el caso del Valle de México destacan a la recarga artificial como una alternativa para atender la demanda de agua. A este respecto, deben contemplarse algunos aspectos antes de determinar la ubicación y dispositivos específicos para la infiltración:

- Realizar un análisis de demandas y usos actuales y futuros.
- Realizar un análisis de los elemen-

tos de regulación actual y futura, tanto de índole superficial como subterránea.

- Evaluar hipótesis de gestión enfocadas al aumento de regulación.
- Aplicación de criterios y técnicas conjunta o gestión coordinada.

La evaluación de la viabilidad de la selección de los sitios potenciales y la operación de la recarga artificial puede realizarse mediante el análisis y estudio de factores como: fuente de la agua de recarga, características del acuífero receptor, análisis de diferentes alternativas de recarga, así como de estructuras auxiliares de control,

tratamiento y transporte, agua recargada y destino final, evaluación económica y aspectos legislativos.

La duración de los proyectos de recarga artificial, desde que inician los primeros estudios hidrogeológicos hasta que termina la construcción de la instalación, puede estimarse entre 2 y 5 años. El grado de conocimiento hidrogeológico que se posee sobre una determinada zona, así como la decisión de no realizar algunas de las etapas características, provoca una reducción del tiempo estimado.

Un cronograma estandar de las actividades de evaluación y ejecución comprende las siguientes duraciones: a) fase de estudios hidrogeológicos previos (0 – 12 meses), b) modelación matemática (6 meses), c) fase de construcción de prueba piloto (3 – 12 meses), d) fase de seguimiento de la experiencia piloto (6 – 12 meses), e) nuevos estudios hidrogeológicos de detalle (0 – 6 meses) y f) diseño y construcción de la instalación (6 – 12 meses).

### **Sitios potenciales y dispositivos**

En el Valle de México se encuentran zonas en las que las rocas pueden agruparse de acuerdo a su capacidad de infiltración, la circulación y el almacenamiento del agua en el subsuelo. Se identifican formaciones y zonas que muestran condiciones favorables respecto a los términos

anteriormente mencionados:

- Sierra de Chichinautzin: se encuentra ubicada al sur de la Zona Metropolitana, así como la Sierra de Santa Catarina. Presenta una alta permeabilidad que permite la infiltración de agua, tanto a través de estanques como de pozos (recarga superficial y subsuperficial). En algunas baterías existentes se logró recargar alrededor de 60 lps por pozo. A través de estanques, como el que fue ubicado en la Sierra de Santa Catarina, se logró infiltrar gastos de hasta 1000 lps.
- Formación Tarango: se encuentra en el afloramiento al pie de la Sierra de las Cruces, y está constituida por materiales granulares que presentan una permeabilidad media. Se concluyó que en estos materiales es factible recargar agua al subsuelo a razón aproximada de 30 lps. Los dispositivos recomendados a implementar son aquellos que recargan de manera superficial y subsuperficial.
- Sierra Nevada: ubicada en el oriente, en ella se identifican intercalaciones de materiales granulares y volcánicos, que en conjunto, permiten una infiltración con caudales variables que se estiman en 20 lps por pozo. El tipo de dispositivo recomendado es equivalente a los dos mencionados anteriormente.

- Valle de Texcoco (planicie lacustre): presenta materiales granulares con una permeabilidad media a baja, la cual permitía un orden de recarga menor con una infiltración aproximada de 10 lps con pozos de inyección.
- Zona aluvial de transición: se encuentra constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados. Se recomienda la implementación de métodos de recarga superficial y subsuperficial.
- Proponer protocolos que permitan aumentar la confiabilidad en la medición de los niveles y la calidad del agua del acuífero.
- Mejorar y ampliar la red de bancos de nivel, red de estaciones piezométricas y de calidad del agua subterránea, definiendo la densidad y la frecuencia del monitoreo.
- Proponer instrumentación específica en función de la profundidad y horizontes de interés.

### **Problemas frecuentes de operación y limitaciones**

En este sentido, los asistentes consideran que más allá de la probable existencia de alguna problemática específica asociada a la recarga de acuerdo a la zona, lo importante es definir el tipo de dispositivo.

### **Operación y monitoreo**

Contextualizando en el caso de estudio, los expertos plantearon una serie de recomendaciones para la red de monitoreo existente, la información disponible y su adecuación para la medición del impacto que puede ofrecer la recarga a los niveles del acuífero, algunas de ellas son:

- Aprovechar y sistematizar la información e infraestructura existente.
- Reglamentar y coordinar la información en base de datos de uso público.

El mayor problema con el que se enfrenta la recarga artificial es la colmatación, que consiste en la acumulación de materiales sobre la superficie de infiltración del agua. Su principal efecto es la reducción de la capacidad de recarga. Las principales causas de su presencia son los efectos mecánicos del dispositivo, la actividad biológica y los procesos químicos del agua de recarga en la interacción con el medio receptor.

La afectación sobre la tasa de infiltración es tan importante que incluso en casos donde se opera con una baja concentración de sólidos en suspensión es necesario programar sistemas de limpieza y dragado de las instalaciones. Los participantes mencionaron que al cabo de un cierto tiempo y volumen de agua recargado, es posible que se tengan



que abandonar los dispositivos al no poder regenerar su capacidad de infiltración con los caudales originales operativos. Este proceso de degeneración de capacidad, frecuentemente se traduce en la necesidad de estimar la vida útil de las instalaciones y realizar estudios económicos pertinentes para poder cuantificar su rentabilidad.

Datos arrojados por el inventario de experiencias que forma parte del diagnóstico de la situación de la recarga artificial en el Valle de México, precisan que la vida útil aproximada para esos dispositivos fue ligeramente superior a los 5 años en los pozos de inyección y 10 en las balsas de infiltración.

Por otro lado, el grupo de expertos identificó algunas razones más por las cuáles los dispositivos existentes dejaron de operar, o bien, las razones por las que la mayoría de los proyectos no se han llevado a cabo: diseño o dimensionamiento erróneo de estructuras; incorrecto manejo de la implementación, operación, mantenimiento y monitoreo; altos costos

asociados a los programas de control y seguimiento del funcionamiento de la estructura, así como de la calidad del agua infiltrada y la mezclada con el agua nativa; y escasa o nula sistematización de la información disponible y generada por la operación del proyecto MAR. Asimismo, destacaron que la falta de estudios básicos, transferencia de tecnología y conocimiento, representa otro aspecto importante que contribuye a la baja de implementación de los dispositivos de recarga.

Otros factores que difieren del aspecto técnico son aquellos relacionados con la ausencia de incentivos económicos que promuevan la ejecución de proyectos MAR, así como la nula contemplación que impone la normatividad vigente respecto a la recuperación total o parcial de los volúmenes infiltrados. Se recalcó el apremio por implementar una coordinación de todas las instancias e instituciones involucradas, así como la urgencia de desarrollar programas de planeación que favorezcan la ejecución de los proyectos de recarga artificial.

## RECOMENDACIONES PARA EL PLAN DE GESTIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO

Actualmente el Instituto de Ingeniería de la UNAM lleva a cabo los estudios de la Segunda Etapa del Modelo Numérico del Acuífero del Valle de México y su Plan de Gestión Integral. Dentro de los objetivos planteados, se encuentra la definición de los componentes de dicho plan para lograr su sustentabilidad mediante la reducción de la extracción del agua y el aumento de su almacenamiento.

El uso sustentable del acuífero implica la presencia de un balance que presente un ligero exceso que pueda permitir la explotación de grandes cantidades de agua en años secos y reservar los excedentes en años húmedos. El patrón de explotación de la cuenca no se ha realizado bajo el esquema mencionado. Los sistemas tradicionales de regulación, incluyendo la natural, solo son capaces de garantizar hasta un punto la demanda, por lo que se considera importante atender: las prioridades de uso, el potencial de medidas para la reducción e intercambio de agua en la agricultura, el reúso con agua renovada, ya sea de manera directa (abastecimiento) o indirecta (recarga), la cultura del agua y el complemento proveniente de fuentes externas.

El aumento de almacenamiento a través de la recarga artificial ha sido poco explorado e implementado en el Valle de México. La recarga superficial es aplicable, aunque menos recomendada frente a otros métodos debido a la alta urbanización. Sin embargo, como se expuso anteriormente, zonas correspondientes a formaciones permeables y donde el acuífero es libre, representan sitios potenciales para su implementación. Por su parte, la técnica más idónea a las condiciones que presenta el Valle de México es a través de pozos de inyección. Existen proyectos a nivel piloto que efectuaron diversas experimentaciones para cuantificar su impacto en el nivel y calidad del agua del acuífero.

Finalmente, se encomendó al conjunto de expertos numerar los elementos más importantes que debe incluir un plan de gestión destinado a lograr la sustentabilidad del acuífero. Se planteó que el marco sostenible deberá mantener una visión a largo plazo, orientado principalmente al manejo integral de los recursos que satisfagan las necesidades actuales sin comprometer su capacidad futura. Algunos de los componentes identificados, son:

- Modelo de gobierno y políticas:
  - Revisar la estructura organizacional que permita la interacción de la totalidad de los sectores involucrados (gobierno estatal y local, academia, iniciativa privada, etc.).
  - Contar con políticas que establezcan los límites de actuación de los diferentes participantes, por lo que se hace necesario plantear, proponer y actualizar políticas orientadas a la gobernabilidad del manejo del recurso, la responsabilidad de los participantes, el uso y manejo del agua.
- Marco legal:
  - Revisar, comparar resultados, validar o modificar las normas que se aplican en los procesos de recarga artificial.
  - Estímulos fiscales que promuevan la implementación de la recarga artificial.
- Cultura del cambio:
  - Concientizar e informar a la población sobre los beneficios y problemáticas que se pueden presentar, con el fin de evitar conflictos sociales.
- Investigación y generación de capacidades:
  - Clasificar y resguardar el conocimiento.
  - Desarrollar plataformas de intercambio de información.
  - Generar medios para consulta y transferencia de conocimiento.
  - Medir impacto del proyecto.
  - Elaborar manuales de procedimientos.

## CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del taller, se destacaron dos panoramas respecto a la situación de la recarga artificial en el Valle de México: la situación actual y futura para que su implementación sea una práctica efectiva que coadyuve a mitigar los efectos de la sobreexplotación del acuífero, ajustando criterios y metodologías para lograr que sea aplicable.

Partiendo del reconocimiento de los principales problemas que enfrenta el Valle de México en materia hídrica, en el Taller Recarga Artificial del Acuífero del Valle de México se realizaron análisis puntuales y sugerencias específicas que pueden ser implementadas por distintos actores, tanto miembros de la sociedad civil y academia, como tomadores de decisiones; en todas ellas, no obstante, se reconoció la necesidad de considerar un marco normativo integral de gestión del acuífero como el mejor medio para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible, logrando el equilibrio entre la extracción y la recarga, logrando un incremento en el almacenamiento y disponibilidad para garantizar el abastecimiento.

Se discutió algunos de los obstáculos identificados en extintos proyectos de recarga, relativos a los costos de su operación y mantenimiento, la existencia de una normatividad poco flexible y la ausencia de incentivos económicos que promuevan su implementación.

La Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Red del Agua UNAM, agradece a todos aquellos que hicieron posible la realización de este evento, así como a los asistentes al taller que enriquecieron las labores llevadas a cabo.

## ANEXO 1. DIAGNÓSTICO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DE MÉXICO

### Inventario de experiencias

Los primeros registros de la aplicación de la recarga artificial al agua subterránea del Valle de México datan del año 1943, destacando los métodos para reducir las inundaciones. Los primeros proyectos abarcaban la retención del desbordamiento y la ampliación de la superficie, la modificación de canales y los pozos de infiltración, los cuales fueron realizados principalmente en el basalto altamente permeable de las zonas altas del sur de la Ciudad de México, y cuya puesta en marcha logró tasas de infiltración considerables en periodos de lluvias torrenciales.

De manera general, destacan tres periodos característicos de la recarga artificial en el Valle de México: el primero comprendido entre los años 1940 a 1980, en el cual sobresalía la utilización de vasos de almacenamiento y pozos de absorción, que tenían como principal fuente de alimentación el agua proveniente de la lluvia, los escurrimientos y los embalses. Posteriormente, para la etapa situada entre los años 1980 y 2000, se agregó a las vasos de almacenamiento la implementación de pozos de inyección y lagunas o embalses, que infiltraban principalmente agua

residual tratada. Finalmente, en los últimos veinte años, aunados a los dispositivos anteriormente mencionados, se plantea la propuesta de la utilización de humedales.

El contexto de la recarga artificial dentro del Valle de México está enmarcado no solo por su condición espacio – temporal, sino por la situación en la que se encuentran cada uno de los proyectos identificados en el presente inventario: dispositivos instalados (operando y no operando) y en gestión o proyecto. A continuación se presenta un resumen de los proyectos más representativos, diferenciándolos por su situación de operación e identificando su ubicación, objetivos, la fuente de agua de recarga utilizada, el tipo de mecanismo y su caudal de operación.

#### **Etapa I: 1940 – 1980**

- Dispositivos instalados (no operando)

La Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México realizó los primeros intentos de implementación de mecanismos para la infiltración, los cuales se ubicaron principalmente al sur de la ciudad y no estaban estrictamente diseñados para

recarga, ya que promovían la infiltración natural a través de obras de anegamiento. Entre los principales proyectos destacaron la desviación del río Magdalena hacia los basaltos de San Ángel, logrando infiltrar 73.5 Mm<sup>3</sup> en un periodo de funcionamiento que va de 1944 a 1970. El 22 de agosto de 1944 se presentó un registró máximo de infiltración de 33 m<sup>3</sup>/s. Posteriormente, destaca la puesta en marcha de los primeros pozos de absorción, ubicados en el Jardín de San Fernando, y tanto en instalaciones oficiales (Paseo de la reforma y Parque Hundido) como zonas industriales (Vallejo), cuyos caudales rondaban los 6 lps. Las perforaciones fueron realizadas por la Comisión y particulares (industriales en mayor parte, condicionados de esta manera para la aprobación de su solicitud de perforación de pozos de extracción).

Enmarcando el final de esta etapa, destaca la infiltración en las Barrancas Mixcoac, de 1956 a 1975, aguas debajo de la presa del mismo nombre. El dispositivo consistió en tres pozos de absorción que infiltraban el agua proveniente del embalse. Su gasto de infiltración alcanzó los 300 lps por pozo, y contó con un sistema de monitoreo que registró la influencia de la infiltración en las estribaciones de la sierra y la planicie del Valle, notando recuperación de los niveles de los

pozos de abastecimiento ubicados en colonias como Alfonso XIII y Olivar del Conde, así como en estaciones piezométricas ubicadas en el Parque Hundido. En 1969 los volúmenes de agua infiltrados por los pozos se estimaban en 34.7 Mm<sup>3</sup>, que equivale prácticamente a todo el escurrimiento del río Mixcoac. Su clausura se debió a la contaminación del almacenamiento de la presa, originada por la descarga de aguas residuales.

- Anteproyectos

En 1964, la Secretaría de Recursos Hidráulicos propone distintas alternativas para la infiltración del agua excedente proveniente de lluvia y escurrimientos, a través de vasos de almacenamiento escalonados, zanjas, surcos y canales, y pozos de absorción. Los anteproyectos propuestos destacaron por ubicarse en las zonas oriente y poniente de la ciudad, e incluir el norte del Valle de México. Algunas de las recomendaciones sugerían utilizar los socavones provenientes de antiguas minas de arena, existentes en los alrededores de los ríos, aprovechándose también para la filtración de agua, en Cuautitlán, Teotihuacán, Texcoco, Chalco, Pachuca, Apan y Tecocomulco.

## Etapa II: 1980 – 2000

- Dispositivos instalados (no operando)

La segunda fase característica de la recarga artificial en el Valle de México se encuentra caracterizada por implementar pozos de inyección y las lagunas o embalses. El primer caso destacado es ubicado en el Lago de Texcoco, en el cual se instalaron 3 pozos de inyección a 200 metros de profundidad, en los que se aplicaron trazadores con la finalidad de obtener la velocidad y la dirección del flujo en la zona. Dos años después, se readapta el pozo San Luis Tlaxialtemalco para inyectar agua residual tratada a razón de 100 lps. Fue el primero en implementar paralelamente un módulo experimental de columnas para estudiar la colmatación, así como las variaciones piezométricas y de calidad del agua en diferentes granulometrías.

Destacan también el caso de la PTAR Cerro de la Estrella, en la cual se instaló una batería de nueve pozos que inyectaban un caudal total aproximado de 410 lps. Así también, se establece por primera vez la infiltración de agua residual tratada a través de una laguna de infiltración que permitía la circulación de 1000 lps. En 1997 se realizan diversos intentos de modelación del movimiento del agua y contaminantes.

También destaca el caso del pozo SC – 6 (ubicado en el suroeste de la Sierra de Santa Catarina). Su acondicionamiento incluyó la instalación

de filtros de arena, carbón activado y clorador. Paralelamente a su operación, se realizaron recomendaciones sobre su manejo y los métodos de limpieza disponibles para evitar el taponamiento.

A diferencia de la etapa anterior, esta fase se caracteriza por tomar en cuenta aspectos adicionales a la disponibilidad del agua, tales como las características del subsuelo, la infraestructura existente y la calidad de la fuente del agua de recarga.

- Anteproyectos

Como parte del programa de pozos piloto de recarga artificial a nivel experimental en el Valle de México, se propuso la infiltración de agua residual tratada a través de pozos de inyección en diez plantas de tratamiento (PTAR Ciudad Deportiva, PTAR Acueducto de Guadalupe, PTAR Bosques de las Lomas, PTAR Campo Militar, PTAR San Juan Ixtayopan, PTAR Abasolo, PTAR H. Colegio Militar, PTAR Parres, PTAR San Miguel Xicalco y PTAR Santa Fe) en el año 1995. La alternativa en conjunto, incluye la recarga de 1057 lps a través de 7 pozos, 12 de los cuales ya se encontraban perforados. Las propuestas de estos dispositivos incluían recomendaciones acerca de su ubicación respecto a pozos de abastecimiento, operación contra el taponamiento y monitoreo de nive-

les y calidad del agua.

### **Etapas III: 2000 – actual**

- Dispositivos instalados (no operando)

En el 2012, la Comisión Nacional del Agua inicia en el suelo de conservación de la ZMVM, el proyecto de pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva) referente al proyecto piloto de recarga artificial El Caracol. Entre sus objetivos destacaban el análisis de las diferentes alternativas para llevar a cabo la recarga, desarrollar un proyecto piloto, recargar el acuífero Cuautitlán Pachuca mediante pozos de inyección, y determinar los parámetros de recarga a mediano y largo plazo con la interacción con el acuífero en forma continua.

Se contó con dos pozos de recarga a 250 y 300 metros, y con 4 pozos de monitoreo. Se propuso que el diseño final de los pozos de recarga se modificara en función del resultado de pruebas de campo y condiciones geoeléctricas, debajo de los 200 m. Se concluyó que la infiltración podía realizarse bajo diferentes condiciones de presión y gasto, evaluando su comportamiento con prueba instantánea y, posteriormente, mediante recarga continua, con la finalidad de calibrar el modelo de flujo e hidrogeoquímico para definir un protocolo de recarga.

Se plantearon dos alternativas: la primera era bajo el esquema de extracción – recarga utilizando los mismos pozos existentes, otra fue mediante la recarga a mediano y largo plazo con una planta de tratamiento que permitiera obtener agua con la calidad y características necesarias para el correcto funcionamiento.

Respecto a las zonas potenciales para llevar a cabo la recarga, se identificaron cuatro sitios viables: el cerro de Chiconautla, la zona agrícola Los Héroes Tecámac, El Caracol y la Sierra de Guadalupe.

- Anteproyectos

Dentro del Programa de Sustentabilidad y Gestión de Servicios Hídricos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, destaca la propuesta de recarga artificial para la segunda sección del Bosque de Chapultepec. Dentro de las actividades previas de caracterización hidrogeológica se realizó exploración geofísica mediante tomografías y técnicas sísmicas que permitieron elaborar el marco conceptual hidrogeológico.

En la parte que va de los 80 a 110 metros de profundidad se identificaron horizontes que corresponden a zonas permeables y que funcionan como una región potencial para realizar la recarga controlada.

Por su parte, en el 2012, el Sistema



de Aguas de la Ciudad de México emprendió un estudio de gran visión de recarga artificial de acuíferos a partir de agua de lluvia y residual potabilizada. Dentro de su propuesta de recarga artificial superficial se identifican la implementación de lagunas de regulación y humedales artificiales en el corredor eco – turístico Xochimilco-Tláhuac, y la utilización de represas en el Ajusco medio, combinadas con pozos de absorción. El proyecto de infiltración contempla seis fuentes potenciales de agua de recarga, proveniente de las plantas Cerro de la Estrella, San Lorenzo, San Luis Tlaxialtemalco, La Lupita, El Llano y Mixquic, con un gasto potencial de infiltración de 3545 lps.

Dentro de la recarga subsuperficial, el SACM presenta la propuesta de un sistema de inducción de agua pluvial con pozos de absorción. De acuerdo con los análisis geológicos, las zonas aptas para la recarga a través de estos dispositivos son la sur y algunas zonas urbanizadas y sin servicios de drenaje, con la finalidad de encausar el agua de lluvia hacia los pozos. Se identificaron 600 sitios propicios, de los cuales 135 están estudiados. Se cuenta con 71 pozos operando y 135 en proyecto. Una propuesta adicional, consiste en la construcción de presas de gaviones en las partes altas de la delegación Tlalpan, Cuajimalpa, Milpa Alta, Xochimilco, Mag-

dalena Contreras y Álvaro Obregón.

Finalmente, existe un proyecto de planta piloto de 20 lps en el Cerro de la Estrella para inyectar el agua tratada a través de pozos de inyección. El tratamiento que se le brinda al agua involucra procesos de osmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta, la cual pretende incrementar el gasto tratado a 1000 lps que pueda alimentar 16 pozos de inyección.

De manera general, la situación que guardan la mayoría de los planes de recarga artificial en el Valle de México se encuentran en calidad de anteproyecto. Del total de proyectos identificados, 59% se encuentran en gestión o estudio, 35% se encuentran instalados pero fuera de operación, y sólo el 6% restante opera (correspondiente a los pozos de absorción existentes en la zona metropolitana). Algunas de los obstáculos identificados para la continuidad en su operación fueron: las inundaciones provocadas en zonas colindantes, nuevas obras viales y reurbanización, contaminación del almacenamiento de presas por descargas residuales, tamaño insuficiente para el área drenada, entre otras.



MEMORIAS DEL TALLER  
**RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO**  
8 de junio de 2017

[www.agua.unam.mx](http://www.agua.unam.mx)