



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Anteproyecto de Recarga Artificial
del Acuífero en la Zona Federal del
Ex Lago de Texcoco**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Ricardo López Martínez

DIRECTOR(A) DE TESIS

M. I. Adriana Palma Nava



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/031/18

Señor
LUIS RICARDO LÓPEZ MARTÍNEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. ADRIANA PALMA NAVA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ANTEPROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO EN LA ZONA FEDERAL DEL EX
LAGO DE TEXCOCO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. GESTIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS
 - II. NORMATIVIDAD
 - III. MARCO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO TEXCOCO
 - IV. PROPUESTA DE MÉTODO DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS
 - V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 15 de marzo del 2018.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

A mis padres; Vicente y Teresa por su amor, esfuerzo y sacrificio para brindarme una formación profesional.

A mis hermanos; Adán y Andrés por su cariño, consejo y apoyo incondicional en todo momento.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. OBJETIVO GENERAL	3
I.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
I.3. ALCANCE	3
CAPÍTULO II. GESTIÓN DE LA RECARGA	4
ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS	4
II.1. OBJETIVOS DE LA GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL	5
II.2. MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL	5
II.2.1. Métodos de dispersión	8
II.2.2. Infiltración inducida.....	9
II.2.3. Pozos, túneles y perforaciones.....	10
II.2.4. Modificación al canal.....	11
II.2.5. Captación de agua de lluvia.....	12
II.3. FUENTES Y CALIDAD DE AGUA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL	12
II.4. COLMATACIÓN O TAPONAMIENTO	13
II.5. EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL MUNDO	17
II.5.1. Orange County, California E.U.A.	18
II.6. EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL EN MÉXICO.....	20
II.7. EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DE MÉXICO	23
II.7.1. Antecedentes	23
II.7.2. Época actual	26
II.8. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS A PARTIR DE AGUA DE LLUVIA Y RESIDUAL POTABILIZADA. ESTUDIO DE GRAN VISIÓN.....	31
II.9. PRUEBAS DE RECARGA INSTANTÁNEA Y A CORTO PLAZO (ACTIVA Y PASIVA), PROYECTO PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL EL CARACOL.....	31
CAPÍTULO III. NORMATIVIDAD	33
III.1. LEY AGUAS NACIONALES (LAN)	34
III.2. NOM-014-CONAGUA-2007 REQUISITOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUA RESIDUAL TRATADA.	35
III.3. NOM-015-CONAGUA-2007 INFILTRACIÓN ARTIFICIAL DE AGUA A LOS ACUÍFEROS.- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS OBRAS Y DEL AGUA.....	38
III.4. NOM-003-CONAGUA-1996 REQUISITOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN.....	40
III.5. MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.....	43
CAPÍTULO IV. MARCO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO TEXCOCO	48
IV.1. DESCRIPCIÓN REGIONAL.....	48
IV.2. DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO TEXCOCO	52
IV.2.1. Localización del acuífero	52
IV.2.2. Geología	53

IV.2.3. <i>Hidrogeología</i>	56
IV.2.4. <i>Piezometría y Comportamiento hidráulico</i>	58
IV.3. CENSO DE APROVECHAMIENTOS	61
IV.4. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	62
IV.4.1. <i>Cambio de almacenamiento</i>	63
IV.4.2. <i>Salidas</i>	64
IV.4.3. <i>Entradas</i>	65
IV.4.4. <i>Sobreexplotación</i>	67
IV.5. DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	67
IV.5.1. <i>Recarga total media anual</i>	68
IV.5.2. <i>Descarga Natural Comprometida</i>	68
IV.5.3. <i>Volumen concesionado de agua subterránea</i>	68
IV.5.4. <i>Disponibilidad media anual de agua subterránea</i>	68
CAPÍTULO V. PROPUESTA DE MÉTODO DE RECARGA DE	
ACUÍFEROS.....	70
V.1. SELECCIÓN DEL SITIO DE APLICACIÓN MAR.....	70
V.1.1. <i>Ubicación</i>	71
V.1.2. <i>Litoestratigrafía</i>	72
V.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECARGA ARTIFICIAL.....	79
V.3. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE RECARGA ARTIFICIAL	80
V.3.1. <i>Ademe</i>	81
V.3.2. <i>Contraademe</i>	82
V.3.3. <i>Filtro Granular</i>	83
V.3.4. <i>Rejilla o cedazo</i>	83
V.3.5. <i>Brocal</i>	83
V.3.6. <i>Plantilla</i>	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodologías utilizadas para la gestión de los recursos hídricos dentro de una cuenca. Fuente: (Dillon & Gale, 2005).	6
Figura 2. Esquema de colmatación mecánica. Fuente: (Russell, 2013)	14
Figura 3. Esquema de colmatación biológica. Fuente: (Russell, 2013)	15
Figura 4. Esquema de colmatación química. Fuente: (Russell, 2013).	15
Figura 5. Esquema de colmatación física. Fuente: (Russell, 2013).	16
Figura 6. Corte de un pozo de inyección de la barrera de Huntington Beach. Fuente: (OCWD, 2015).	19
Figura 7. Esquema de la ubicación de los pozos de infiltración en la presa Mixcoac. Fuente: (IMTA, 2017).	24
Figura 8. Ubicación de las lagunas y PTAR del Proyecto Hidráulico del Lago de Texcoco. Fuente: CONAGUA, 2014.	29
Figura 9. Diagrama de flujo de los requisitos para la recargar artificial de acuíferos con agua residual tratada. Fuente: (CONAGUA, 2007).	37
Figura 10. Diagrama de flujo de los requisitos para la infiltración artificial de agua a los acuíferos. Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2007).	39
Figura 11. Brocal con ademe y contra ademe embebido en concreto. Fuente: (CONAGUA, 1996).	41
Figura 12. Brocal con tapa removible. Fuente: (CONAGUA, 1996).	42
Figura 13. Detalle de la tapa sobre el espacio anular del filtro. Fuente: (CONAGUA, 1996).	42
Figura 14. Tipos de ademes ranurados. Fuente: (CONAGUA ; SEMARNAT;, 2016).	45
Figura 15. Diseño de filtro de grava. Fuente: (CONAGUA ; SEMARNAT;, 2016)	46
Figura 16. Distribución de las Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM, 2018.	49
Figura 17. Ubicación de la región XIII, Aguas del Valle de México. Fuente: OCAVM, 2013	50
Figura 18. Condición geohidrológica de los acuíferos de la RHA XIII. Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM, 2018.	52
Figura 19. Localización del acuífero Texcoco.	53
Figura 20. Ubicación del Eje Volcánico Mexicano.	54
Figura 21. Cortes litológicos de pozos ubicados en el Valle de México. Fuente: (González Torres, Morán Zenteno, Mori, & Martiny, 2015)	56
Figura 22. Profundidad del nivel estático [m], 2017. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 23. Elevación del nivel estático (msnm), 2017. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 24. Evolución del nivel estático (m), 2005-2017. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 25. Aprovechamientos de agua dentro del acuífero Texcoco.	62
Figura 26. Volumen de bombeo según su uso. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 27. Sitio de aplicación de la recarga artificial.	72
Figura 28. Columna estratigráfica y registro eléctrico obtenidos en 1985.	73
Figura 29. Localización de los pozos ubicados dentro de la zona de estudio.	74
Figura 30. Secciones geológicas determinadas por el Instituto de Geología.	75
Figura 31. Ubicación para la instalación del pozo de inyección.	76

Figura 32. Sección Geológica obtenida por Instituto de Geofísica UNAM. Fuente: (Instituto de Geología de la UNAM, 2011).	77
Figura 33. Litología inferida del proyecto realizado por el Instituto de Geología para la CONAGUA. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 34. Método de recarga artificial seleccionado. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 35. Diseño de pozo prototipo para inyección de agua residual al acuífero. Fuente: Elaboración propia.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Métodos de Gestión de Recarga Artificial según el IGRAC.....	7
Tabla 2. Fuentes de agua del GWRS. Fuente: OCWD, 2015.....	20
Tabla 3. Inventario de proyectos de Recarga Artificial en México. Fuente: (González et al. 2015)	22
Tabla 4. Inventario de proyectos de Recarga Artificial en el Valle de México. Fuente: Elaboración propia con información de distintos sitios, 2018.	30
Tabla 5. Calidad del agua residual tratada para recarga artificial. Fuente: (CONAGUA, 2007)	35
Tabla 6. Distancia mínima a las captaciones y al tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga. Fuente: (CONAGUA, 2007).....	36
Tabla 7. Límites permisibles para el punto de infiltración. Fuente: (CONAGUA, 2007)..	38
Tabla 8. Diámetro del ademe en función del gasto.....	44
Tabla 9. Situación de disponibilidad de agua de los acuíferos de la RHA XIII. Subregión Valle de México (Mm ³ /año).....	51
Tabla 10. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2011).....	63
Tabla 11. . Litología de la zona de aplicación según estudios realizados en 1985. Fuente: Comisión del Lago de Texcoco.....	73
Tabla 12. Estratigrafía del subsuelo en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. 78	

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) está conformada por 59 municipios del Estado de México, un municipio de Hidalgo y las 16 delegaciones de la Ciudad de México (CDMX), capital de la República Mexicana. La CDMX ha sido durante el transcurso de los últimos dos siglos, el principal centro político, financiero, económico y cultural de la ZMVM y del país, donde se concentran: los tres poderes de la unión, las secretarías, museos, los más importantes campus universitarios con la mayor densidad de alumnos, además, cuenta con la mayor conectividad terrestre y aérea del país.

La población actual de la ZMVM es de 22.8 millones de habitantes, lo que representa el 19% de la población total del país y el 26% del producto interno bruto nacional, aun cuando su superficie representa apenas el 0.93% del territorio nacional (CONAGUA, 2013).

En los últimos treinta años, la ZMVM ha incrementado la extensión de su mancha urbana en un 82% y su población creció seis veces en los últimos 65 años, pasando de una población de 3.6 millones de habitantes en 1950 a 22.8 millones de habitantes en 2017, por lo cual, cada año presenta nuevas zonas de desarrollo, dando como resultado un incremento en la inmigración debido a la creación de fuentes de empleo (INEGI, 2015).

Como consecuencia del crecimiento de las áreas urbanas, la ZMVM requiere de grandes volúmenes de agua para satisfacer la demanda de la zona para sus distintos usos:

doméstico, industrial y agrícola. Sin embargo, ésta no tiene capacidad hídrica para satisfacer las demandas de agua de los usuarios de forma sustentable.

El 67% de la demanda de agua se obtiene mediante pozos que bombean agua de los acuíferos de la ZMVM, el volumen de extracción de estos pozos sobrepasa la recarga natural de los acuíferos, ocasionando serios problemas de abatimiento de niveles de agua, lo que a su vez provoca la compactación de las arcillas y el hundimiento del terreno. Para evitar estos hundimientos fue necesario recurrir a la importación de agua superficial proveniente del río Cutzamala y agua subterránea del acuífero del Valle de Lerma aportando en conjunto un caudal de 18.24 m³/s, lo que representa un 21% de la demanda actual de la ZMVM (CONAGUA, 2017).

El fenómeno de hundimiento del terreno se conoce como *Subsidencia*, es ocasionado entre otras causas por el drenado de los acuíferos y acuitardos, dentro de la ZMVM la subsidencia se concentra en las zonas del ex Lago de Texcoco con un promedio de hundimiento de 36 cm por año reportado para el período 1990-2015. El Instituto de Ingeniería de la UNAM pronostica un escenario tendencial para el período 2010-2030 con hundimientos que pueden alcanzar los 26 m, es decir, 1.3 m por año.

Es evidente que el manejo de los recursos hídricos en esta zona no es eficiente, sustentable y equitativo, lo cual, amenaza la capacidad de que generaciones futuras puedan aprovechar este recurso. Estos problemas, hacen ver que es necesario llevar a cabo una administración del agua subterránea que requiere de métodos científicos avanzados, tales como: gestión integral, caracterización, monitoreo, recarga artificial, balance hídrico, política hídrica integral, etc. Además, involucra la capacidad de desarrollo de herramientas que favorezcan la mitigación de la sobreexplotación y las consecuencias inherentes a ella, como son los hundimientos del terreno, el abatimiento de los niveles freáticos, deterioro de la calidad del agua, entre otras.

Como propuesta de solución a estos problemas, un elemento clave dentro de la gestión integrada es la recarga artificial de acuíferos, siendo un conjunto de técnicas que tienen como beneficios: incrementar la disponibilidad de agua, control de la subsidencia y mitigación de inundaciones, todo esto mediante la implementación de técnicas superficiales, subsuperficiales (zona vadosa) y profundas (zona saturada).

Para este trabajo se utilizará como método de recarga artificial, un pozo de inyección, esto debido a que el acuífero Texcoco es un acuífero confinado, es decir, es un acuífero

limitado superiormente por una formación poco permeable (arcillas) y que tiene agua a mayor presión que la atmosférica.

El pozo de inyección al ser un método directo (el agua infiltrada ingresa en el acuífero), requiere poca superficie para su implementación pero la calidad del agua de recarga debe cumplir con lo indicado en la NOM-014-CONAGUA-2007 la cual, especifica que debe estar libre de microorganismos patógenos además de cumplir con los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 para agua para consumo humano.

En este trabajo se desarrolla la metodología necesaria para cumplir lo anteriormente descrito y la metodología propuesta para el diseño del pozo.

I.1. Objetivo General

Identificar el sitio adecuado para llevar a cabo la recarga artificial dentro del acuífero Texcoco desde el punto de vista geohidrológico, así como presentar el diseño del prototipo de pozo de inyección mediante el cual se realizará la recarga.

I.2. Objetivos Específicos

Con el fin de cumplir el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y seleccionar el sitio potencial de recarga artificial dentro del acuífero Texcoco.
- Seleccionar el método más eficiente y óptimo de recarga artificial del acuífero en base a las características del sitio seleccionado.
- Diseñar el anteproyecto del dispositivo de recarga con base en los datos hidrogeológicos disponibles del acuífero y del sitio seleccionado para su aplicación.

I.3. Alcance

El alcance del presente trabajo es desarrollar el anteproyecto de un pozo de inyección como método de recarga artificial basando el diseño en la información disponible en la zona del ex Lago de Texcoco, identificando el sitio más apropiado para su implementación así como la selección de la fuente de abastecimiento de agua para realizar la recarga, todo esto alineado a la normativa actual vigente en México.

CAPÍTULO II. GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos (GRA) o Managed of Aquifer Recharged (MAR, por sus siglas en inglés) se ha definido como “Una herramienta de gestión hídrica económica y de gran afectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo como puedes ser Holanda, Estados Unidos y Australia” (Palma et al., 2015).

La recarga de acuíferos puede ocurrir de tres formas: natural, incidental y artificial. La recarga natural se define como la entrada de agua a la zona no saturada procedente de la superficie de terreno y asociada a, flujo descendente de las aguas hacia la zona saturada.

La recarga incidental es aquella que produce aportaciones al acuífero de manera accidental o no intencionada como sucede con los retornos de riego de cultivos, fugas en tuberías de abastecimiento y drenaje, fosas sépticas, etc. En muchos de estos caso la recarga accidental representa un impacto negativo para los acuíferos (Palma, 2015).

La recarga artificial se define como “el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de

reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural de agua” (Freeze & Cherry, 1979).

De acuerdo con Custodio y Llamas (1983), la recarga artificial se define como la introducción de agua en el acuífero de manera no natural, para entre otras cosas, incrementar la disponibilidad y/o manejar la calidad de aguas subterráneas.

Una visión más práctica de la técnica, es la expuesta por Bouwer (2002) “la recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero”.

II.1. Objetivos de la Gestión de la Recarga Artificial

La recarga artificial tiene como principales objetivos aumentar los recursos hídricos subterráneos disponibles y mejorar la calidad del agua (Bouwer, 2002).

Adicional a estos, también tiene como objetivos:

- Incremento de la disponibilidad y recarga de agua de los acuíferos.
- Almacenar agua en el subsuelo en época de lluvia para su uso futuro en época de estiaje.
- Proteger el agua dulce de la intrusión salina en acuíferos costeros.
- Controlar y/o mitigar los hundimientos diferenciales regionales.
- Restablecer el balance hídrico subterráneo y completar el ciclo hidrológico del agua.
- Reducción del ritmo de abatimiento de los niveles piezométricos.
- Tratamiento natural del agua en el subsuelo para mejorar su calidad.

II.2. Métodos de Recarga Artificial

Los procedimientos ideados para llevar a la práctica las técnicas de recarga artificial son múltiples y variados. Dillon (2005) clasificó estos procedimientos (Figura 1), dividiéndolos en 5 categorías a) Métodos de distribución, b) Modificaciones en el interior del canal, c) Recarga con pozos, túneles y perforaciones, d) Infiltración inducida en las márgenes de los ríos y e) Captación de agua de lluvia.

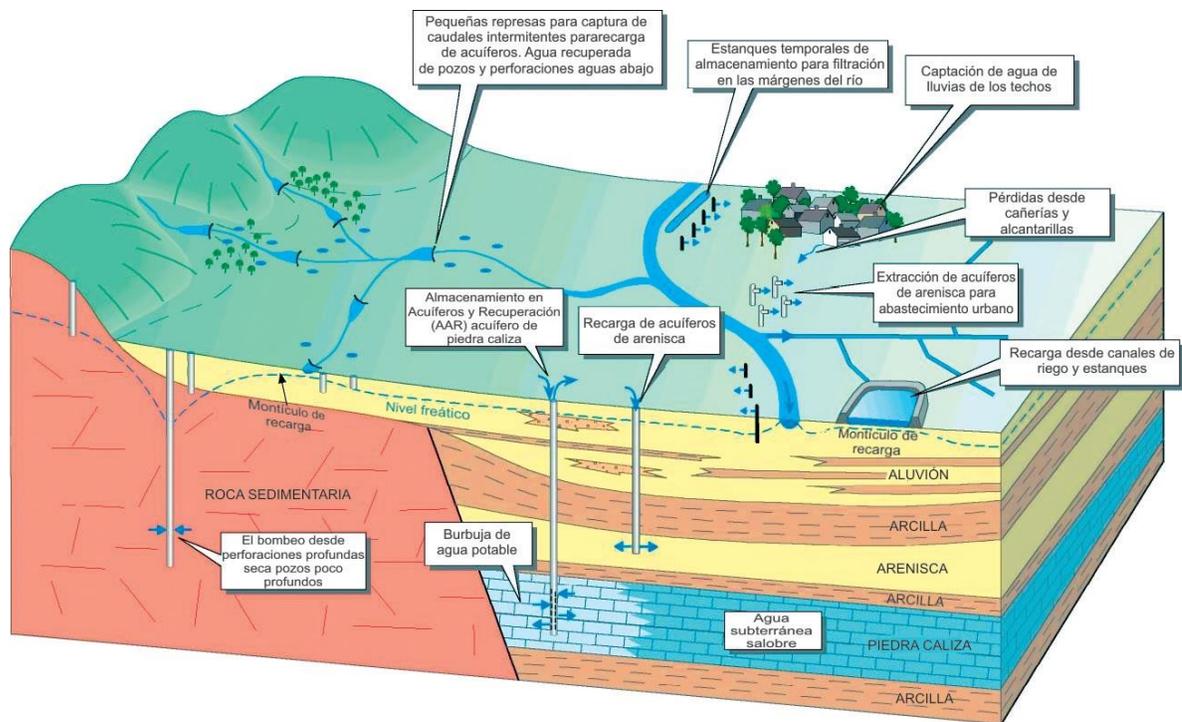


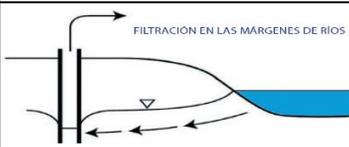
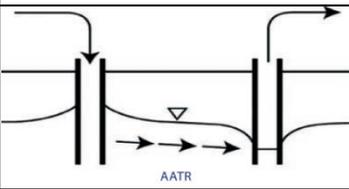
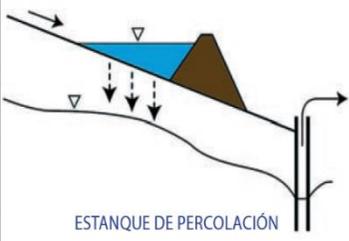
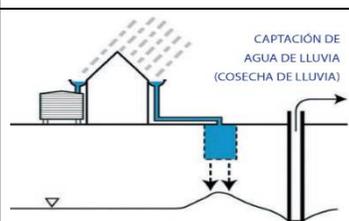
Figura 1. Metodologías utilizadas para la gestión de los recursos hídricos dentro de una cuenca. Fuente: (Dillon & Gale, 2005).

Adicional a esta clasificación, el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Agua Subterráneas (IGRAC por sus siglas en inglés, 2014) estableció dos grandes grupos de métodos dependiendo de si la recarga se efectúa mediante técnicas referidas principalmente a infiltrar agua al acuífero o si se usan técnicas de interceptación del agua para aprovecharla o infiltrarla.

El objetivo de esta clasificación es establecer una clasificación de los métodos de recarga para estandarizar y unificar a nivel mundial el lenguaje entre las personas que se dedican a esta disciplina, además de facilitar el inventario de las estructuras a nivel global, dicho inventario realizado por el IGRAC, se explicara más adelante en la sección 1.6 de este trabajo.

A continuación se presenta la Tabla 1, en la cual se muestra la clasificación de los métodos de recarga artificial utilizada en la actualidad.

Tabla 1. Clasificación de Métodos de Gestión de Recarga Artificial según el IGRAC.

	Tecnología	Método	Esquema
Técnicas para la infiltración de agua	Métodos de dispersión	Lagunas y estanques de infiltración	 <p>ESTANQUE DE INFILTRACIÓN</p>
		Inundación controlada	
		Zanjas, surcos y canales	
		Recarga incidental por riego	
	Infiltración inducida	Filtración en las márgenes de los ríos	 <p>FILTRACIÓN EN LAS MÁRGENES DE RÍOS</p>
		Filtración inter-dunar	
Pozos, túneles y perforaciones	Almacenamiento en acuífero con recuperación (AAR)/ Almacenamiento en acuífero, transferencia y recuperación (AATR)	 <p>AATR</p>	
	Pozo poco profundo /fosa de infiltración		
Técnicas para interceptar el agua	Modificaciones del canal	Estanque de percolación	 <p>ESTANQUE DE PERCOLACIÓN</p>
		Represas subsuperficiales	
		Represas de arena	
		Represas perforadas	
	Cosecha de Lluvia	Captación de agua de lluvia en techos	 <p>CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA (COSECHA DE LLUVIA)</p>
		Barreras y bunds	
Trincheras			

Fuente: elaboración propia con datos del IGRAC, 2014.

A continuación se hace una breve explicación del funcionamiento y la aplicación de cada una de estas técnicas de gestión de la recarga artificial, si el lector quisiera conocer más sobre alguna de estas técnicas o abordar con más detalle el tema de GRA, se recomienda visitar las siguientes páginas electrónicas <https://iah.org/> y <https://www.un-igrac.org/es>.

II.2.1. Métodos de dispersión

Los métodos de distribución de agua se aplican para acuíferos libres o semiconfinados cuyo nivel de agua se encuentra cercano a la superficie del suelo y consisten en la distribución de las aguas de recarga artificial sobre una superficie permeable, por lo cual se infiltra el agua a través de la zona no saturada hasta el acuífero. La calidad del agua de recarga artificial para estos métodos puede ser menor a la utilizada en los métodos profundos, ya que el suelo de la zona no saturada funciona como filtro natural. Aunque son métodos de bajo costo, requieren de una gran extensión de terreno, por lo que, está limitada su aplicación en la ciudad.

Algunas de las tecnologías que se encuentran en esta categoría son:

- Lagunas y estanques de infiltración.

Los estanques y las lagunas de infiltración son excavaciones en el suelo que retienen o almacenan el agua de recarga, hasta que esta se infiltre en el suelo. Se requiere un terreno extenso y lo más llano posible para garantizar una infiltración homogénea además de contar con una alta permeabilidad del suelo desde la superficie hasta el acuífero.

Uno de los problemas que se presentan en estas técnicas y que ocasionan la reducción de la eficiencia, es la eutrofización esto, ocurre en el fondo de la laguna o estanque, debido a la proliferación de bacterias, lo que origina una obstrucción en la recarga.

- Inundación controlada.

Esta técnica consiste en desviar el curso del agua hacia extensas superficies de tierras planas y permeables en las que se lleva a cabo la inundación y posteriormente el agua se infiltra con una velocidad mínima.

- Recarga incidental por retornos de riego.

Se lleva a cabo debido al excedente de agua utilizada para el riego de cultivos que no es aprovechada por dichos cultivos que de manera no intencionada se infiltra en el suelo y recarga los acuíferos. Otra forma de recargar incidental es el agua proveniente de tuberías de agua potable o alcantarillado que mediante fugas en los conductos se infiltran en el subsuelo.

El problema de esta técnica es que no se tiene control de la calidad del agua que se está infiltrando, provocando contaminación del acuífero.

- Tratamiento suelo – acuífero.

Esta técnica también es llamada *Soil Aquifer Treatment* y es una alternativa para reutilizar el agua regenerada, ya que esta agua complementa su tratamiento al pasar por el subsuelo, el cual, actúa como filtro natural, mejorando la calidad del agua.

Otra técnica de tratamiento suelo acuífero es la adición de desinfectantes mediante cloración, micro filtración, yodación, radiaciones ultravioleta y ozonificación.

II.2.2. Infiltración inducida

Las tecnologías de infiltración son métodos que pueden utilizar instalaciones artificiales o ambientes naturales, con el propósito de introducir modificaciones antrópicas que propicien el aumento en la tasa de filtración o en la recarga natural.

Dentro de esta tecnología se incluyen los siguientes métodos:

- Filtración en las márgenes del río

Consiste en excavar una galería o una batería de pozos en las márgenes de cuerpos de agua superficiales como son ríos o lagos con el objetivo de bombear y succionar agua del acuífero que a su vez provoca que el agua del río fluya hacia el bombeo pasando por el suelo y mejorando así su calidad.

- Filtración inter-dunar

Se trata de un método típico de las zonas costeras y consiste en dirigir el agua de un río, canal u otra fuente de agua hasta las dunas donde el agua se infiltra por gravedad hasta el acuífero. Las dunas de arena actúan como filtro natural ya que eliminan residuos de materia orgánica, microorganismos patógenos, etc.

II.2.3. Pozos, túneles y perforaciones

Las tecnologías de recarga artificial mediante pozos y perforaciones se emplea cuando no se cuenta con terreno suficiente y el uso de métodos superficiales se vuelve inadecuado o imposible y cuando por encima del acuífero a recargar se encuentran estratos que tiene gran espesor y baja permeabilidad, por lo tanto, se realiza la recarga directamente en el interior del acuífero y puede ser por gravedad o por inyección.

Existen diferentes tipos de pozos, algunos se enlistas a continuación:

- Pozos de infiltración

El método de pozos de infiltración se utiliza en acuíferos libres o semiconfinados ya que la recarga se lleva a cabo en la zona vadosa y el agua es vertida por gravedad. La calidad del agua de recarga puede ser menor a la requerida para los pozos de inyección debido a que el suelo sirve como filtro natural.

- Pozos de Almacenamiento en Acuíferos con Recuperación (AAR)

El método de pozos AAR se aplica en acuíferos confinados mediante inyección de agua a presión en un único pozo, perforado en la zona saturada, el cual es utilizado tanto para la inyección como para la recuperación del agua de recarga artificial.

Estos pozos tienen dos funciones, la primera es inyectar el agua excedente de lluvia o de plantas de tratamiento de agua residual y la segunda es bombear el agua del acuífero en época de sequias o cuando la demanda de agua aumenta.

- Pozos de Almacenamiento en Acuíferos, Transferencia y Recuperación (AATR)

Los pozos AATR son similares al método de pozos AAR con la diferencia que el agua se inyecta en un pozo al acuífero y se recupera a través de otro pozo distinto, el cual está situado a una distancia variable que puede ser de varios kilómetros.

La calidad del agua de recarga para los pozos de inyección debe ser muy buena debido a que es inyectada directamente al acuífero sin pasar por un suelo que funcione como filtro natural, lo que aumenta las probabilidades de contaminación del agua nativa.

II.2.4. Modificación al canal

Estas tecnologías son aplicadas a acuíferos libres y consiste en la modificación del cauce de ríos perennes, estacionales o transitorios mediante la construcción de represas o diques que contienen el agua por un tiempo prolongado, permitiendo que el agua se infiltre al subsuelo y llegue al acuífero.

Los métodos más comunes se mencionan a continuación:

- **Diques de retención**

Son estructuras construidas en el cauce de ríos mediante piedras, hormigón o materiales sueltos con la finalidad de contener el agua aumentando el tiempo de retención para así permitir que ocurra una infiltración natural al subsuelo siempre y cuando las condiciones de este suelo sean favorables para que esto ocurra.

- **Represas subsuperficiales**

Para la aplicación de este método es indispensable contar con un acuífero libre cercano a la superficie ya que estas represas se construyen bajo tierra cuando la construcción de presas superficiales es inviable. Estas represas subsuperficiales contiene el flujo de agua subterránea para posteriormente extraerse mediante pozos de bombeo.

- **Represas de arena**

Las represas de arena se desarrollan sobre el cauce de ríos intermitentes con lechos de roca permeable. Consta de diques transversales al cauce del río hechos con arena lo cual permite la retención del agua aumentando el tiempo de permanencia de agua en la cuenca además de retener sedimentos permeables formando un acuífero artificial.

- **Represas perforadas**

Estas represas están construidas con materiales impermeables en ríos intermitentes favoreciendo la sedimentación de los sólidos suspendidos en el agua. Las represas también cuentan con tuberías en su base para permitir la salida del agua y favorecer la recarga de agua subterránea aguas abajo de la represa.

II.2.5. Captación de agua de lluvia

La captación de agua de lluvia, consiste en la retención y acumulación de agua pluvial dentro de un área extensa para posteriormente ser usada para riego o en la recarga de agua subterránea, esta tecnología es un caso especial que cada vez se utiliza con mayor frecuencia.

- Captación de agua de lluvia en techos

Este método consiste en recolectar el agua de lluvia que cae en las azoteas mediante canaletas que conducen el agua hacia un recipiente donde se almacena para posteriormente infiltrar al subsuelo mediante otro dispositivo de recarga como puede ser pozos o lagunas de infiltración.

- Tanques, canales, cisternas.

Estos métodos son aplicados en carreteras, laderas o campos donde se construyen canaletas o tanques donde se almacenan los escurrimientos de las lluvias permitiendo así su uso para riego o para recarga de acuíferos.

II.3. Fuentes y calidad de agua para la Recarga Artificial

Para cualquier proyecto de recarga artificial es importante contar con una fuente cercana y que suministre agua de manera continua. Además, la calidad del agua seleccionada determinará si es necesario realizar un tratamiento previo a la recarga y que tipo de tratamiento es el más indicado para cumplir con la normatividad y evitar la contaminación del acuífero receptor.

Las posibles fuentes de agua que se pueden utilizar son:

- Agua Superficial. Es el agua proveniente de arroyos, ríos permanentes o intermitentes, lagos, lagos laguna y embalses artificiales.
- Agua Pluvial. Es el agua captada y almacenada, proveniente de escorrentías de tormentas.
- Agua Reciclada o Tratada. Es el agua residual industrial o doméstica que pasa por un tratamiento específico con el fin de mejorar su calidad para no afectar el agua del acuífero a recargar.
- Agua Potable. Es agua tratada de excelente calidad.

La calidad que debe presentar cada una de las posibles fuentes de agua es:

- Agua Superficial y pluvial: La calidad que deben presentar estos dos tipos de agua para poder ser utilizadas en la recarga artificial es la que establece la NOM-015-CONAGUA-2007, la cual está dirigida a la recarga artificial mediante infiltración de agua proveniente de escurrimientos superficiales y de la lluvia. Entre las características que debe tener esta agua, se mencionan las siguientes: no debe contener materia flotante, sólidos sedimentables ni coliformes fecales, baja cantidad de sólidos suspendidos, nitrógeno, fosforo, grasas y aceites, los límites permisibles para estos contaminantes se especifican en el capítulo 3 Normatividad del presente trabajo.
- Agua Reciclada o Tratada: La NOM-014-CONAGUA-2007 establece los requisitos que debe cumplir la calidad del agua residual tratada para su uso en la recarga artificial. Las características más importantes que debe cumplir son: no contar con microorganismos patógenos, bajas concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Carbono Orgánico Total, las concentraciones permisibles para estos contaminantes se especifican en el capítulo 3 Normatividad del presente trabajo.
- Agua Potable: Si se pretende utilizar este tipo de agua para la recarga artificial se debe cumplir con los límites permisibles que indica la NOM-127-SSA1-1994 Agua para consumo humano.

II.4. Colmatación o taponamiento

Se entiende por colmatación o *Clogging* (término en inglés) al proceso de acumulación de materiales sobre la superficie de infiltración del agua y representa el principal problema técnico con el que se enfrentan los proyectos de recarga artificial de acuíferos en todo el mundo, teniendo como efecto la disminución de la capacidad de infiltración en períodos de tiempo cortos.

Básicamente la colmatación se puede producir de cuatro formas, las cuales, a continuación se explican de manera breve.

- **Colmatación Mecánica**

La colmatación se origina cuando el agua de recarga utilizada en los métodos de recarga, disminuye su velocidad y las partículas que se encuentran en suspensión se depositan sobre la superficie del suelo, o bien penetran por los poros y fisuras del terreno, dando como resultado la acumulación de materiales que provocan la reducción de la tasa de infiltración o del caudal específico.

En los métodos de pozos de inyección además de la colmatación que generan los sólidos en suspensión, se produce en el acuífero una entrada de aire y de gases que se encuentran disueltos en el agua de recarga. Este aire y gas forman burbujas que se oponen al paso del agua (IGME, 2000).

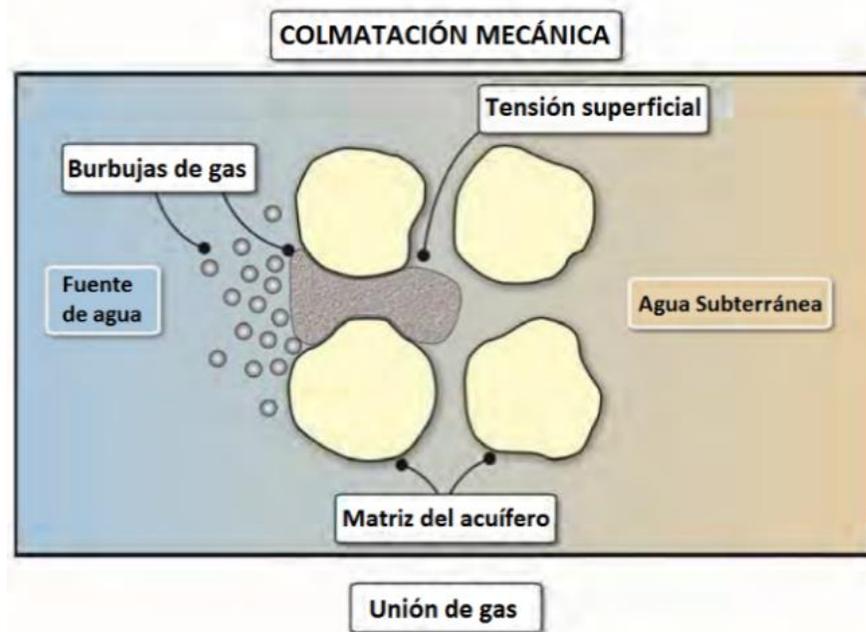


Figura 2. Esquema de colmatación mecánica. Fuente: (Russell, 2013)

- **Colmatación Biológica**

En las aguas que contienen alguna cantidad de materia orgánica, se produce la colmatación debido al crecimiento de plantas y algas, esto ocurre con mayor frecuencia en las épocas del año donde la temperatura es elevada como es el caso del verano.

En los sistemas de recarga en profundidad la colmatación tiene una gran importancia debido a la proliferación de bacterias, que por lo regular se concentran en el filtro de los dispositivos de recarga (IGME, 2000).

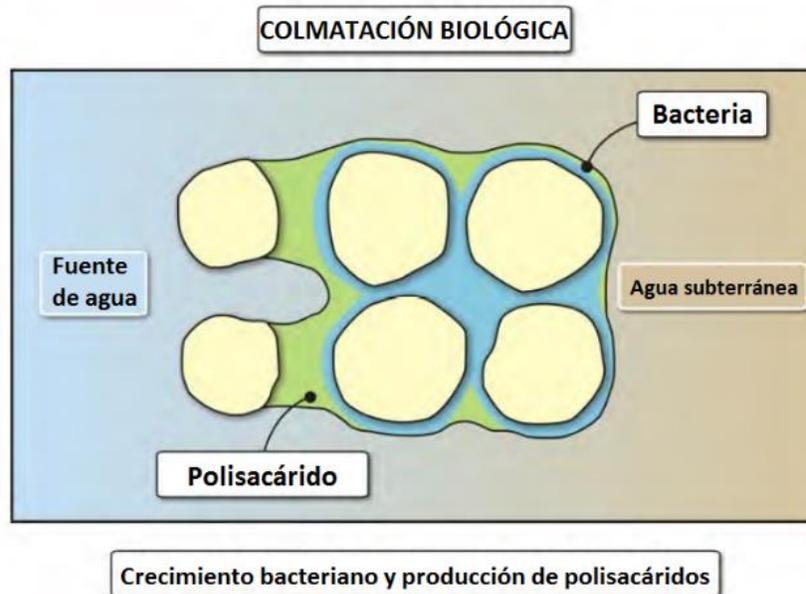


Figura 3. Esquema de colmatación biológica. Fuente: (Russell, 2013)

- Colmatación Química

Este tipo de colmatación es originada por la interacción del agua de recarga con el agua nativa del acuífero debido a que esto puede producir reacciones de disolución, precipitación, absorción, oxidación-reducción y cambio iónico, lo que provoca el taponamiento de los poros y la reducción de la capacidad de infiltración (IGME, 2000).

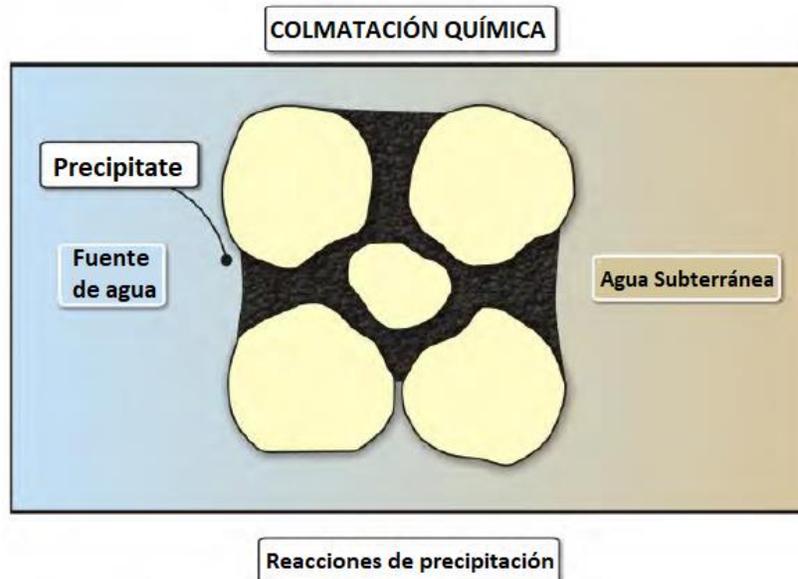


Figura 4. Esquema de colmatación química. Fuente: (Russell, 2013).

- Colmatación Física

La colmatación física se origina por la acumulación de partículas coloidales, intermedias o largas en el medio poroso, se consideran coloides a las partículas de $1\ \mu\text{m}$ de tamaño y pueden generarse por intercambio iónico o absorción de metales; las intermedias tienen un tamaño de entre 1 y $30\ \mu\text{m}$ y actúan por fuerzas electrocinéticas o de Van der Waals; por último, las de tamaño grande son mayores de $30\ \mu\text{m}$ e intervienen en la sedimentación, intercepción y efectos hidrodinámicos.

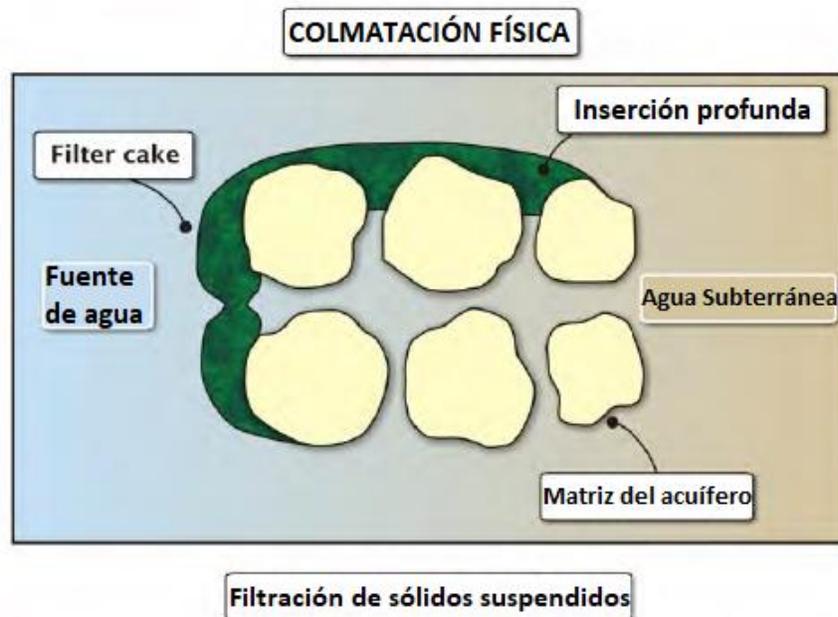


Figura 5. Esquema de colmatación física. Fuente: (Russell, 2013).

De acuerdo con Russell en el curso titulado “Clogging during Managed Aquifer Recharge” que impartió en Abril de 2018 como parte de la Jornada Técnica de Gestión de Acuíferos y Recarga Artificial realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, menciona que la colmatación siempre ocurre pero actualmente ya se tiene experiencia para controlar o mitigar este efecto.

Existen ciertos procedimientos para evitar la colmatación en dispositivos de recarga superficial, como pueden ser: empleo de decantadores, filtros y alguicidas, previos a la recarga, alternar periodos de inundación y secado y la limpieza y escarificación del lecho filtrante.

En los dispositivos de recarga profunda, se puede controlar el efecto de la colmatación de la siguiente forma: mediante el uso de filtros, decantadores y alguicidas previos a la recarga, alternando los períodos de inyección de agua con extracción de agua, limpieza mediante aire comprimido y la aplicación de polifosfatos como dispersantes.

II.5. Experiencias de Recarga Artificial en el Mundo

La Comisión para el Manejo de Recarga de Acuíferos de la Asociación Internacional de Hidrogeología (IAH-MAR, por sus siglas en inglés) realizó un inventario de métodos MAR a nivel mundial en el cual se tienen registrados 1,200 proyectos distribuidos en 62 países (Stefan y Ansems, 2016 en IMTA,2017). La base de datos del inventario mundial de proyectos MAR se puede consultar en la web del IGRAC (marportal.un-igrac.org).

El primer proyecto MAR del que se tiene registro, según el inventario mundial, se desarrolló en Reino Unido a principios del siglo XIX en 1810 con la técnica de filtración en la margen del río. Un siglo después se aplicó un proyecto en Estados Unidos (América del Norte) en el año de 1902 mediante la técnica de lagunas y estanques de infiltración. A partir de la mitad del siglo XX comenzó una expansión de las técnicas de manejo de recarga de acuíferos en el mundo, realizando proyectos en Oceanía (Represas de recarga), Asia (Lagunas y estanques de infiltración), África (Represas de recarga) y en América del Sur (Represas subsuperficiales).

A continuación, se describe uno de los casos de proyectos MAR con mayor reconocimiento a nivel internacional, por ser un sistema de gestión integral que opera bajo un esquema sustentable.

El Condado de Orange sobresale en la gestión del recurso hídrico y saneamiento debido a que han expandido su sistema de recarga y lo hicieron más eficiente. Actualmente purifican el agua residual hasta obtener una calidad similar al agua para consumo humano, la cual es inyectada al acuífero para su uso posterior, con esto han logrado que cada año el volumen de extracción del acuífero sea similar al volumen de recarga evitando de esta manera tener hundimientos diferenciales.

II.5.1. Orange County, California E.U.A.

El condado de Orange se ubica en el estado de California, la región se caracteriza por ser semiárida, recibe en promedio 355 mm de lluvia al año. Esta región cuenta con una población de 2.4 millones de habitantes.

El acuífero perteneciente a este condado abastece el 75% del suministro de agua potable requerido para la población (OCWD, 2015). Se localiza debajo de las partes norte y central del condado y se extiende desde el océano Pacífico hasta la ciudad de Yorba Linda.

Este acuífero es poco profundo y debido a que una de sus fronteras se sitúa en la costa de Huntington Beach y a que cuenta con una característica geológica conocida como desfiladero de Talbert compuesta por depósitos aluviales de arena y grava que cruzan la barrera de falla. Estas condiciones dan origen a su principal problema que es la entrada de agua de mar al acuífero (intrusión salina) a través del desfiladero de Talbert y que finalmente llega hasta los pozos de agua potable cuando se bombea agua del subsuelo.

El Distrito de Agua del Condado de Orange (OCWD, Orange County Water District) en conjunto con el Distrito Sanitario del Condado de Orange (OCS, Orange County Sanitation District) crearon el Sistema de Reabastecimiento de Agua Subterránea (GWRS, Groundwater Replenishment System) como una solución para el problema de intrusión salina de agua de mar y para satisfacer la demanda de agua de la población. El OSCD se encarga de tratar el agua residual y en lugar de descargarla al océano es enviada al GWRS donde esta agua se purifica utilizando un proceso de tratamiento avanzado a partir de la micro filtración, la ósmosis inversa y la luz ultravioleta con peróxido de hidrógeno, dando como resultado un agua de alta calidad que cumple o supera las normas de regulación de agua potable a nivel estatal y federal.

Finalmente esta agua es inyectada a través de una serie de pozos situados en la barrera de Huntington Beach que forman una barrera hidráulica que impide el paso del agua de mar en el acuífero.

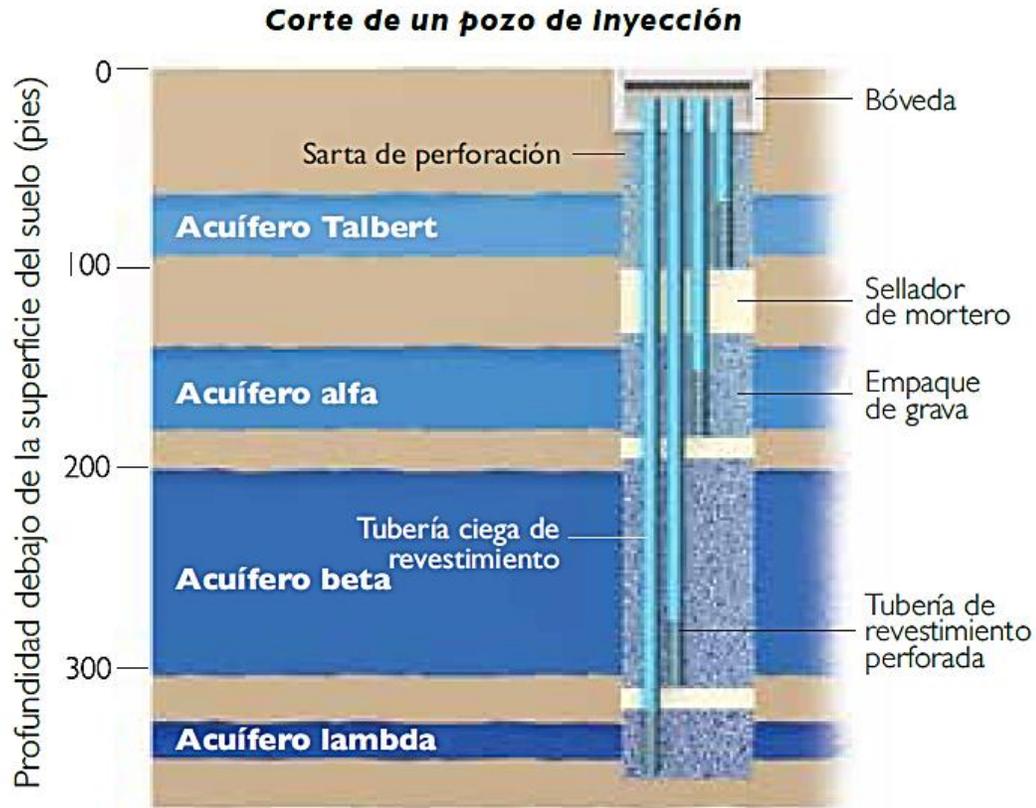


Figura 6. Corte de un pozo de inyección de la barrera de Huntington Beach. Fuente: (OCWD, 2015).

El GWRS produce 378 mil millones de metros cúbicos de agua purificada al año, de los cuales, 113 mil millones de metros cúbicos son utilizados para evitar la intrusión salina y el resto de agua purificada, 265 mil millones de metros cúbicos son utilizados para reabastecer el acuífero, filtrando el agua mediante lagunas y estanques de infiltración. (OCWD, 2015).

En la actualidad el Condado de Orange, la demanda de agua es de 500 millones de $m^3/año$, para satisfacer esta demanda el condado cuenta con diferentes fuentes de abastecimiento que le permiten alcanzar un total de 418 millones $m^3/año$, estas fuentes son: agua reciclada, con 123 millones de $m^3/año$ (29% del total); recarga natural con agua de lluvia (18%); agua importada del río Colorado desde el norte de California (19%); agua de lluvia para recarga artificial (15%); flujo base del río Santa Ana con el cual se hace recarga artificial (19%). En la Tabla 2 se presenta a manera de resumen, las fuentes de agua, su disponibilidad y cuánto cuesta cada una.

Tabla 2. Fuentes de agua del GWRS. Fuente: OCWD, 2015.

Fuente	Disponibilidad (Mm³/año)	(%)	Costo por cada 1,000 m³ (dólares)
Planta de reciclaje de agua	123	29	405
Recarga natural al acuífero	74	18	0
Agua importada	80	19	567 – 811
Agua de lluvia	63	15	16
Flujo base del río	78	19	
Total	418	100	

El OCWD cobra la concesión del agua subterránea, actualmente bombear agua del subsuelo tiene una cuota aproximada de 261 dólares por cada 1000 m³, lo que representa los ingresos del sistema.

La recarga natural no tiene costo; el agua que es importada cuesta entre 567 y 811 dólares por cada 1,000 m³; el agua de tormenta y el flujo base del río Santa Ana tiene un costo de unos 16 dls por cada 1000 m³; reciclar el agua cuesta unos 426 dólares, con todo esto el rendimiento del acuífero aumentó de 123 millones de m³/año a 418 millones de m³/año, lo que representa un incremento casi del doble.

II.6. Experiencias de Recarga Artificial en México

En México se reporta el uso de cuatro de las cinco categorías de técnicas MAR según la clasificación de la tabla 1. En la actualidad y con base en el inventario publicado en el IX Simposio Internacional de Gestión de Recarga de Acuíferos (ISMAR9) se cuenta con 13 experiencias de recarga artificial dentro del territorio nacional, de los cuales cuatro proyectos se encuentran operando actualmente y nueve se encuentran en gestión, es decir, están por construirse.

El objetivo principal de estos métodos MAR es el almacenamiento y recuperación de agua incluyendo la mejora de su calidad. Como objetivos secundarios se tiene el control de avenidas mediante pozos de absorción e infiltración y el control de hundimientos diferenciales como es el caso de la Ciudad de México.

En la tabla 3 se presenta a modo de resumen los 13 proyectos MAR registrados en el inventario nacional, si el lector desea conocer más detalles sobre la ubicación y el tipo de técnica MAR utilizados en los proyectos registrados ante la CONAGUA dentro de la República Mexicana, se recomienda consultar las fichas técnicas en la página electrónica del ISMAR9 (<http://www.ismar9.org/Mapa.html>).

Tabla 3. Inventario de proyectos de Recarga Artificial en México. Fuente: (González et al. 2015)

Proyecto	Situación Actual	Técnica	Tecnología	Método	Fuente de agua utilizada para la recarga	Volumen anual de infiltración (Mm ³)
Valle de Palmas, BC	P	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada	12
Santo Domingo, BCS	P	Intercepción	Modificaciones en el cauce	Represas subsuperficiales	Agua superficial	40
San José del Cabo, BCS	P	Infiltración	Infiltración inducida	Filtración en margen del río	Agua superficial	No disponibles
San Luis Rio Colorado, Sonora	I	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada, tratamiento secundario	12
Caborca, Sonora	P	Intercepción	Cosecha de lluvia	Pozo de absorción	Agua pluvial	No disponible
La Victoria, Sonora	P	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua superficial	20
Hermosillo, Sonora	P	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada, tratamiento secundario	70
Ciudad Juárez, Chihuahua	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozos de infiltración	Agua pluvial	No disponible
Región Lagunera, Coahuila	I	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua superficial	50
Aguascalientes, Aguascalientes	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozos de inyección	Agua residual tratada, tratamiento terciario	15
Valles Centrales de Oaxaca, Oaxaca	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozos de infiltración	Agua pluvial	35
Valle de México	I/P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozos de infiltración	Agua pluvial	50
Valle de México	I	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozos de inyección	Agua subterránea	No disponible

II.7. Experiencias de Recarga Artificial en el Valle de México

II.7.1. Antecedentes

En la Ciudad de México se tienen registros de la implementación de proyectos de recarga desde los años 40. El proyecto más antiguo del que se tiene conocimiento se desarrolló en las cercanías del volcán Xitle en la parte alta del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), el cual consistía en un canal a cielo abierto que conducía una porción del volumen de agua del río Eslava hasta un sumidero localizado en las faldas del volcán (IMTA, 2017). A continuación se presentan los proyectos desarrollados en la Cuenca de México:

Río Magdalena, Magdalena Contreras, CDMX

Entre los años 40's y 50's en la cuenca del río Magdalena se construyeron dos canales con el nombre de canal alto y canal bajo, los cuales, conducían el agua del río hacia la zona de basaltos del Pedregal de San Ángel, donde el agua se infiltraba en su totalidad. Se tienen registros de la Secretaría de Recurso Hidráulicos del volumen de agua infiltrada en el canal bajo para el periodo de 1943-1950 de 34.5 millones de m³ y para el canal alto, entre 1944 y 1960, un volumen de 73.5 millones de m³.

Pozos de absorción en distintos puntos de la CDMX

En el año 1953 como parte de un experimento de infiltración en la Ciudad de México por parte del Ing. Ignacio Sáinz que consistió en la perforación de siete pozos someros de absorción de agua de lluvia, ubicados en Jardín de San Fernando, Paseo de la Reforma y Melchor Ocampo, Columna de la Independencia, Nuevo León y Benjamín Franklin, Venustiano Carranza y Bolívar, San Jerónimo e Isabel la Católica y en el jardín Luis G. Urbina con el objetivo de resolver los problemas de inundaciones presentados en la época de lluvias.

Con base en los resultados obtenidos en el experimento, posteriormente se perforaron 42 pozos de infiltración con profundidades de hasta 6m y un diámetro de 15 cm, lo que permitió infiltrar gastos de unos cuantos l/s (IMTA, 2017; Sáinz 1954).

Presas Mixcoac, Benito Juárez, CDMX

En 1956 se construyeron tres pozos de infiltración profundos en la cuenca del río Mixcoac, perforados a una profundidad de 150m. Como fuente de recarga se utilizó el agua de lluvia que se almacenaba en la presa del río Mixcoac, la cual, tenía una capacidad de almacenamiento de 660 mil m³. En conjunto los tres pozos infiltraron 1050 l/s, que posteriormente se redujeron a 800 l/s por colmatación. Los pozos operaron por un periodo de ocho años, infiltrando durante ese tiempo un volumen de 15.2 millones de m³. La razón por la cual se suspendió el proyecto fue debido a la contaminación del agua de la presa con aguas negras provenientes de las nuevas colonias que se asentaron a lo largo del cauce del río Mixcoac. (IMTA, 2017; Sainz-Ortiz, 1963).

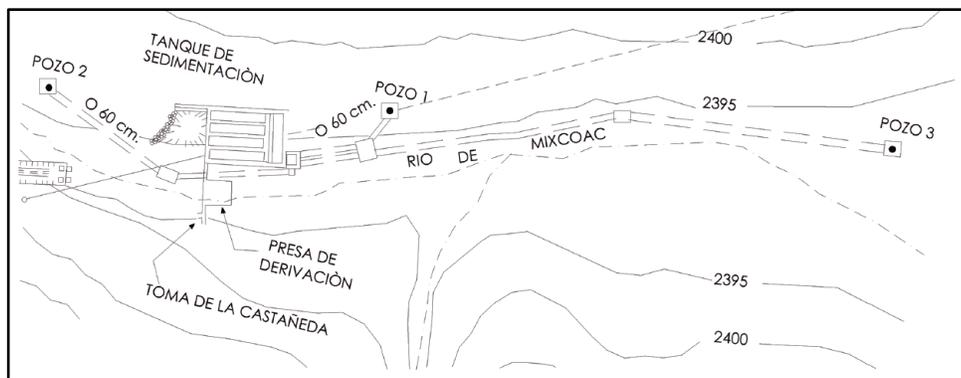


Figura 7. Esquema de la ubicación de los pozos de infiltración en la presa Mixcoac.

Fuente: (IMTA, 2017).

Ex lago de Texcoco

A mediados de 1985, la Comisión del Lago de Texcoco inició un proyecto con el nombre de “Módulo experimental de recarga de acuíferos” con el objetivo de determinar la factibilidad técnica, la conveniencia y el costo de aplicación de la recarga artificial de acuíferos mediante pozos de inyección con agua residual tratada a nivel terciario. El proyecto se localizó en la zona federal del Ex lago de Texcoco en el área comprendida entre el lago Dr. Nabor Carillo, la Planta de Tratamiento de Nivel Secundario, el Lago Recreativo y las Lagunas Facultativas.

El proyecto está integrado por tres pozos, dos con una profundidad de 200m y uno de 160m con un ademe telescópico con diámetro de 24 pulgadas hasta 10 pulgadas en la parte ranurada que tiene una longitud de 130m, cada pozo contaba con una capacidad de infiltración de 20 a 23 l/s. Además se cuenta con ocho piezómetros de 2 pulgadas de

diámetro y 80m de profundidad y dos piezómetros más de 6 pulgadas de diámetro con profundidades de 160 y 180m

La fuente de agua de recarga se obtuvo de la planta piloto experimental que cuenta con una capacidad instalada de 50 l/s y es abastecida por la PTR Lodos activados.

Debido a la poca bibliografía encontrada sobre este proyecto no se obtuvieron registros sobre el tiempo que operaron los pozos, la cantidad de agua inyectada al acuífero ni el motivo por el cuál dejaron de funcionar.

San Luis Tlaxialtemalco

En 1989 como parte de un programa inmediato de experimentación para recargar el acuífero de la Ciudad de México mediante la rehabilitación de pozos de bombeo cancelados utilizando agua tratada como fuente de recarga, cabe mencionar que este caso es considerado el primer proyecto de este tipo en México.

Se eligió el pozo San Luis 15, ubicado al sur de la CDMX junto al poblado de San Gregorio Atlapulco en Xochimilco debido a tres características importantes, a) por encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco lo que garantizaba la disponibilidad continúa de agua con un nivel de tratamiento terciario; b) en su momento, el pozo se encontraba en desuso, por lo cual no se requería perforar un pozo nuevo y c) por ubicarse fuera del radio de interferencia de otros pozos de agua potable, evitando de esta manera, el riesgo de una posible contaminación directa al efectuar la recarga (Lesser, 1991).

El pozo tenía una profundidad de 64m, de los cuales 18 m contaban con un ademe de tubería ciega de 18 pulgadas y el resto se encontraba libre de tubería. En base a estas dimensiones la adaptación del pozo consistió en la colocación de tres tuberías de inyección de 4 pulgadas de diámetro cada una por donde se inyectaban 25 l/s correspondientes al gasto de operación de la PTAR.

Adicionalmente se perforaron tres pozos de monitoreo para observar el nivel piezométrico y obtener muestras de agua, además se construyeron módulos a escala para la experimentación de la colmatación.

Pozo Santa Catarina 6, Cerro de la Estrella, Iztapalapa

En 1995 se planteó la posibilidad de recargar el acuífero mediante la adaptación de 9 pozos existentes, cuatro de ellos ubicados al norte de la Sierra de Santa Catarina y cinco en la porción sur de la misma Sierra, utilizando el agua proveniente de PTAR Cerro de la Estrella la cual contaba con una capacidad de operación de 2300 l/s a nivel terciario.

Los pozos ubicados al norte de La sierra de Santa Catarina, la permeabilidad del suelo permitiría la recarga de 40 l/s por pozo, para un total de 160 l/s. Los pozos situados al sur de la Sierra podrían recargar 50 l/s para un total de 250 l/s.

Los pozos ubicados al norte de la Sierra de Santa Catarina recargaban 40 l/s/pozo para un total de 160 l/s de agua recargada en el acuífero, a diferencia de los pozos situados al sur de la Sierra que debido a la permeabilidad del suelo recargaban 50 l/s/pozo para un total de 250 l/s.

Solo uno de estos pozos, el Santa Catarina 6, fue adaptado para realizar la recarga (Lesser, 1995). Debido a la falta de información sobre el proyecto, se desconoce el volumen de agua recargada, el tiempo que opero el pozo y si actualmente funciona.

II.7.2. Época actual

La época actual se considera a partir del 2003, año en el que la CONAGUA crea la NOM-014-CONAGUA-2003 “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada” con el objetivo de regular la calidad de agua utilizada en los proyectos de recarga con el fin de evitar la contaminación de los acuíferos y posteriormente en 2007 se creó la NOM-015-CONAGUA-2007 “Infiltración artificial de agua a los acuíferos” la cuál especifica los requisitos para las obras de recarga con agua de lluvia, más adelante en el Capítulo 3 se describirán a detalle estas normas.

Es importante mencionar que antes de la aparición de estas normas la cantidad de proyectos de recarga de acuíferos era amplia y actualmente se han hecho muy pocos proyectos debido a las exigencias de dichas normas.

Pozo panteón civil, Cerro de la estrella, Iztapalapa

Durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2001 y 2009 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), con el objetivo de infiltrar agua de lluvia para recuperar niveles en el acuífero ZMCM y evitar inundaciones en la zona retomó los proyectos de recarga artificial que se realizaron en los años ochenta; se construyeron 126

pozos de infiltración ubicados a las faldas del cerro de la Estrella, Santa Catarina y Peñón de los baños.

Posteriormente para el periodo 2010-2013 se realizó el proyecto Recarga artificial del acuífero de la zona de Cerro de la Estrella a través de inyección directa. La primera etapa de este proyecto consistió en la construcción de una planta experimental de tratamiento avanzado a nivel terciario con osmosis inversa con capacidad operativa de 20 l/s abastecida por la PTAR Cerro de la Estrella y con el objetivo de inyectar el agua al acuífero para recarga artificial.

En la actualidad se trabaja en la rehabilitación de la planta para posteriormente iniciar la segunda etapa, donde se considera recargar al acuífero mediante la inyección directa en el pozo Núm. 204 Panteón Civil 3, localizado a 880m al noreste de la planta; el pozo será rehabilitado ya que anteriormente fue utilizado como pozo de bombeo.

El Caracol, Ecatepec, Estado de México

Para el año 2010, se realizó un estudio en la zona de El Caracol con el fin de evaluar la factibilidad de recargar el acuífero profundo Cuautitlán-Pachuca.

Dicho proyecto consistía en la construcción de dos pozos piloto de recarga perforados a una de profundidad de 250 y 300 m, un pozo de monitoreo con 200m de profundidad, dos pozos de monitoreo con profundidad de 250m y uno más de 300m de profundidad, todos los pozos de monitoreo eran de tipo piezómetro abierto.

El estudio de la zona determinó la capacidad de infiltración del suelo mediante recarga de agua a gravedad (infiltración) con un caudal de entre 14 y 27 l/s y a presión (inyección) con un gasto de 20 a 35l/s.

De este estudio se determinó que la zona es favorable para realizar recarga de agua mediante pozos de inyección sin embargo se requieren estudios a detalle para determinar la posibilidad de rehabilitar los pozos piloto para recarga del acuífero.

Chapultepec

La Comisión Nacional del Agua en el año 2017, planteo la construcción de dos módulos de tratamiento a nivel terciario como complemento a la planta de tratamiento actual ubicada en las inmediaciones del bosque de Chapultepec, dichos módulos generaran un caudal de 20 l/s los cuales serán recargados al acuífero mediante pozos de inyección. El

gasto proveniente del módulo secundario servirá para alimentar los lagos y para riego de las áreas verdes del bosque.

Actualmente el avance del proyecto se encuentra en la perforación del primer pozo de inyección.

Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Hoy en día como parte de la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) ubicado entre el Caracol y la carretera Peñón-Texcoco, la Comisión Nacional del Agua plantea una estrategia para llevarse a cabo en la zona del antiguo lago de Texcoco, el cual, consiste en lo siguiente:

- Interceptar los ríos Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxcacoco y Texcoco, que inundan actualmente el predio del NAICM.
- Interceptar los ríos Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec, para regularlos en el lago Nabor Carrillo.
- Construir cinco lagunas junto al lago de Texcoco, las lagunas Hidalgo y Carrizo, San Bernardino, Moño 1, Moño 2 y Peñón Texcoco Sur con una capacidad de almacenamiento en conjunto de 17.68 hm³ y que posteriormente enviarán el agua al Túnel Emisor Oriente quién se encargara de desalojar el agua de los ríos junto con las aguas de la Ciudad México.

De esta manera, el Proyecto Hidráulico del Lago de Texcoco y el del NAICM representan una excelente oportunidad para recargar el acuífero Texcoco que se encuentra actualmente sobreexplotado mediante pozos de inyección ya que se contará con un gran volumen de agua disponible para recargar.

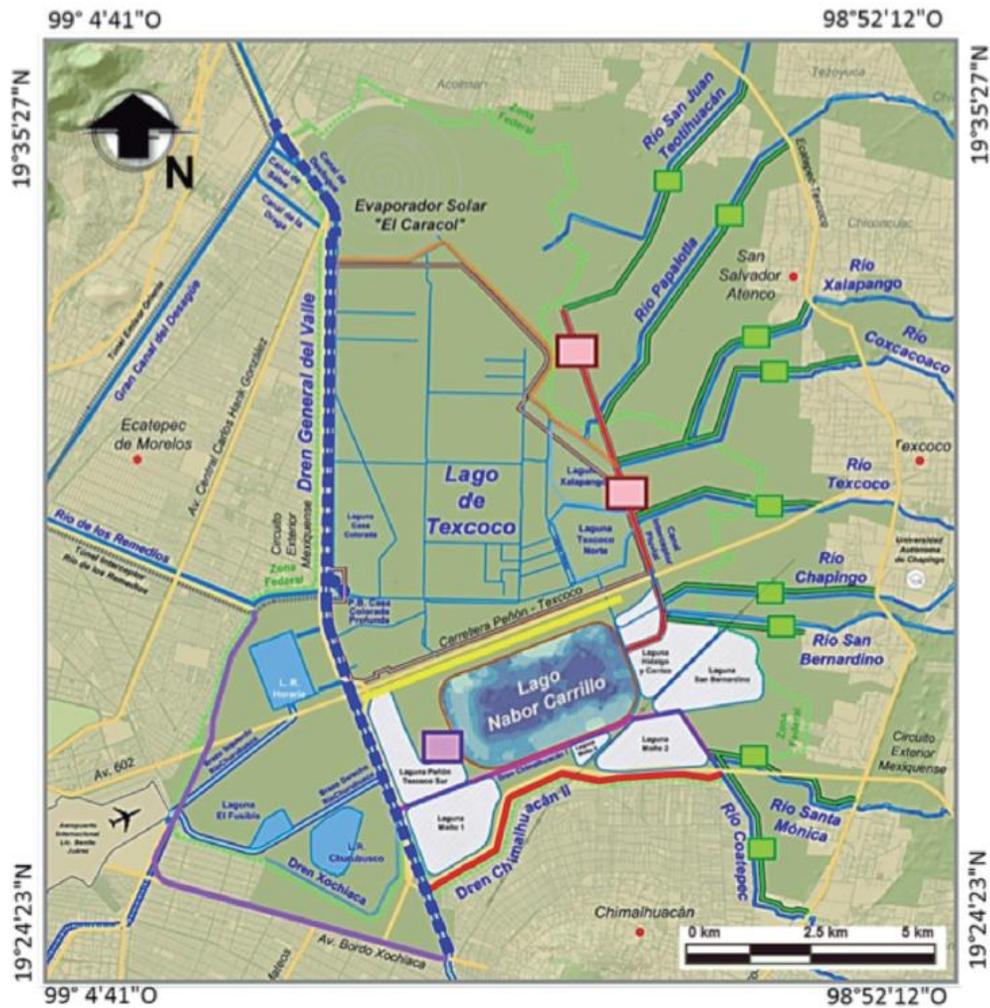


Figura 8. Ubicación de las lagunas y PTAR del Proyecto Hidráulico del Lago de Texcoco. Fuente: CONAGUA, 2014.

A manera de resumen de los proyectos de recarga descritos anteriormente, se presenta la tabla 4 con las principales características de dichos proyectos.

Tabla 4. Inventario de proyectos de Recarga Artificial en el Valle de México. Fuente: Elaboración propia con información de distintos sitios, 2018.

Año	Proyecto	Situación Actual	Técnica	Tecnología	Método	Fuente de agua utilizada para la recarga	Volumen anual de infiltración (Mm³)
1943-1960	Desviación Rio Magdalena	INO	Infiltración	Dispersión	Inundación contralada	Agua superficial	108
1953-1954	Desviación río Eslava, Ajusco	INO	Infiltración	Dispersión	Inundación contralada	Agua superficial	No disponible
1953-1975	Primeros pozos de infiltración	INO	Intercepción	Captación de lluvia	Pozos de absorción	Agua pluvial	No disponible
1955 - 1975	Presa Mixcoac	INO	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de infiltración	Agua Pluvial	1.9
1964	Infiltración de ríos de la cuenca del Valle de México	p	Infiltración	Dispersión	Inundación contralada	Agua superficial	360
1985	Módulo experimental de recarga de acuíferos, Texcoco	INO	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
1989	San Luis Tlaxiátemalco	INO	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
1995	Pozo Santa Catarina 6, Cerro de la estrella, Iztapalapa	INO	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
1995	Proyecto de recarga artificial con aguas residuales. Plan Maestro.	INO/P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	32
1997	Estudio de factibilidad para la recarga del acuífero de la ZMVM con agua residual.	p	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	310
2009	Recarga utilizando agua de lluvia en la cuenca del río Magdalena.	INO	Intercepción	Modificación del canal	Represas de gaviones	Agua superficial	0.5

2010	Recarga artificial de acuíferos a partir de agua de lluvia y residual potabilizada. Estudio de gran visión.	P	Infiltración	Dispersión	Lagunas de infiltración	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	5.5 – 10.5
		P/I	Intercepción	Captación de lluvia	Pozos de absorción	Agua pluvial	No disponible
2010-2013	Pozo Panteón Civil, Cerro de la Estrella, Iztapalapa	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
2010	El PSHVM y los programas de recarga artificial de acuíferos y reúso del agua	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	32
2011	Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del lago de Texcoco	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
2012	Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga Artificial El Caracol	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
2017	Pozo Chapultepec	P	Infiltración	Pozos y perforaciones	Pozo de inyección	Agua residual tratada, Tratamiento terciario	No disponible
2017	Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	P	Intercepción	Captación de lluvia	Pozos de absorción	Agua pluvial	36.61

P= En Proyecto

INO = Instalado No operando actualmente

I= Instalado operando actualmente

En el Valle de México se tiene antecedentes de gestión de recarga artificial al menos desde 1943. En ese año se realizó una obra que consistió en la creación de dos canales que desviaban el cauce del río Magdalena hasta la zona de basaltos del Pedregal mediante el método de inundación controlada.

Como esta estructura, se tiene registro de muchas más, las cuales dejaron de operar por no tener continuidad en su operación o en su mantenimiento. Hasta el día de hoy se tiene un inventario para el Valle de México que consta de 18 proyectos. En el inventario (Tabla 4) se identifican los proyectos como dispositivos instalados no operando o en anteproyecto.

CAPÍTULO III. NORMATIVIDAD

A diferencia de otros países, México es de los pocos que cuenta con normatividad vigente para el desarrollo y aplicación de proyectos de Gestión de Recarga Artificial de Acuíferos (Palma *et al*, 2014).

En México el órgano encargado de administrar y preservar las aguas nacionales con el objetivo de lograr su uso sustentable es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), quién es responsable de la administración y preservación de las aguas del país con el fin de garantizar el uso sustentable del recurso. Se organiza en tres áreas operativas: gestión de agua, organismos de cuenca y asistencia técnica. Sus objetivos son: promover una gestión integrada y sustentable del agua en cuencas y acuífero; mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico; consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso; prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender a sus efectos; evaluar los efectos del cambio en ciclo hidrológico; y crear una cultura contributiva y del cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa (BNA, 2018).

III.1. Ley Aguas Nacionales (LAN)

Las disposiciones de esta Ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales, subterráneas o marinas y sus objetivos son: regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, sus distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable (DOF, 1992).

En relación a la gestión de la recarga artificial, la LAN en su artículo 7, menciona lo siguiente:

- Se declara de utilidad pública el restablecimiento hidrológico de las aguas nacionales, incluida así la recarga artificial de acuíferos de acuerdo con la normatividad respectiva vigente.
- La protección, mejoramiento, conservación y restauración de cuencas hidrológicas, acuíferos, cauces, vasos y demás depósitos de agua de propiedad nacional, zonas de captación de fuentes de abastecimiento, zonas federales, así como la infiltración natural o artificial de aguas para reabastecer mantos acuíferos se realizarán acorde con las “Normas Oficiales Mexicanas (NOM)”
- Se considera lineamiento general, la contribución al saneamiento de cuencas, subcuencas, microcuencas, acuíferos y cuerpos receptores de aguas residuales, para prevenir y/o corregir su contaminación.
- El estado será el encargado de la regulación de cuencas hidrológicas y acuíferos.
- La programación hídrica contemplará como actividades obligatorias la clasificación de cuerpos de agua, así como la elaboración de balances hídricos en cantidad y calidad por cuencas y acuíferos.

De acuerdo con los lineamientos anteriores, se crearon dos normas que garantizan la protección de la calidad del agua subterránea y para comunicar los propósitos de contribución para la recuperación de acuíferos. De la misma manera, se establecen los requisitos y lineamientos de agua pluvial a los acuíferos.

III.2. NOM-014-CONAGUA-2007 Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

El objetivo de esta norma es establecer los requisitos 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.

Se divide en dos casos, el primero, cuando no existen captaciones para el suministro público urbano o doméstico a un kilómetro de distancia o menos; los requisitos de calidad del agua se presentan en la siguiente tabla 5.

Tabla 5. Calidad del agua residual tratada para recarga artificial. Fuente: (CONAGUA, 2007)

Tipo de Contaminante	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial/Subsuperfici	Directo
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos
Contaminantes Regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127- SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127- SSA1-1994
Contaminantes no Regulados por Norma	$DBO_5 \leq 30 \text{ mg/l}$, $COT \leq 16 \text{ mg/l}$	$COT \leq 1 \text{ mg/l}$

En el segundo caso, se aplica cuando no se tiene captaciones para el suministro público-urbano o doméstico a una distancia de un kilómetro a la redonda, además, se requiere cumplir con los puntos que se enlistan continuación:

- Realizar un proyecto “piloto” de recarga in situ, cuya operación tenga duración suficiente para determinar: la calidad del agua resultante de la mezcla del agua de recarga con el agua subterránea nativa, la interacción del agua de recarga con el subsuelo, la respuesta de los niveles de agua a la recarga y las variaciones de la tasa de infiltración en el tiempo.
- Efectuar un análisis hidrogeoquímico, basado en un modelo numérico de las probables reacciones fisicoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea nativa y con los materiales que conforman el acuífero y la zona no saturada. El análisis debe concluir, si el agua de recarga es compatible con el agua subterránea nativa y/o si existen condiciones para generar alguna reacción

fisicoquímica que altere la calidad del agua nativa a las propiedades hidráulicas del acuífero.

- Aplicar un modelo numérico de flujo y transporte de solutos, para simular el impacto del sistema de recarga artificial en la calidad del agua nativa en las captaciones subterráneas y en los niveles del acuífero a recargar. La elaboración de este modelo deberá seguir el protocolo establecido por Anderson y Woessner.
- Cumplir con los límites máximos permisibles en la calidad del agua de recarga que determine “La Comisión”, para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, cuya presencia se suponga atendiendo al origen del agua residual tratada.
- Realizar, en su caso, los estudios toxicológicos que determine “La Comisión” en el agua de recarga, y
- Respetar las distancias mínimas y el tiempo de residencia que se especifican en la tabla siguiente.

Tabla 6. Distancia mínima a las captaciones y al tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga. Fuente: (CONAGUA, 2007)

Variable	Tipos de Recarga	
	Superficial/Subsuperfici	Directo
Distancia horizontal mínima entre el límite exterior del SRA y las captaciones para uso público-urbano o	150 m	600 m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción	6 meses	12 meses

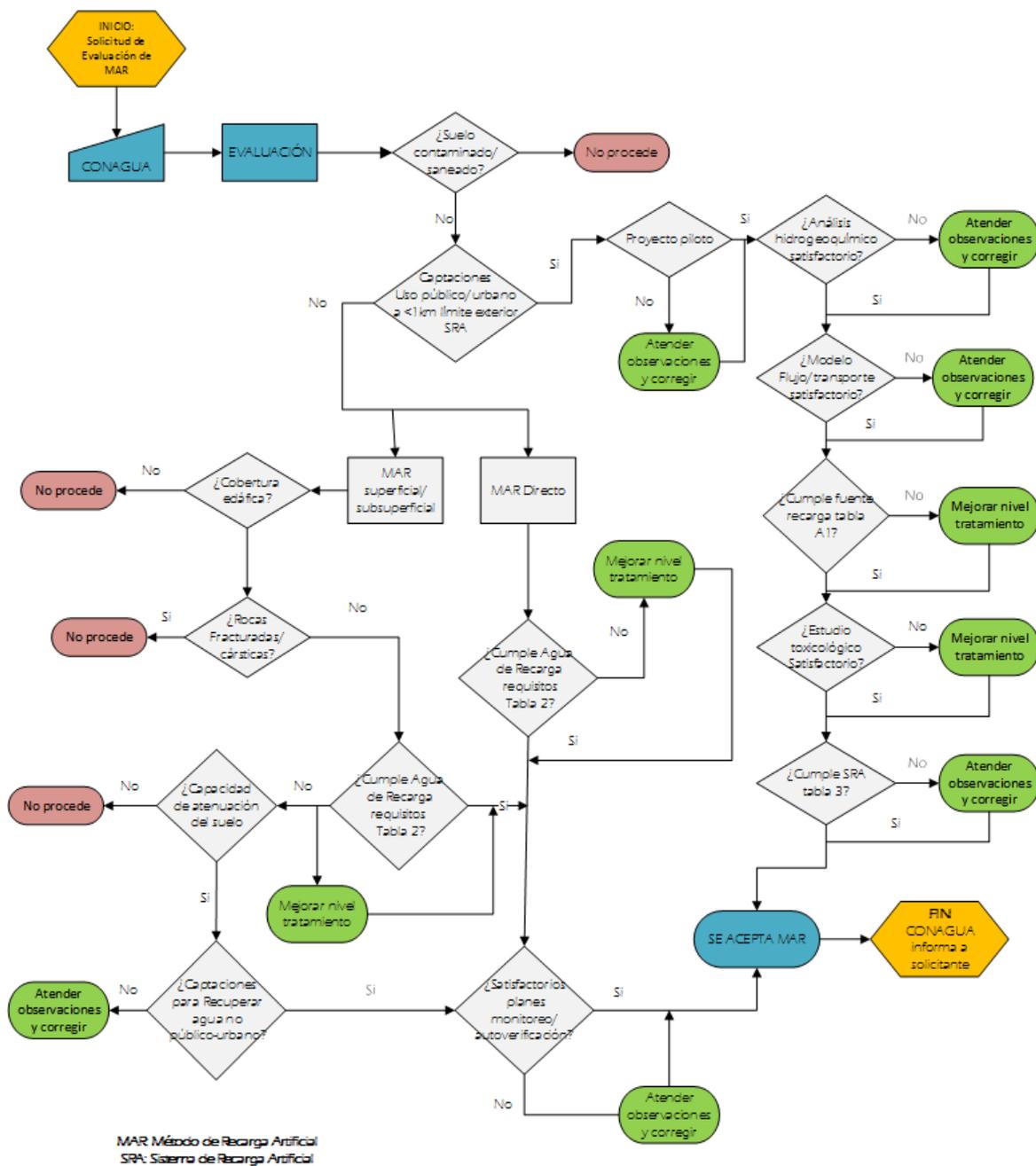


Figura 9. Diagrama de flujo de los requisitos para la recargar artificial de acuíferos con agua residual tratada. Fuente: (CONAGUA, 2007).

III.3. NOM-015-CONAGUA-2007 Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.

La NOM-015 tiene como objetivo promover obras que permitan desalojar las aguas pluviales y de escurrimientos 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 bienes materiales.

Esta norma establece la recarga artificial de acuíferos con agua pluvial, así como las características y especificaciones del agua. Se destacan los siguientes puntos:

- El proceso de infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa.
- Los pozos deberán contar con un dispositivo de cierre manual o automático en la entrada de los mismos.
- Se requiere mantener el área de captación libre de residuos sólidos o líquidos. Esto aplica para el caso de azoteas, tejados o techumbres.
- Las obras de disposición de aguas al subsuelo mediante pozos de infiltración, deberán contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración no rebase los límites permisibles (Tabla 7) de sólidos suspendidos, nitrógeno, material flotante, etc., con el propósito de no alterar la calidad del agua del acuífero.

Tabla 7. Límites permisibles para el punto de infiltración. Fuente: (CONAGUA, 2007).

Contaminante	Unidad de medida	Límite
Grasas y Aceites	Mg/L	15
Materia Flotante	Unidad	0
Sólidos Sedimentables	Mg/L	2
Sólidos Suspendidos Totales	Mg/L	150
Nitrógeno Total	Mg/L	40
Fósforo Total	Mg/L	20
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	No detectable

NOM-015-CONAGUA-2007. INFILTRACIÓN ARTIFICIAL DE AGUA A LOS ACUIFEROS.- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS OBRAS Y DEL AGUA

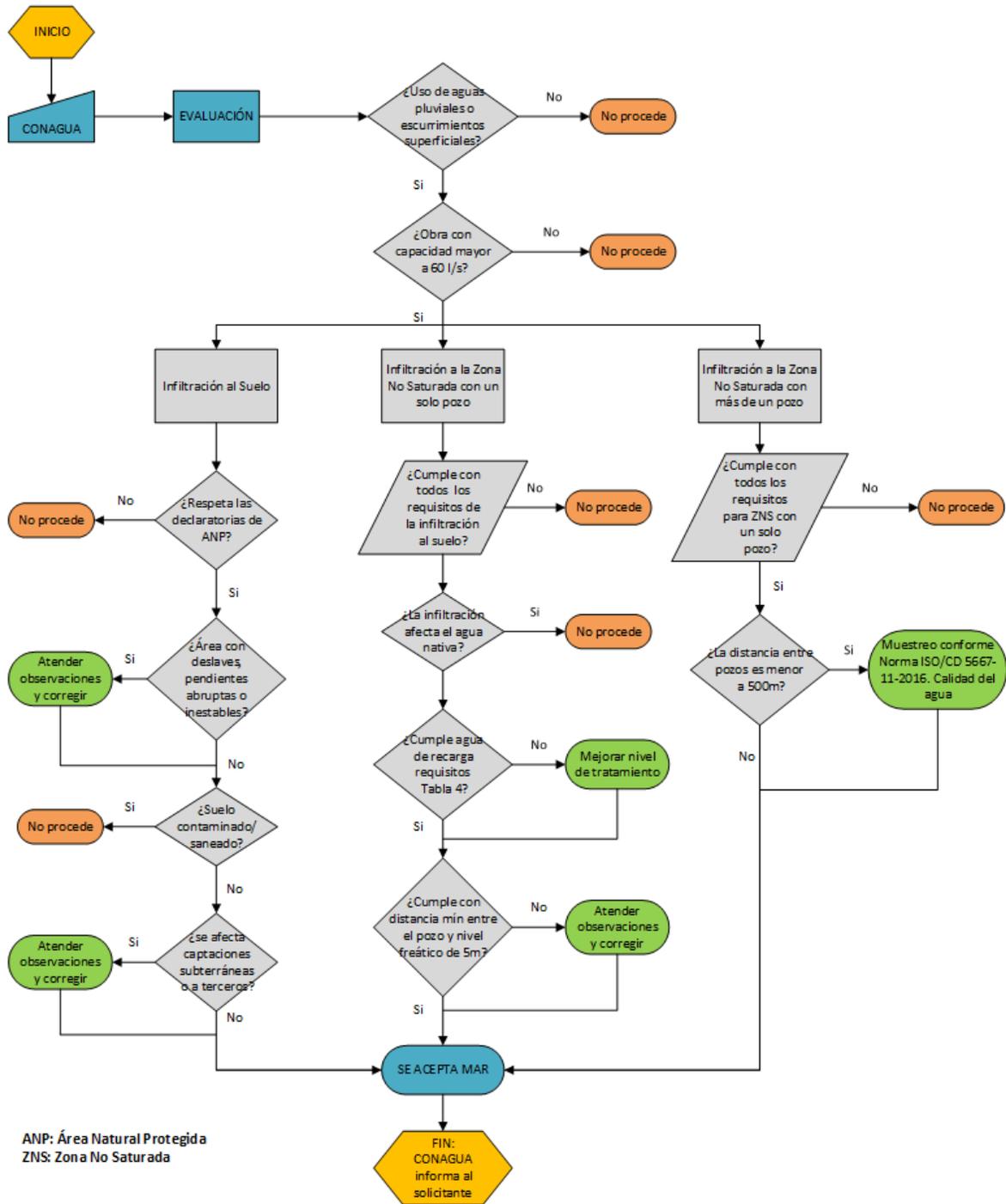


Figura 10. Diagrama de flujo de los requisitos para la infiltración artificial de agua a los acuíferos. Fuente: Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2007).

III.4. NOM-003-CONAGUA-1996 Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación.

El objetivo de esta norma es reducir el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas estableciendo los requisitos mínimos a tomar en cuenta durante la perforación y construcción de pozos de agua para ayudar a la protección de acuíferos y evitar su contaminación.

Las especificaciones que destacan de la norma para el proceso de perforación de un pozo, son las siguientes:

- Las piezas y sustancias utilizadas en la construcción de pozos deben ser de calidad comercial.
- El área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo.

Cuando no sea posible cumplir el radio mínimo especificado, el concesionario deberá presentar el diseño que propone basado en estudios hidrogeológicos para evitar la contaminación del acuífero.

- La herramienta y la tubería de perforación se debe desinfectar antes de iniciar los trabajos de perforación, removiendo grasas, aceites u otras sustancias adheridas.
- Si se utilizan fluidos a base de agua y bentonita para la perforación, éstos no deben contener sustancias que degraden la calidad del agua subterránea ni contener organismos patógenos, además, no se podrá añadir materiales que puedan reducir las propiedades hidráulicas del acuífero.

De acuerdo con la estructura del pozo, el espacio anular entre las paredes de la formación y el ademe, así como la superior del pozo, son las áreas que presentan mayor riesgo de contaminación. Por tal motivo, la NOM-003 para el proceso de construcción de un pozo, especifica los elementos con los que se debe cumplir para evitar la contaminación del acuífero. Los elementos mencionados son los siguientes:

- Ademe para protección del pozo. El extremo superior debe sobresalir por encima del nivel del terreno natural un mínimo de 0.5 m.
- Cedazo o rejilla. El material de los elementos de unión así como el cedazo o rejilla deben ser de calidad comercial y uniforme.

- Filtro granular. De ser necesario el uso del filtro granular, éste debe ser de partículas inertes redondeadas, de origen natural y no debe tener más de un 5% de material carbonatado.
- Contra ademe. Debe tener la longitud necesaria para evitar la infiltración de agua superficial o contaminada, contenida en el subsuelo, hacia el interior del pozo. Debe tener una longitud mínima de seis metros y además, debe sobresalir 0.20 m del nivel del terreno natural. El espacio anular entre el Contra ademe y la formación adyacente será rellenado por completo con una lechada de cemento normal.
- Brocal. Sirve como protección del área de emplazamiento del pozo y se tienen recomendaciones para dos tipos de casos existentes;

Para el primer caso, la forma exterior del brocal será un prisma cuadrangular, donde los lados tendrán la longitud del diámetro total superficial de la perforación, con una altura de 0.50 m a partir del nivel del terreno natural. Se deben colocar dos tubos para la colocación del filtro granular.

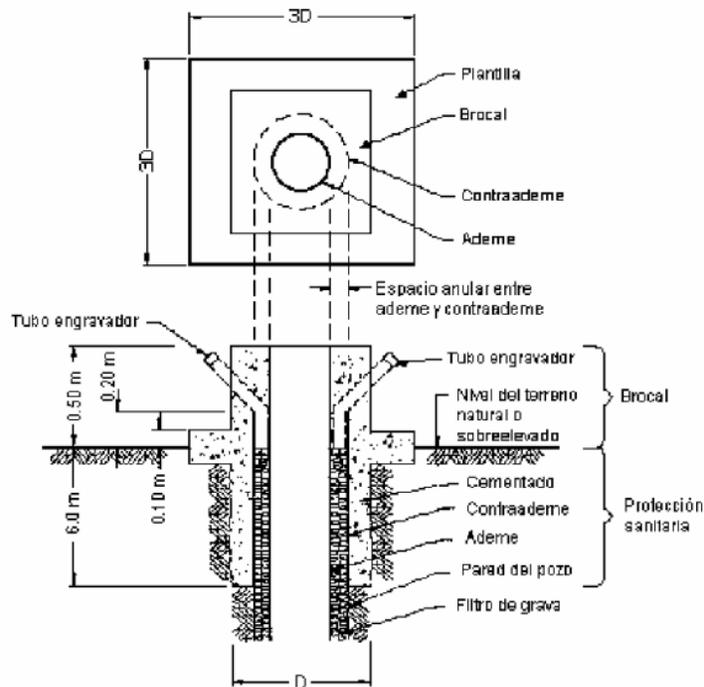


Figura 11. Brocal con ademe y contra ademe embebido en concreto. Fuente: (CONAGUA, 1996).

En el segundo caso, el Contra ademe debe tener la misma altura que el ademe, sin que sea necesario poner tubos engravadores, ya que el espacio anular sólo lleva una tapa removible.

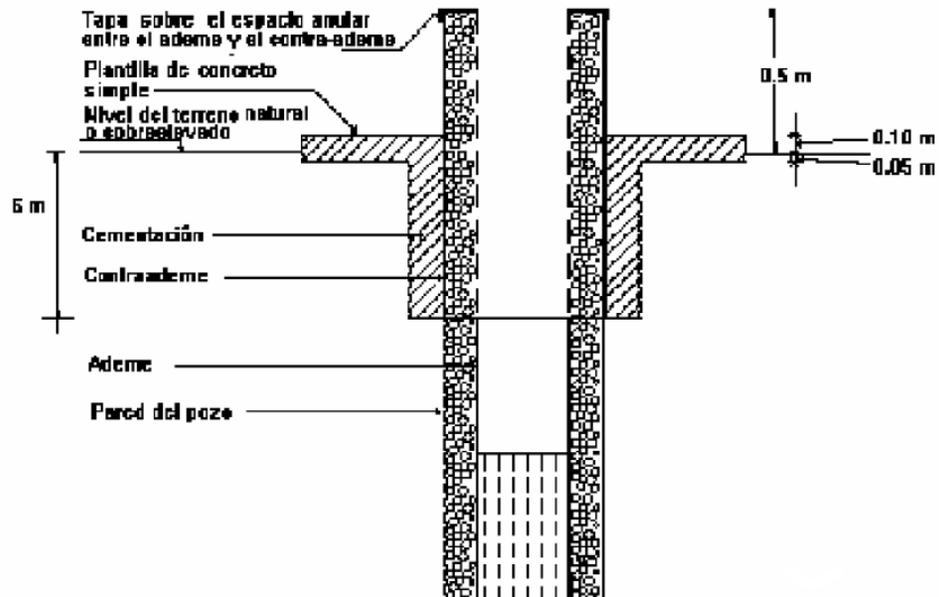


Figura 12. Brocal con tapa removible. Fuente: (CONAGUA, 1996).

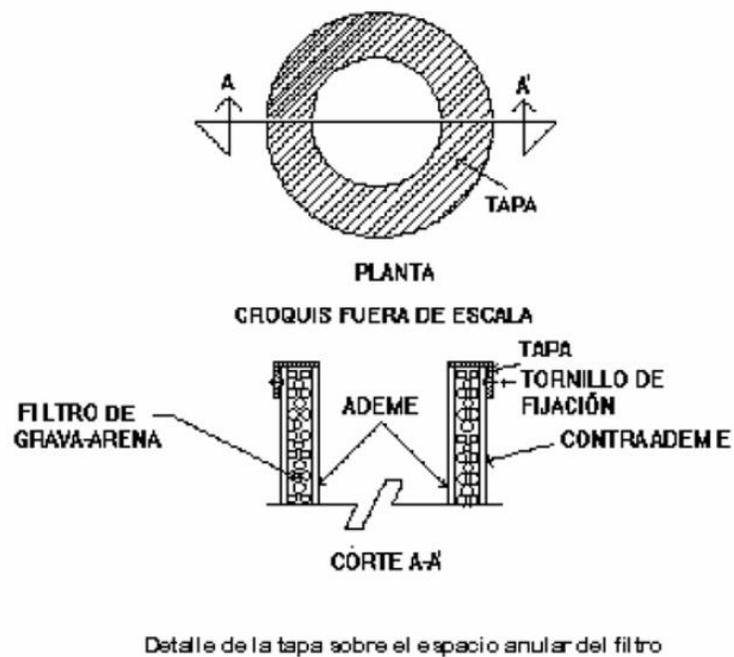


Figura 13. Detalle de la tapa sobre el espacio anular del filtro. Fuente: (CONAGUA, 1996).

En ambos casos, la plantilla y la superficie de la cementación del contra ademe, deben formar estructuralmente un solo cuerpo. Cuando el pozo esté emplazado en unidades de material consolidado, el ademe debe estar ahogado en el brocal. Cuando el pozo esté perforado en material no consolidado, debe dejar un espacio anular mínimo de 0.0006 m entre el brocal y el ademe.

- Plantilla. Según la norma, la superficie de la plantilla alrededor del pozo debe construirse con una pendiente del 2%, de tal modo que el agua que escurra se aleje del pozo en todas las direcciones. La forma exterior de la losa será cuadrada, y debe tener una longitud mínima por lado de 3 veces el diámetro total de la perforación. El espesor total de la losa será de 0.15 m, de los cuales los 0.05 m inferiores estarán por debajo del nivel del terreno natural.
- Toma lateral. Se requiere instalar un dispositivo lateral en la tubería principal de descarga para el muestreo del agua.
- Medición de niveles. Se requiere la instalación de un dispositivo que permita medir la profundidad del nivel del agua en el pozo

III.5. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

El Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) editado por la CONAGUA tiene la finalidad de servir como guía a quienes se encargan del diseño, construcción, operación, mantenimiento y administración de los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país.

Este manual está compuesto por 55 libros, para el presente trabajo se utilizará el libro 8 “Captación en pozos profundos” como complemento en el diseño del dispositivo de recarga artificial elegido.

Los procedimientos para el diseño de pozos están condicionados a las características geohidrológicas de la ubicación del aprovechamiento y las propiedades hidráulicas del acuífero, las cuales son:

- Información estratigráfica del subsuelo de la perforación.
- Valores de trasmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero.
- Condiciones de balance hidrológico.
- Análisis granulométrico de los materiales de las capas atravesadas por la perforación.

El proceso de diseñar un pozo consiste básicamente en determinar los dos elementos principales que lo componen: cámara de bombeo y sección de admisión, por lo que se deben determinar y dimensionar los siguientes parámetros:

- Profundidad del pozo

La profundidad del pozo está determinada en base a la profundidad a la que se encuentra el acuífero a recargar y el espesor de dicho acuífero, esta información se obtiene mediante estudios de geofísica con distintas técnicas como son: Sondeos eléctricos, sondeos exploratorios, etc.

- Diámetro y material de ademe

El diámetro se determina en base al tamaño de la bomba por utilizar, que a su vez está en función del gasto a inyectar, es importante mencionar que el correcto dimensionamiento del diámetro del ademe influye en el costo de la estructura del pozo y en el equipo a utilizar para realizar la perforación.

La tabla 8 nos muestra la elección de un diámetro aproximado del pozo en función del gasto propuesto para la extracción o inyección de agua a acuífero.

Tabla 8. Diámetro del ademe en función del gasto.

Gasto esperado (L/s)	Diámetro nominal de tazonos de bomba (mm)	Medida óptima del diámetro del ademe		Medida mínima del diámetro del ademe	
		(mm)	(pulg.)	(mm)	(pulg.)
Menos de 6	102	(152)	Di (6")	(127)	Di (5")
5 a 11	127	(203)	Di (8")	(152)	Di (6")
10 a 22	152	(254)	Di (10")	(203)	Di (8")
20 a 44	203	(305)	Di (12")	(254)	Di (10")
30 a 60	254	(356)	DE (14")	(305)	DE (12")
50 a 115	305	(406)	DE (16")	(356)	DE (14")
75 a 190	356	(508)	DE (20")	(406)	DE (16")
125 a 240	406	(610)	DE (24")	(508)	DE (20")
190 a 380	508	(782)	DE (30")	(610)	DE (24")

Di= Diámetro interno DE= Diámetro externo

El ademe es muy importante en el diseño de un pozo, ya que se encarga de mantener estable la estructura del pozo, evitando que las paredes de la perforación se

derrumben o colapsen. Es por esto que la elección del material y espesor del ademe, está en función del tipo de suelo de cada estrato atravesado en la perforación y de la composición química del agua nativa del acuífero a intervenir.

Básicamente se utilizan tres tipos de materiales en la construcción de ademes: Fluoropolímeros, materiales metálicos y materiales termoplásticos.

- Diámetro, material y apertura del cedazo

El cedazo o rejilla es la sección de admisión o parte inferior de la estructura del pozo por donde el agua del acuífero entra hacia el tubo de ademe.

La apertura del cedazo debe tener la forma y tamaño necesarios para que impidan que el material fino, entre el pozo y al mismo tiempo facilite el flujo del agua hacia el interior o exterior del pozo. La granulometría de los materiales que forman el acuífero, determina el tamaño de la apertura del cedazo, por lo tanto se requiere contar con un análisis granulométrico previo.

Si el diseño del pozo contempla el uso de filtros, las aperturas de la rejilla deben retener entre 85 y 100 por ciento del material fino del filtro granular.

La longitud y la ubicación de la sección de admisión de un pozo se eligen en base a la transmisividad y la conductividad de los estratos que forman el acuífero en estudio.

Dentro del mercado nacional existe gran variedad de cedazos con diferentes diámetros de apertura y tipos de ranuras, en la siguiente figura (Fig. 14) se muestran algunos ejemplos.

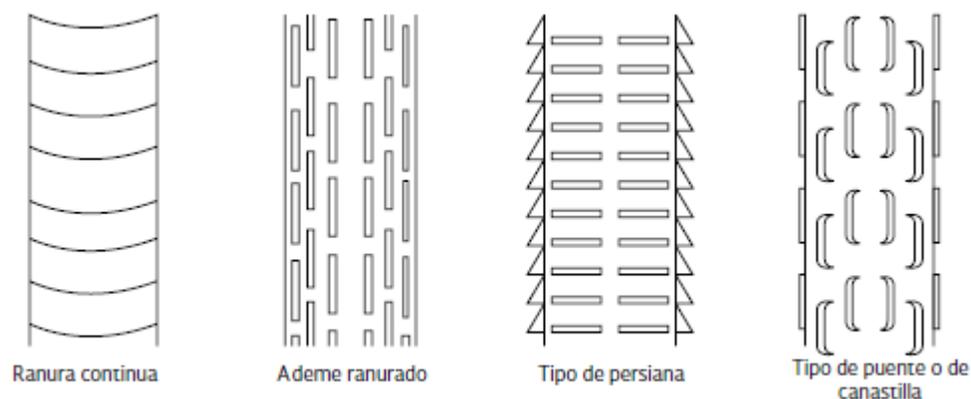


Figura 14. Tipos de ademes ranurados. Fuente: (CONAGUA ; SEMARNAT, 2016).

- Tipo de filtro

Colocar un filtro tiene como objetivo impedir que partículas logren entrar en el cedazo y con el tiempo se presente una colmatación de cualquiera de los cuatro tipos que se mencionaron en el capítulo anterior, además se tiene una mayor eficiencia hidráulica del pozo y una buena estabilización de las paredes del pozo.

El tamaño de los granos que se emplearán en el filtro, se eligen al igual que la apertura del cedazo, de acuerdo a la granulometría de los materiales de los estratos que forman el acuífero.

El MAPAS indica dos formas de determinar el espesor del filtro, la primera forma menciona que el espesor será 3 o 4 veces el tamaño del grano utilizado para el filtro y la segunda recomienda espesores de entre 8cm y 20cm.

Los materiales utilizados en los filtros deben ser resistentes a las alteraciones químicas de las aguas subterráneas, por lo regular se utilizan granos de cuarzo y en porcentajes menores materiales no silíceos, lo anterior con la finalidad de no afectar la calidad del agua nativa del acuífero.

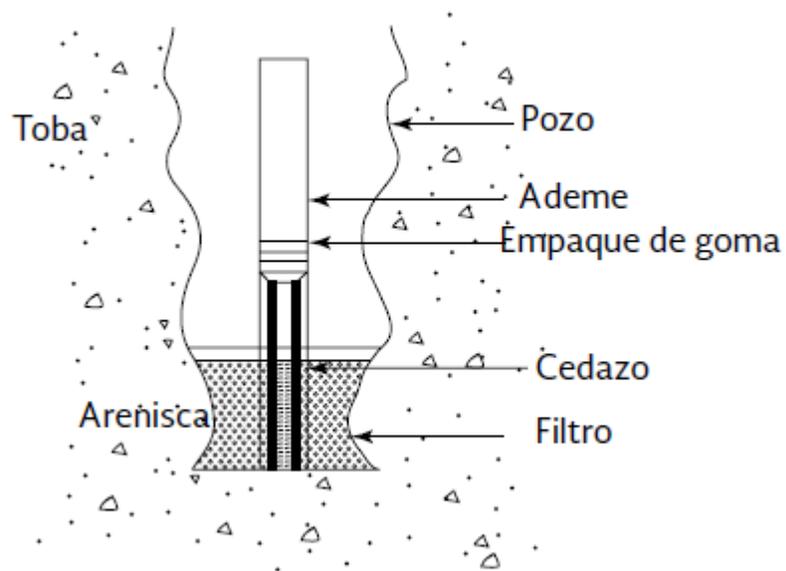


Figura 15. Diseño de filtro de grava. Fuente: (CONAGUA ; SEMARNAT;, 2016)

- **Protección sanitaria**

La protección sanitaria tiene como objetivo evitar que se introduzcan contaminantes en el pozo y puedan alterar la calidad del agua del acuífero. El manual menciona algunas sugerencias relacionadas con el terminado de los pozos para evitar que los contaminantes entren, 1) el ademe del pozo debe sobresalir por los menos 60 cm del nivel del terreno natural, esto es para evitar la entra de contaminantes al interior del pozo, 2) se debe colocar una tapa cuadrada de concreto con espesor mayor a 10 cm y al menos 60 cm por lado, con pendiente hacia los lados. Esto funcionará como un sello para evitar que se encharque el agua de lluvia y se introduzca en el pozo.

Por otro lado se debe colocar una cementación, con la finalidad de dar rigidez a la cámara de bombeo, para realizar la cementación del ademe y contra ademe, se debe ampliar la perforación a un diámetro (de 4 a 6" mayo que el contra ademe). La profundidad dependerá de los tipos de estratos ya que esta estructura sirve como barrera contra la infiltración de contaminantes en el pozo y en el acuífero.

Debido a que el método de recarga artificial seleccionado en este trabajo, para recargar el acuífero Texcoco se trata de un pozo de inyección, este debe cumplir con las normas y lineamientos descritos en este capítulo al momento de elegir el sitio de ejecución dentro de la Zona Federal del Ex lago de Texcoco, la fuente de agua de recarga y el pre diseño de la estructura del pozo de inyección, todo esto con la finalidad de lograr una gestión de la recarga, conservar la calidad del agua del acuífero y garantizar el uso sustentable del agua.

CAPÍTULO IV. MARCO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO TEXCOCO

IV.1. Descripción Regional

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, a partir del año 1997 con el fin de preservar y administrar las aguas nacionales, dividió al país en trece Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como unidad básica para la gestión de los recursos hídricos.

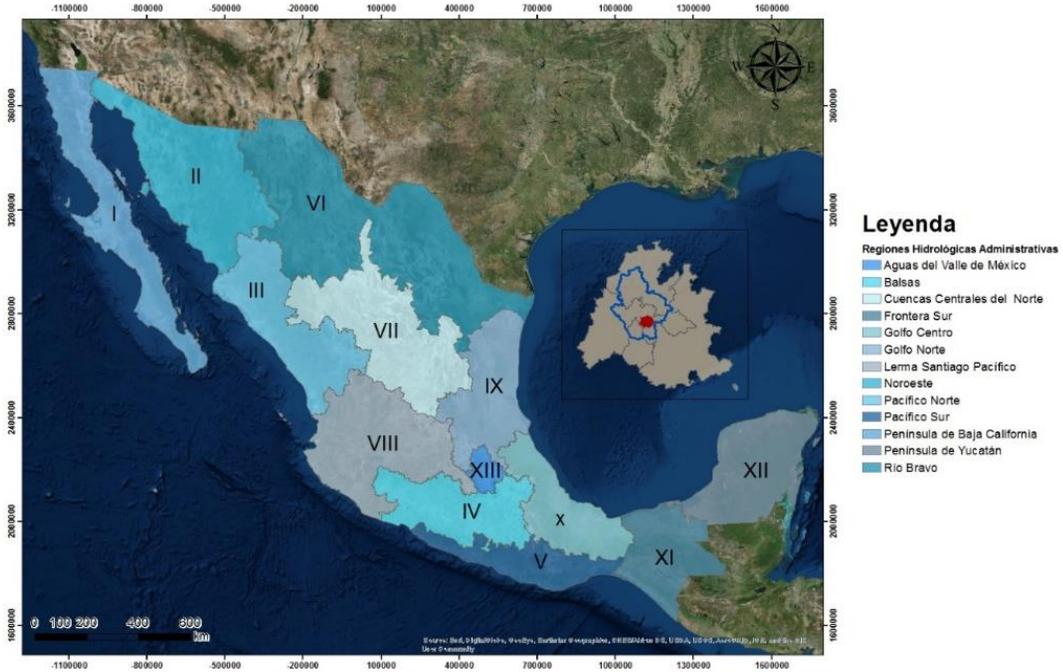


Figura 16. Distribución de las Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM, 2018.

El presente trabajo se ubica en la RHA XIII que corresponde a las Aguas del Valle de México, la cual, se ubica en la cuenca alta del río Panuco (Figura 16) y está conformada por 121 municipios: 39 en el estado de Hidalgo, 62 en el Estado de México, cuatro en Tlaxcala y las 16 delegaciones de la Ciudad de México. Cuenta con una superficie de 18,229 km², una población de 23 millones de habitantes (21.5 millones de habitantes en la subregión Valle de México y 1.5 millones en la subregión Tula) y una cantidad de agua renovable de 3,442 millones de m³ al año, dando como resultado una disponibilidad de 148 m³ por habitante al año (OCAVM, 2013).



Figura 17. Ubicación de la región XIII, Aguas del Valle de México. Fuente: OCAVM, 2013

Para fines prácticos de planeación y administración del agua subterránea, la RHA XIII Aguas del Valle de México está dividida en dos subregiones hidrológicas: Valle de México y Tula.

En el presente trabajo se acotará la información a la subregión del Valle de México, la cual contiene siete unidades hidrogeológicas o acuíferos, de los cuales actualmente cuatro se encuentran en condiciones de sobreexplotación, entre ellos el acuífero Texcoco (CONAGUA, 2017).

Tabla 9. Situación de disponibilidad de agua de los acuíferos de la RHA XIII. Subregión Valle de México (Mm³/año).

Unidad Hidrogeológica (Acuífero)	Recarga	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado de agua subterránea	Disponibilidad media de agua subterránea	Déficit
Subregión Valle de México					
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	512.8	0.0	1 103.98	0.0	-591.18
Tecocomulco	27.8	0.5	1.30	25.97	0.0
Apan	30.3	0.0	19.37	10.93	0.0
Chalco-Amecameca	79.3	3.3	97.63	0.0	-21.63
Texcoco	145.1	10.4	246.48	0.0	-111.78
Cuautitlán-Pachuca	356.7	0.0	415.07	0.0	-58.37
Soltepec	92.8	42.0	16.28	34.52	0.0
Total subregión	1 244.8	56.2	1 900.11	71.42	-782.96

Fuente: Elaboración propia con base en las publicaciones del DOF del año 2017.

La extracción de los acuíferos Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Cuautitlán-Pachuca, Chalco-Amecameca y Texcoco han alcanzado niveles de casi el doble del volumen que actualmente se recarga, el déficit que presentan estos acuíferos se debe a que el agua subterránea suministra aproximadamente el 69% de la demanda regional para todos los usos (PRH, 2012).

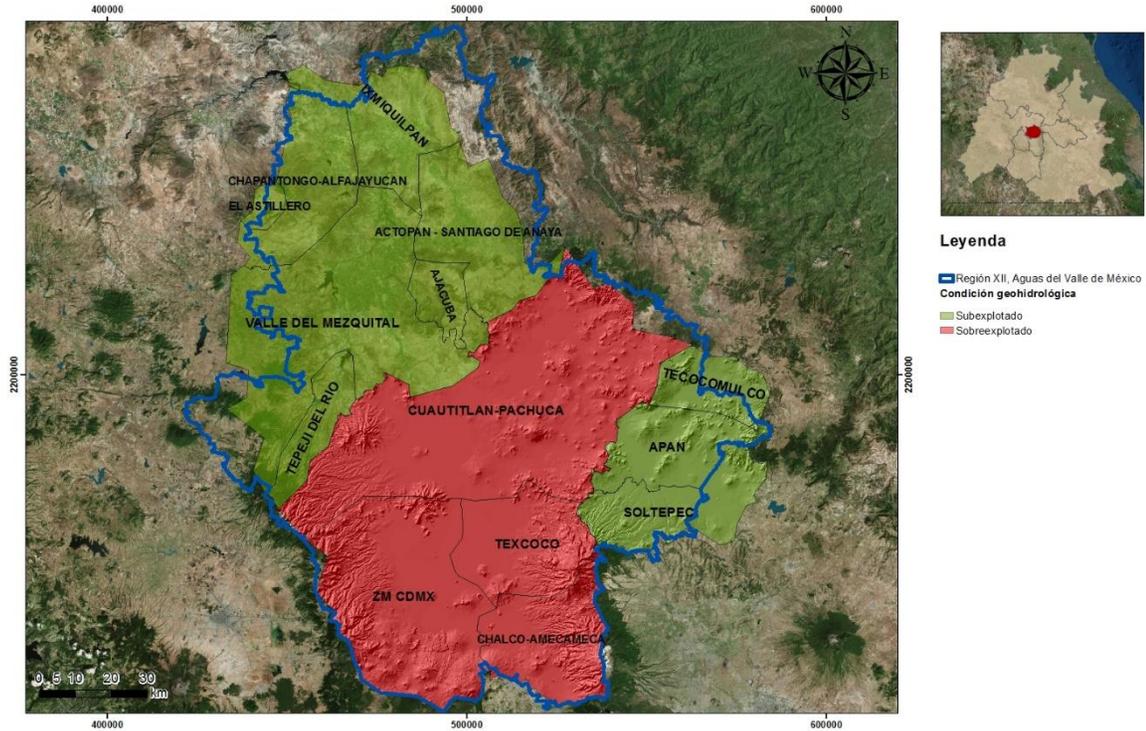


Figura 18. Condición geohidrológica de los acuíferos de la RHA XIII. Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM, 2018.

IV.2. Descripción del acuífero Texcoco

IV.2.1. Localización del acuífero

El acuífero Texcoco es el principal recurso de agua de 12 municipio en la parte oriente del Valle de México, con una población cercana a un millón y medio de habitantes. Se localiza en la porción centro-oriente del Estado de México, geográficamente está delimitado por los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste y abarca una superficie de 934 km² (Figura 19).

Limita al norte con el acuífero Cuatitlán-Pachuca, al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, pertenecientes al Estado de México, al este con el acuífero Soltepec, perteneciente al estado de Tlaxcala y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, perteneciente a la Ciudad de México.

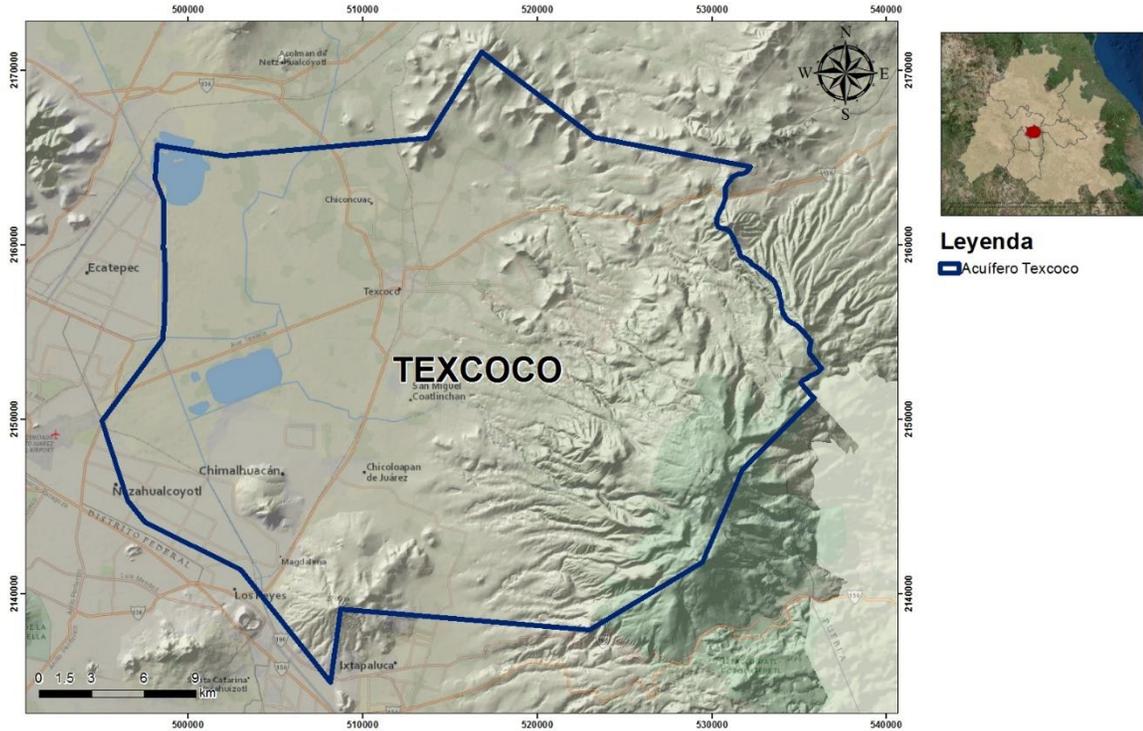


Figura 19. Localización del acuífero Texcoco.

Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM, 2018.

IV.2.2. Geología

El Eje Volcánico Mexicano (EVM) está situado sobre la margen meridional de la Placa Norteamericana, presenta variaciones en su forma volcánica y en su composición química (Deman, 1982; Mendoza, 2012).

El eje se divide en tres sectores: oriental, central y occidental (Figura 6). La Cuenca de México se sitúa en el sector oriental de EVM, la cual ha sido expuesta a distintos eventos tectónicos y volcánicos ocurridos principalmente a principios del terciario hasta nuestros días.

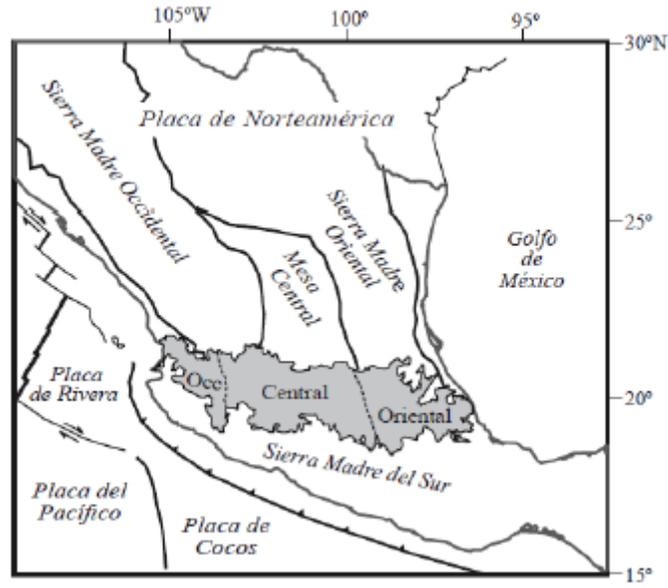


Figura 20. Ubicación del Eje Volcánico Mexicano.

Fuente: Mooser F. y Ramírez M. T., 1987

La cuenca está definida por un paquete sedimentario (depósitos lacustres, aluviones cenizas, arenas y gravas) dentro de un contenedor de material ígneo (basaltos, riolitas y dacitas), (Rodríguez y Ochoa, 1989).

La geología del acuífero está ligada al desarrollo y evolución de la Cuenca de México, de la cual forma parte y data desde el Eoceno al Cuaternario; los eventos volcánicos del tipo calco-alcalino, donde predominan las lavas andesíticas y basálticas, son características de las Sierras de las Cruces, Nevada y Chichinautzin.

Existen afloramientos de toba, brecha y complejos volcánicos del Mioceno, en las porciones de la base de la Sierra de Guadalupe, cuya composición varía de andesita a dacita. Durante el final del Mioceno se inició la formación de las denominadas sierras mayores: Sierra de Río Frío y Sierra Nevada (Mendoza, 2012; CONAGUA, 2015).

Durante el Plioceno Tardío y Cuaternario se presentó una serie de procesos estructurales que dieron origen a la formación de amplias fosas tectónicas definidas como; Tláloc-Apan y Cuauhtepic, situadas en la Sierra de Guadalupe.

Las grandes depresiones formadas están limitadas por fracturamiento y fallas que fueron rellenadas por material clástico, al oriente, hacía el antiguo Lago de Texcoco, donde existen depósitos aluviales de granulometría gruesa cerca de las sierras y que disminuye a medida que se acerca hacía la zona limítrofe del vaso lacustre, los cuales están

constituidos por depósitos clásticos plio-cuaternarios subyacios por material aluvial y lahares re trabajados.

La obstrucción del drenaje de la Cuenca de México dio origen a los depósitos lacustres causados por la intensa actividad volcánica que edifico la Sierra Chichinautzin.

Para el Cuaternario continúa el vulcanismo principalmente de composición andesítico-basáltico, reconocido en los cerros Chimalhuacán, Gordo y El Pino y las erupciones basálticas y andesíticas entre Tizatuca y Apan. Las sierras mayores con grandes volcanes, como los de la Sierra Nevada, alcanzaron su máximo desarrollo, formándose extensos abanicos volcánicos (CONAGUA, 2015).

Estratigrafía

Con base en la información obtenida de cortes litológicos de pozos y sondeos geofísicos, se establece que la estratigrafía de la región correspondiente al acuífero está conformado en la zona más somera por una capa de arcillas cuyo espesor promedio es de 50m, subyacios por un paquete de sedimentos aluviales, formado por arcillas, gravas areniscas, conglomerados de origen volcánico y rocas volcánicas, principalmente se trata de tobas, cuyo espesor alcanza los 1500m de profundidad.

El acuífero está constituido en su porción superior por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, el cual forma un acuitardo de espesor variable que actúa como confinante o semiconfinante en el centro de la cuenca. Bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado principalmente por material granular más grueso que el acuitardo, depósitos vulcanoclásticos y conglomerados de origen volcánico, también de espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 200m. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base se localizada hasta 2,000 m en el centro del valle, disminuyendo hacia los márgenes de la cuenca (CONAGUA, 2018).

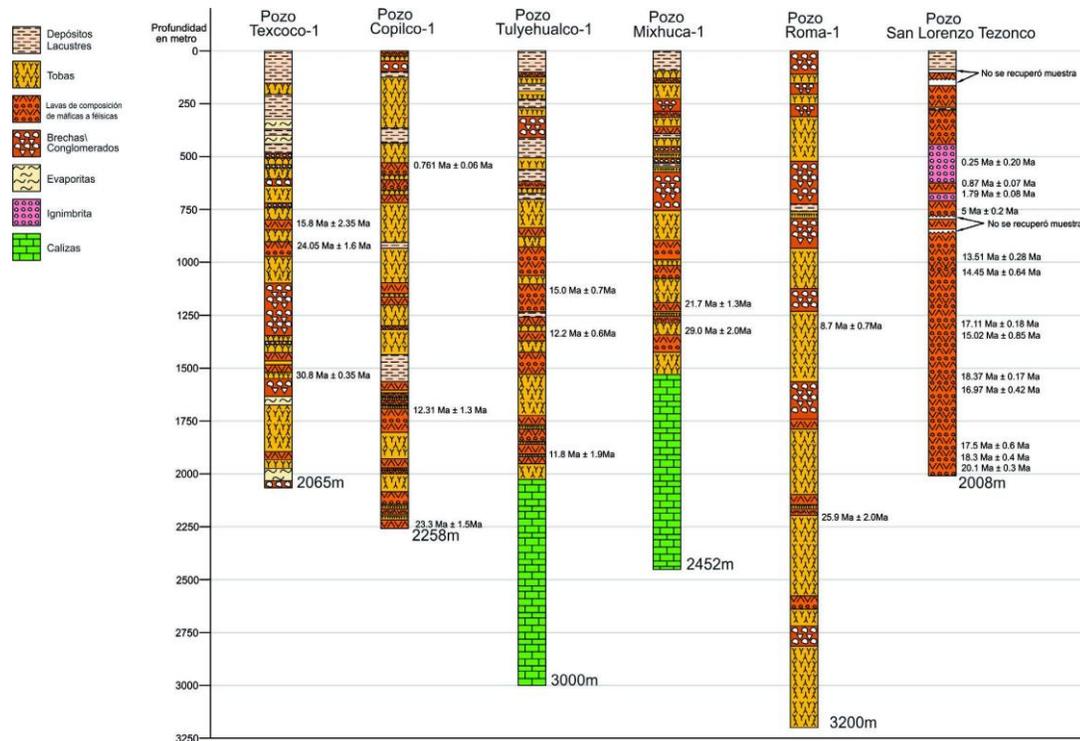


Figura 21. Cortes litológicos de pozos ubicados en el Valle de México. Fuente: (González Torres, Morán Zenteno, Mori, & Martiny, 2015)

IV.2.3. Hidrogeología

Clasificación de los acuíferos

A partir de su geología y con base en sus parámetros hidráulicos podemos clasificar a los acuíferos o unidades hidrogeológicas en función de su capacidad de almacenar y transmitir agua. De esta forma podemos hablar de:

- Acuífero: Es aquella formación geológica que contiene agua en gran cantidad y que permite que circule a través de ella con facilidad.
- Acuitardo: Es aquella formación geológica semipermeable que contiene agua en gran cantidad y que circula a través de ella con dificultad.
- Acuicludo: Es aquella formación geológica que contiene agua en gran cantidad y que no permite que el agua circule a través de ella.
- Acuífugo: Es aquella formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella.

Posteriormente podemos clasificar a los acuíferos de acuerdo a la presión hidrostática a la que se encuentran:

- a) Libre: Es aquella formación geológica que su límite superior o superficie freática se encuentra a presión atmosférica.
- b) Semiconfinado: Es aquella formación geológica que una de sus capas o estratos confinantes es semipermeable, es decir un acuitardo, por lo tanto la presión del agua se aproxima a la atmosférica.
- c) Confinado: Es aquella formación geológica que se encuentra confinada entre dos capas o estratos impermeables, estos pueden ser acuífugos o acuícludos, por lo tanto el agua se encuentra a una presión superior a la atmosférica.

Unidades hidrogeológicas y parámetros hidráulicos

El acuífero Texcoco es un sistema complejo formado por cuatro grandes cuerpos o unidades hidrogeológicas con la siguiente secuencia:

- Acuitardo Superior

En la parte superior se presenta un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y con una constitución heterogénea, lo cual forma un acuitardo de espesor variable de hasta 100m, que actúa como confinante y en la parte central de la cuenca como semiconfinante.

La conductividad hidráulica horizontal (K_h) varía entre 1×10^{-6} y 1×10^{-10} m/s en el material fino y valores mayores a 1×10^{-5} m/s en los horizontes limo-arenosos (CONAGUA, 2018).

El contenido de agua que presentan las arcillas que forman esta unidad es superior al 400%, cuentan con una porosidad de 0.8 a 0.9 y una relación de vacíos de 6 a 11 (CONAGUA, 2018).

- Acuífero Superior

Debajo de este paquete se encuentra el acuífero confinado actualmente en explotación, formado por aluvión, toba, roca basáltica, arcillas volcánicas, depósitos aluviales, piroclastos y conglomerados de origen volcánico con un espesor promedio de 200m. Se trata de un acuífero libre en la región montañosa y confinado en la planicie.

De acuerdo con pruebas de bombeo, el valor de K_h para esta unidad varía entre 1.5×10^{-4} y 3×10^{-4} m/s y una conductividad hidráulica vertical (K_v) de 1.1×10^{-6} m/s y un coeficiente de almacenamiento (S) de 1×10^{-3} en zona de rocas sanas y

en la zona de rocas fisuradas de valor de K_h es de 1.1×10^{-3} y S de 4×10^{-4} (CONAGUA, 2018).

Los valores de transmisividad se obtuvieron mediante la interpretación de métodos analíticos convencionales y con el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (1991), dando valores entre 2.2×10^{-4} a $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

- Acuitardo Inferior

Por último, al acuífero le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a una profundidad promedio de 1500m en el centro, disminuyendo hacia los extremos de la cuenca (Escobar et al, 2011).

- Acuífero Inferior

Debajo del acuitardo se tiene indicios de la existencia de un acuífero inferior según las pruebas obtenidas de los pozos profundos perforados en la cuenca. Esta unidad está constituida por roca volcánica de tipo andesítico y dacítico del Terciario Medio y Superior.

En la actualidad no se cuentan con parámetros hidráulicos para el acuitardo y acuífero inferior debido a que no se han realizado estudios a detalle de estas unidades hidrogeológicas.

IV.2.4. Piezometría y Comportamiento hidráulico

Para el análisis del comportamiento de los niveles de agua subterránea del acuífero Texcoco y para fines del balance de aguas subterráneas, se utilizó la información del periodo 2005-2017.

Profundidad al nivel estático

Los valores presentados para el nivel estático corresponden al año 2017 y varían de 20 a 130m de profundidad. Los valores más someros se pueden encontrar en la zona del lago Nabor Carrillo, a partir de ahí, se incrementan gradualmente hacia el norte y este, donde se encuentran la sierra Quetzaltepec y el volcán Tláloc que delimitan el acuífero, zona donde se encuentran los valores más profundos.

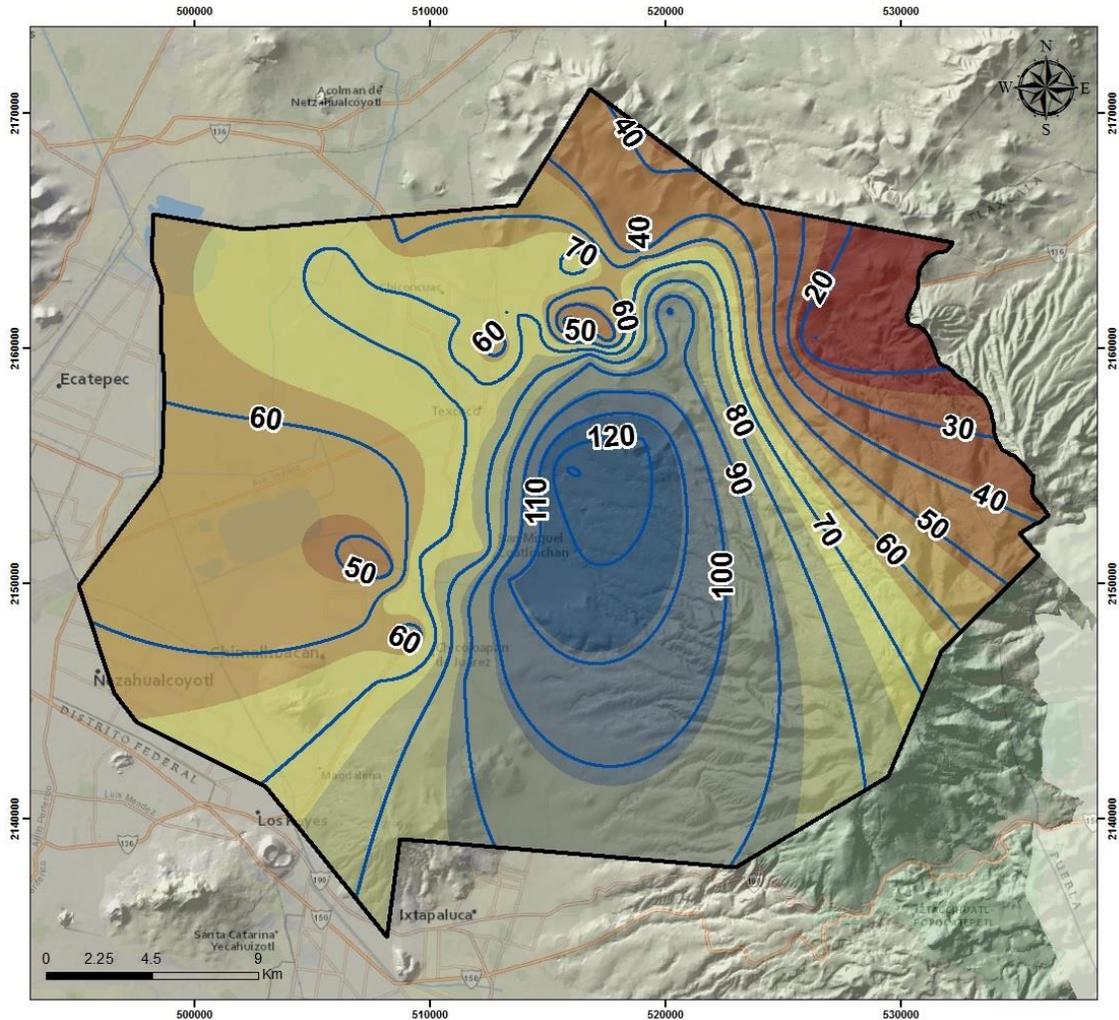


Figura 22. Profundidad del nivel estático [m], 2017. Fuente: Elaboración propia.

Elevación del nivel estático

Los valores del nivel estático para el año 2017 varían de 2330 a 2140 msnm (Figura 23). Las mayores elevaciones rondan de los 2200 a 2330 msnm y se presentan en la zona noreste del acuífero, desde donde desciende gradualmente por efecto topográfico hacia el valle. Las menores elevaciones que van de 2140 a 2190 msnm, se registran en toda la porción oriente del acuífero, en la zona que circunda el Lago Nabor Carrillo, la planta de tratamiento “El Caracol” y Texcoco. Al sur del acuífero, en las inmediaciones del volcán Chimalhuacán, la elevación del nivel estático varía de 2180 a 2190 msnm, en torno al Cerro El Pino, hacia el acuífero vecino Chalco-Amecameca. Las principales zonas de recarga se ubican en las sierras Guadalupe y Quetzaltepec, ubicadas en los extremos norte y este, respectivamente.

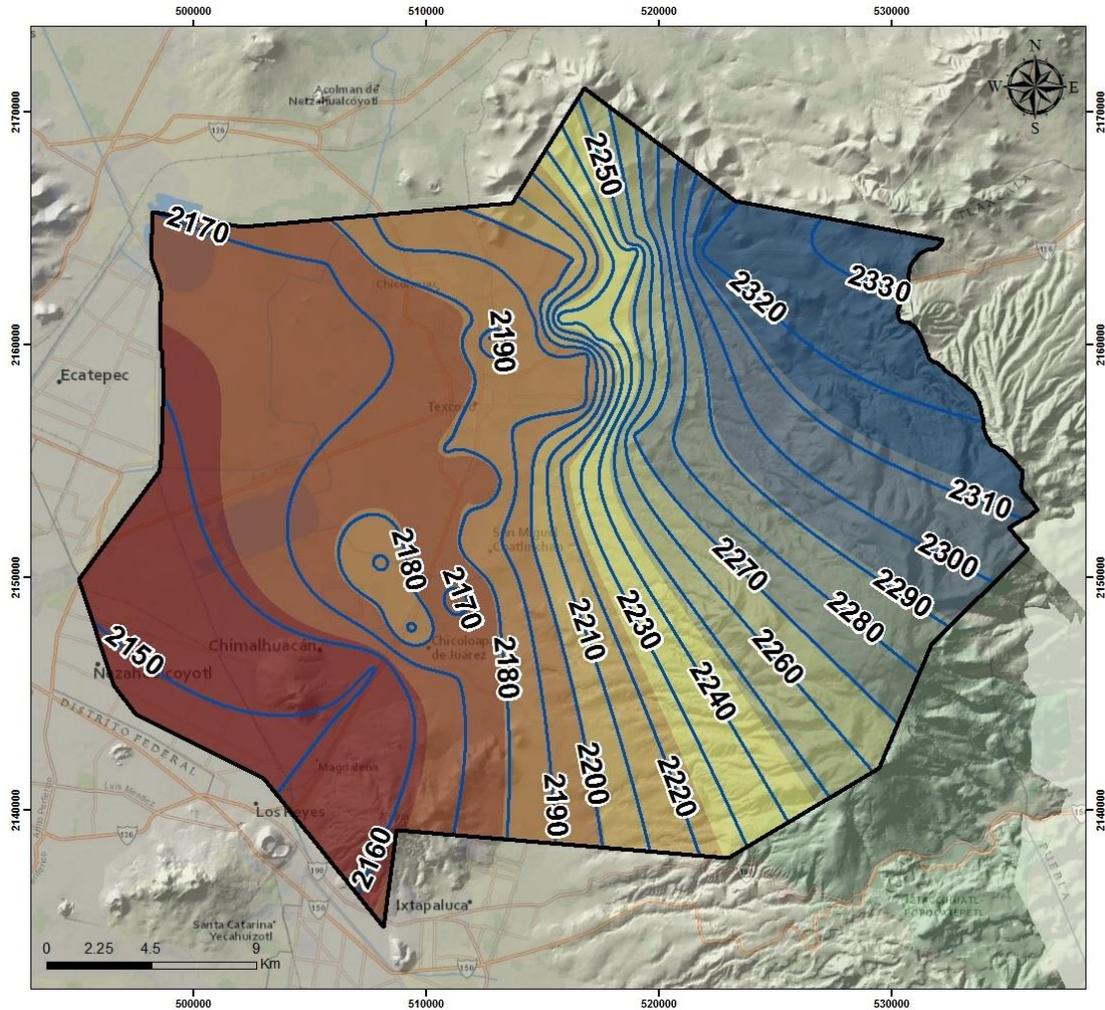


Figura 23. Elevación del nivel estático (msnm), 2017. Fuente: Elaboración propia.

Evolución del nivel estático

En la evolución del nivel estático para el periodo 2005-2017, observa que se registran valores de abatimiento que varía de 1 a 20m, lo que representa un ritmo anual de 0.08 a 1.7m. La zona sur del acuífero es la que muestra mayores abatimientos, específicamente en las inmediaciones de la comunidad Santiago Cuautlalpan, donde se aprecian abatimientos que superan los 15m, mientras que en la zona de San Vicente Chicoloapan, se registran valores puntuales que superan los 15 m. los menores abatimientos se registran en la zona norte del acuífero entre Tepetlaoxtoc y San Jerónimo Amanalco. La porción central del acuífero, desde los poblados de San Luis Huexotla y San Diego hasta San Salvador Atenco y Chinconcuac, se presentan abatimientos que varían de 4 a 10 m con ritmo anual de 0.3 a 0.8 m (Figura 24).

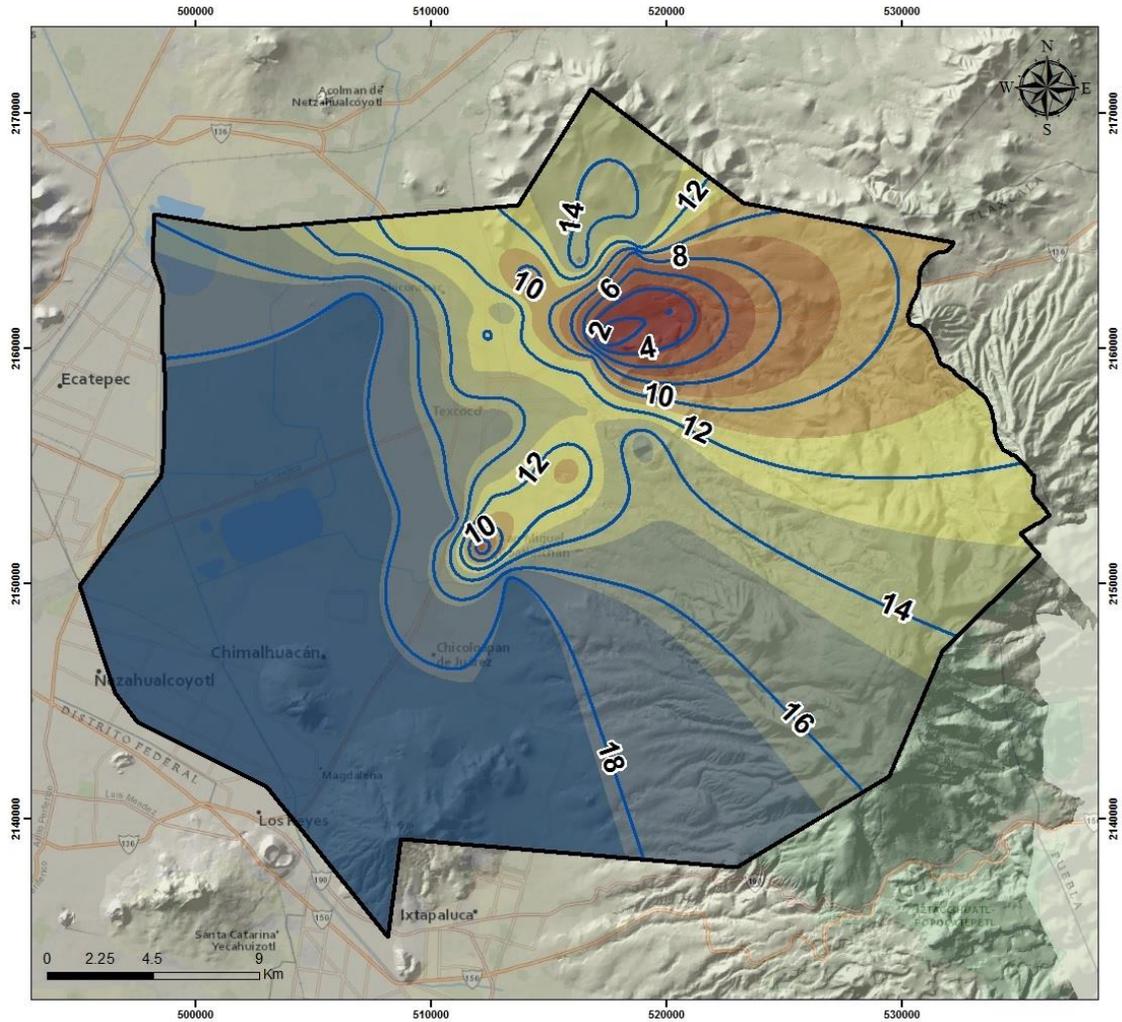


Figura 24. Evolución del nivel estático (m), 2005-2017. Fuente: Elaboración propia.

IV.3. Censo de Aprovechamientos

Dentro del acuífero Texcoco se tienen registrados para el año 2007 un total de 1009 aprovechamientos, de los cuales 552 son activos y el resto se encuentran inactivos. De los aprovechamientos activos se tienen clasificados por usos con la siguiente clasificación; 256 son de uso agrícola, 193 de uso público-urbano, 49 para usos múltiples y servicios, 30 para actividades pecuarias y 24 para uso industrial (CONAGUA, 2018).

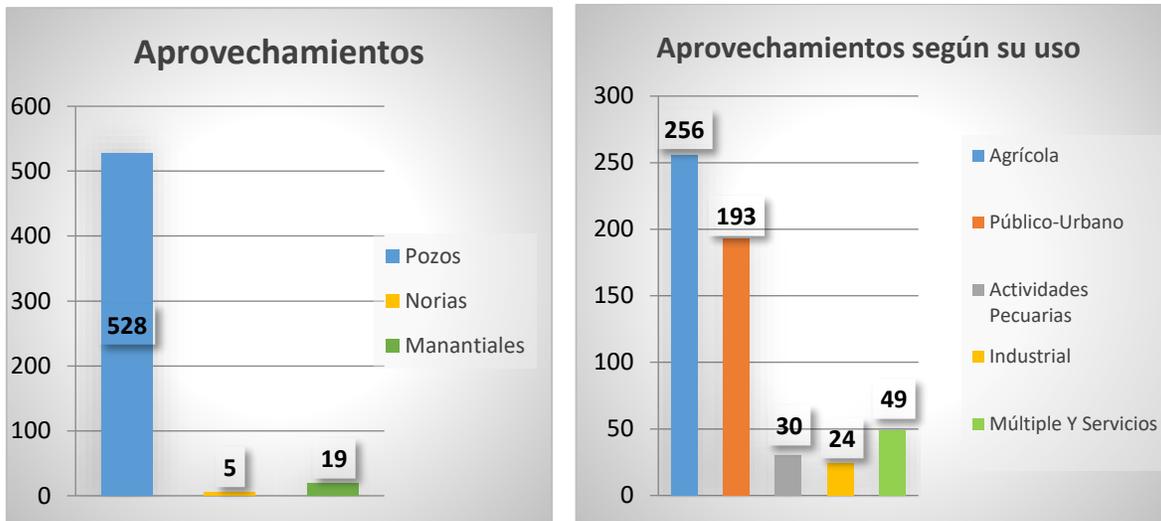


Figura 25. Aprovechamientos de agua dentro del acuífero Texcoco.

Fuente: Elaboración propia.

IV.4. Balance de aguas subterráneas

El balance de agua subterránea presentado en este apartado se calculó para el período 2006-2011, en una superficie de 700 km², correspondiente a la zona del acuífero en la cual se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

Definimos el balance de agua subterránea como la diferencia entre la suma total de entradas y la suma total de las salidas y representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en un periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de conservación de masa, es la siguiente:

$$Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa$$

Aplicada la ecuación anterior al estudio del acuífero, sustituyendo las entradas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero, tenemos la siguiente ecuación:

$$Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento$$

IV.4.1. Cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento (ΔVS) se define como el incremento o decremento del volumen de agua almacenada en el acuífero en un intervalo de tiempo cualquiera.

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 2005-2011 (figura 22). Considerando un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.05 y un rendimiento específico S_y variable de 0.10 a 0.15, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 700 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

H = Valor de la variación piezométrica en el período (m)

En la tabla # se puede observar el detalle de la estimación del cambio de almacenamiento, cuyo valor medio anual es de -48.4 hm³. Por lo tanto, $\Delta VS = -48.4 \text{ hm}^3$ anuales.

Tabla 10. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2011).

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	ΔVS (hm ³ /año)
-5	-5	10.0	0.15	-7.5
-10	-10	9.0	0.1	-9.0
-8 a -10	-9	85.0	0.1	-76.5
-5 a -8	-6.5	99.0	0.1	-64.4
-3 a -5 (volcánico)	-4.0	35.0	0.15	-21.0
-3 a -5 (lacustre)	-4.0	318.0	0.05	-63.6
0	0	144.0	0.15	0.0
Área de balance		700.0	TOTAL	-242.0
		Promedio anual		-48.4

IV.4.2. Salidas

La descarga total del acuífero ocurre principalmente de dos formas, la extracción por bombeo (B) y de manera natural a través de la descarga de los manantiales (Dm). Se consideran inexistentes las salidas subterráneas (Sh), descarga por flujo base (Dfb) ni por evapotranspiración (ETR) para el cálculo de las salidas en este acuífero

Bombeo

Desafortunadamente el censo del Registro Público de Derechos de Agua, (REPDA) más actual, data del año 2006, en el cual se registraron 528 pozos activos, los cuales, en conjunto extraen un volumen total de **183.1 hm³ anuales**, distribuidos de la siguiente manera según su uso público-urbano, 48.6 hm³ (26.6%) para uso agrícola, 3.7 hm³ (2%) para uso industrial, 1.6 hm³ (0.9%) para uso múltiple y servicios y 0.8 hm³ (0.4%) para uso pecuario.

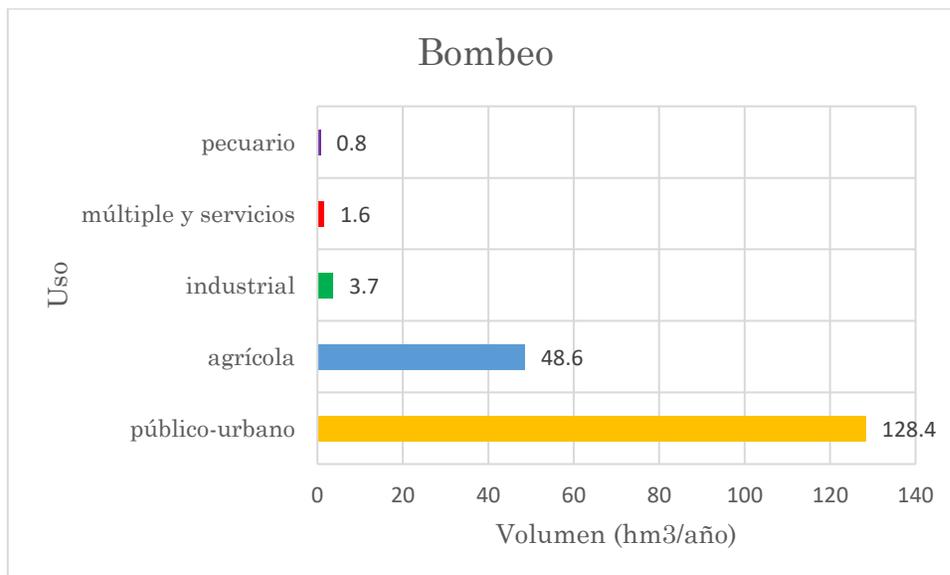


Figura 26. Volumen de bombeo según su uso. Fuente: Elaboración propia.

Descargas a través de manantiales

Como parte de los aprovechamientos activos del acuífero Texcoco se tienen registrados 19 manantiales según el censo del 2006, a través de los cuales se descarga un caudal conjunto de 330 l/s, lo que equivale a un volumen de **10.4 hm³ anuales**.

Por lo tanto, la descarga total corresponde a la suma del bombeo y la descarga a través de manantiales, lo que equivale a:

$$Dt = 183.1 + 10.4 = 193.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

IV.4.3. Entradas

Con base en el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, se define a la recarga total (R_t) como el volumen de agua que recibe un acuífero, en un intervalo de tiempo específico y ocurre principalmente por tres procesos naturales, los cuales, se servirán para determinar la recarga total mediante la ecuación que a continuación se muestra:

$$R_t = E_h + R_v + R_i$$

R_t = Recarga total que recibe el acuífero.

E_h = Flujo subterráneo horizontal.

R_v = Recarga vertical.

R_i = Recarga inducida.

Recarga inducida (R_i)

La recarga inducida está compuesta por la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola y por el agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, que constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Debido a que no se cuenta con información sobre el volumen de agua que se infiltra al acuífero por retornos de riego (R_r) y por infiltración a causa de las fugas en las redes de agua potable y alcantarillado, la CONAGUA consideró un coeficiente de infiltración de 2% para las arcillas que conforman el acuitardo.

De esta manera, si tomamos en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen anual de 135 hm^3 , de los cuales 48.6 hm^3 son aguas subterráneas y 86.4 hm^3 aguas superficiales, el volumen de la recarga por retornos de riego es:

$$R_r = 135.0 (0.02) = 2.7 \text{ } hm^3 \text{ anuales}$$

De igual forma, considerando que el volumen de agua subterránea que se destina al uso público-urbano es de 128.4 hm^3 anuales y tomando un 2% de coeficiente de infiltración, tenemos que el volumen de infiltración de las fugas en las redes de agua potable y de alcantarillado (I) es:

$$I = 128.4(0.02) = 2.6 \text{ } hm^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto, la recarga inducida es:

$$Ri = Rr + I = 2.7 + 2.6 = 5.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **38.7 hm³/año**.

Recarga vertical (Rv)

Se considera como recarga vertical a la infiltración de agua de lluvia en el valle y a la infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales. Representa uno de los términos con mayor incertidumbre en su cálculo, debido a esta dificultad y a que se cuenta con la información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV_S), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, el valor de la recarga vertical (Rv) será despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión:

$$Rv + Ri + Eh - B - Dm = \pm \Delta V(s) \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Ri: Recarga inducida

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

Dm: Descarga a través de manantiales

(ΔV_S): Cambio de almacenamiento

Despejando la recarga vertical, tenemos lo siguiente:

$$Rv = B + Dm - Ri - Eh \pm (\Delta V_S) \quad \text{ecuación 2}$$

Como ya tenemos todos los valores de los términos que integran la ecuación 2, se procede a sustituir y obtener el valor de la recarga vertical.

$$Rv = 183.1 + 10.4 - 5.3 - 38.7 - 48.4$$

$$\mathbf{Rv = 101.1 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$Rt = Eh + Rv + Ri$$

$$Rt = 38.7 + 101.1 + 5.3$$

$$\mathbf{Rt = 145.1 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

IV.4.4. Sobreexplotación

Una vez obtenidas las entradas y salidas de agua del acuífero y retomando la ecuación de balance, obtenemos lo siguiente:

$$\text{Sobreexplotación} = \text{Recarga total} - \text{Descarga total}$$

$$\text{Sobreexplotación} = 145.1 - 193.5 = \mathbf{-48.4 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

IV.5. Disponibilidad de aguas subterráneas

Para determinar la disponibilidad de agua subterránea, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 la cual, establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. En el apartado de esta norma, correspondiente a las aguas subterráneas se menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen anual de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

IV.5.1. Recarga total media anual

La recarga total media anual (Rt), corresponde a la suma de todos los volúmenes de agua que ingresan al acuífero por recarga vertical, flujo subterráneo horizontal y recarga inducida. El valor de la recarga total fue calculado en el apartado anterior correspondiente al balance de aguas subterráneas, el cual, corresponde a 145.1 hm³/año.

IV.5.2. Descarga Natural Comprometida

La descarga natural comprometida (DNCOM) se define como la “fracción de la descarga natural de un acuífero, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a un acuífero” (CONAGUA, 2017).

Se determina mediante la suma de los volúmenes de agua del caudal base de los ríos que actualmente están comprometidos como agua superficial y del agua concesionada de los manantiales, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes.

Para este caso el valor de la descarga natural comprometida corresponde al valor de la descarga a través de los manantiales de **10.4 hm³/año**.

IV.5.3. Volumen concesionado de agua subterránea

El volumen concesionado de agua subterránea (VCAS) se refiere al volumen anual de extracción por bombeo, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), para este trabajo se tomó como fecha de corte el 30 de junio de 2014 y dicho volumen es de **246.48 hm³**.

IV.5.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea

La disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS) se define como el volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de un acuífero para utilizarse en diverso usos, es adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

Con base en la norma NOM-011-CONAGUA-2015, la cual indica que se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

A continuación se presenta la ecuación para determinar la DAS.

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS$$

$$DAS = 145.1 - 10.4 - 246.48$$

$$DAS = -111.78 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Este resultado indica que el acuífero Texcoco presenta una condición de déficit o sobreexplotación de $-111.78 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo que significa que no existe volumen disponible de agua en el acuífero para otorgar nuevas concesiones y por contrario se está extrayendo agua a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

Esta condición de sobreexplotación que presenta el acuífero muestra una extracción total que excede en un 133% la recarga total, comprometiendo así el recurso de agua para las generaciones futuras, además origina problemas de hundimientos diferenciales que afectan las estructuras, abatimiento en los niveles piezométricos generando que cada vez más se perforen pozos a mayor profundidad y la contaminación del agua dulce con agua salobre, trayendo como consecuencia a futuro, la disminución de la dotación de agua para los diferentes usos en la zona (doméstico, agrícola e industrial) obligando a importar agua de otras cuencas para satisfacer la demanda de la población de la ZMVM.

Las problemáticas anteriores, hacen visible la necesidad e importancia de implementar un Manejo de Recarga del Acuífero (MAR) dentro del acuífero Texcoco con el fin de lograr una condición de equilibrio entre las descargas y las recargas de la zona.

CAPÍTULO V. PROPUESTA DE MÉTODO DE RECARGA DE ACUÍFEROS

V.1. Selección del sitio de aplicación MAR

Para la selección del sitio apropiado para implementar un manejo de recarga artificial en el segundo acuífero con mayor déficit de disponibilidad de agua dentro del Valle de México en este trabajo, se inició con seleccionar la zona dentro de las fronteras del acuífero Texcoco.

Con base en la información recabada sobre estudios y trabajos que se han realizado para este acuífero (Capítulo 4. Marco conceptual del acuífero Texcoco), se determinó que la zona mejor estudiada y con la mayor cantidad de datos disponibles, es la Zona Federal del Lago de Texcoco.

Posteriormente, se procedió a seleccionar el sitio dentro de la Zona Federal tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Se cuenta con el antecedente de la perforación de tres pozos en 1985 con el objetivo de inyectar agua al acuífero que actualmente están clausurados pero que podrían servir como pozos de observación.

- En el año 2011, la CONAGUA mediante el Instituto de Geofísica de la UNAM realizó un modelo hidrogeológico conceptual del área donde se ubica la Planta de Tratamiento Terciario en la zona federal del ex lago de Texcoco. Este proyecto nos permite contar con información del subsuelo de la zona, necesario para el diseño de una técnica MAR.
- La zona es federal por lo tanto se omite el costo por adquisición del terreno para la instalación del método de recarga de acuífero seleccionado.
- Se cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas residuales; “Lodos activados” con una capacidad instalada de 1000 l/s y “Contracorriente” con capacidad de 550 l/s. Una de estas dos plantas, la PTAR “Lodos activados” cuenta con un Módulo de Tratamiento Terciario, el cual cumple con los requisitos para la recarga artificial con agua residual tratada, solicitados por la NOM-014-CONAGUA-2007.

El sitio seleccionado para la aplicación de la recarga artificial con base en los criterios anteriores corresponden a las inmediaciones de la PTAR “Lodos Activados” y sus características geológicas, geofísicas e hidrogeológicas se describirán a continuación:

V.1.1. Ubicación

La zona federal del ex Lago de Texcoco se ubica al noreste de la Ciudad de México, cuenta con una superficie de 180 km², con un relieve de tipo semiplano. Dentro de esta zona, en la parte suroeste se encuentra el área seleccionada para la aplicación de un proyecto MAR (Figura 27), ubicada entre la Planta de Tratamiento de Lodos Activados, el lago Dr. Nabor Carrillo, el Lago Recreativo y las Lagunas Facultativas en un área aproximada de 1 km².



Figura 27. Sitio de aplicación de la recarga artificial.

V.1.2. Litoestratigrafía

Se cuenta con la litología obtenida en el proyecto “Modulo experimental de recarga de acuíferos” realizado por la Comisión del Lago de Texcoco en 1985, la cual, se utilizó para la perforación de 3 pozos. Dicha litología fue obtenida con base en los pozos perforados en la zona en los años 1979 a 1981 con una profundidad de 150 a 200m (Tabla 11).

Además, se obtuvo el apoyo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la cual realizo registros eléctricos en los pozos perforados para recarga de acuífero, con los cuales se determinó la estratigrafía al compararse con los resultados obtenidos por la CFE (Figura 28).

Tabla 11. . Litología de la zona de aplicación según estudios realizados en 1985. Fuente: Comisión del Lago de Texcoco.

Unidad	Profundidad (m)	Espesor (m)	Asociación litológica
A	30	30	Arcilla
B	40	10	Limo-arenoso (1ª capa dura)
C	60	20	Arcilla
D	68	8	Limo-arenoso (2ª capa dura)
E	80	12	Arcilla
F	200	120	Gravas, limos y arenas

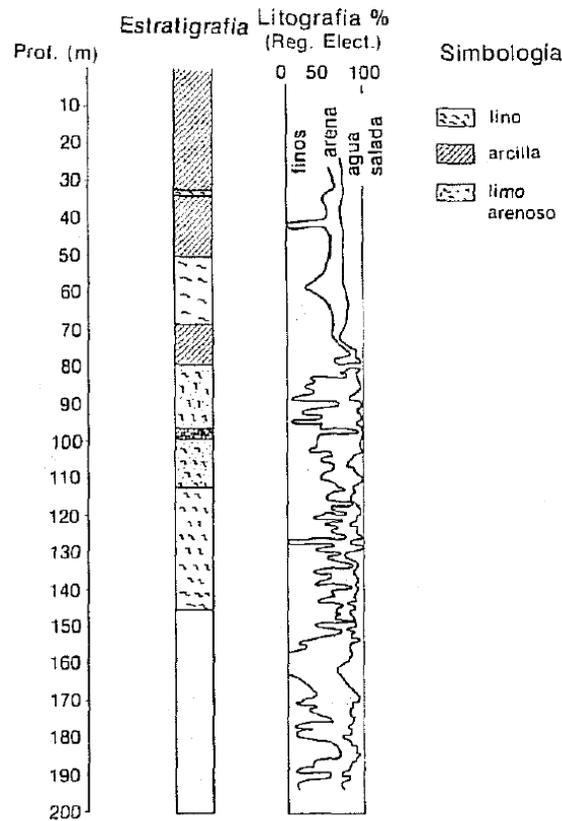


Figura 28. Columna estratigráfica y registro eléctrico obtenidos en 1985.

Fuente: (Piñon Martínez, 1989).

Adicionalmente a la información anterior, para determinar la lito estratigrafía del subsuelo en el área de estudio, se utilizó la información obtenida mediante sondeos geofísicos y secciones geológicas determinadas en el “Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco” realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM para la CONAGUA en el año 2011.

Las secciones geológicas determinadas en ese proyecto, se realizaron de acuerdo a la interpretación de la descripción de cortes litológicos y del registro eléctrico de pozos existentes cerca del área de interés, como son:

Peñón-Texcoco, Nabor Carrillo, Peñón, algunos pozos aislados en Nezahualcóyotl, Chicoloapan, Los Reyes la Paz; BNP 1 y el pozo profundo Texcoco PP1, este último pozo fue perforado a 2065m de profundidad, los restantes varían su profundidad entre 200 y 400 m.

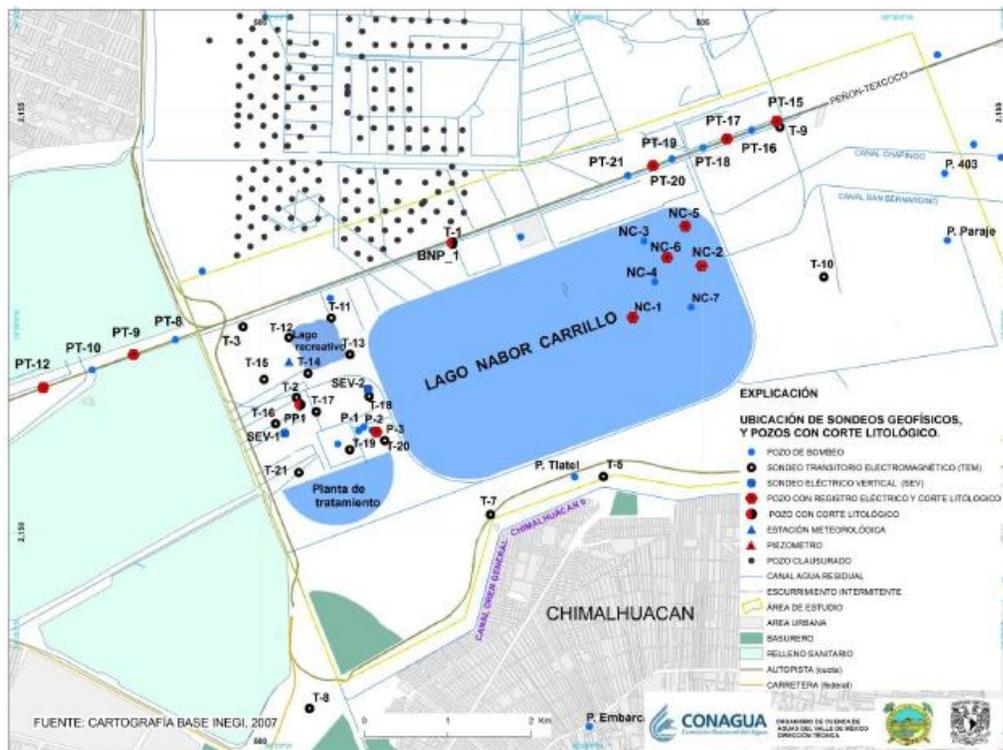


Figura 29. Localización de los pozos ubicados dentro de la zona de estudio.

Fuente: (Instituto de Geología de la UNAM, 2011).

Debido a la falta de suficientes datos litológicos obtenidos en forma directa para conocer la lito estratigrafía hasta una profundidad de 300m, se utilizaron métodos geofísicos de exploración mediante dos técnicas indirectas; a) sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), también conocido como sondeo transitorio electromagnético y b) sondeo vertical (SEV).

Con ayuda de los perfiles de resistividad y los resultados de los modelos unidimensionales de cada TEM y de los SEV's se elaboraron diez secciones geológicas, de las cuales, cinco se encuentran sobre el sitio elegido en este trabajo como área de estudio (Figura 30).

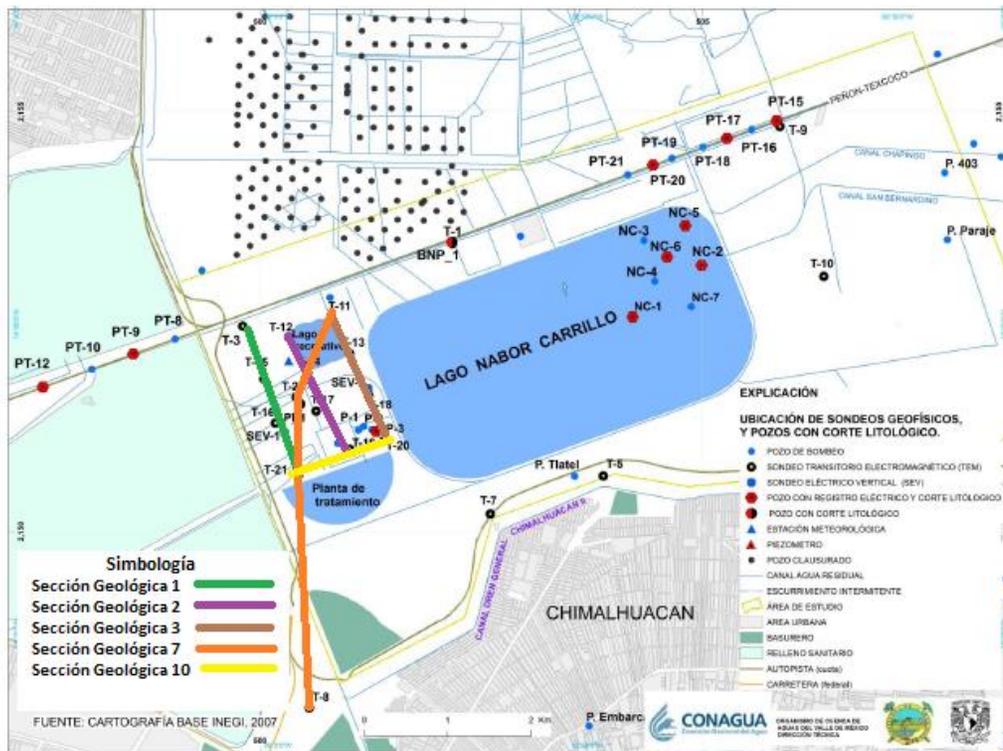


Figura 30. Secciones geológicas determinadas por el Instituto de Geología.

Fuente: (Instituto de Geología de la UNAM, 2011).

Con base en la información disponible sobre la zona, se proponen dos ubicaciones para la instalación del pozo de inyección, método seleccionado en el punto anterior, estos sitios fueron elegidos por la cercanía que tienen con el Módulo de Tratamiento Terciario de la PTAR “Lodos Activados” (figura 31).



Figura 31. Ubicación para la instalación del pozo de inyección.

Fuente: Elaboración propia.

De las secciones geológicas que se tienen de la zona de estudio podemos observar que los dos sitios propuestos para la instalación de los pozos de inyección se encuentran sobre la sección geológica 2, por lo cual, los datos litológicos, estratigráficos, espesor del acuífero y profundidad del nivel estático necesarios para el dimensionamiento del pozo se obtuvieron con ayuda de esta sección (figura 32).

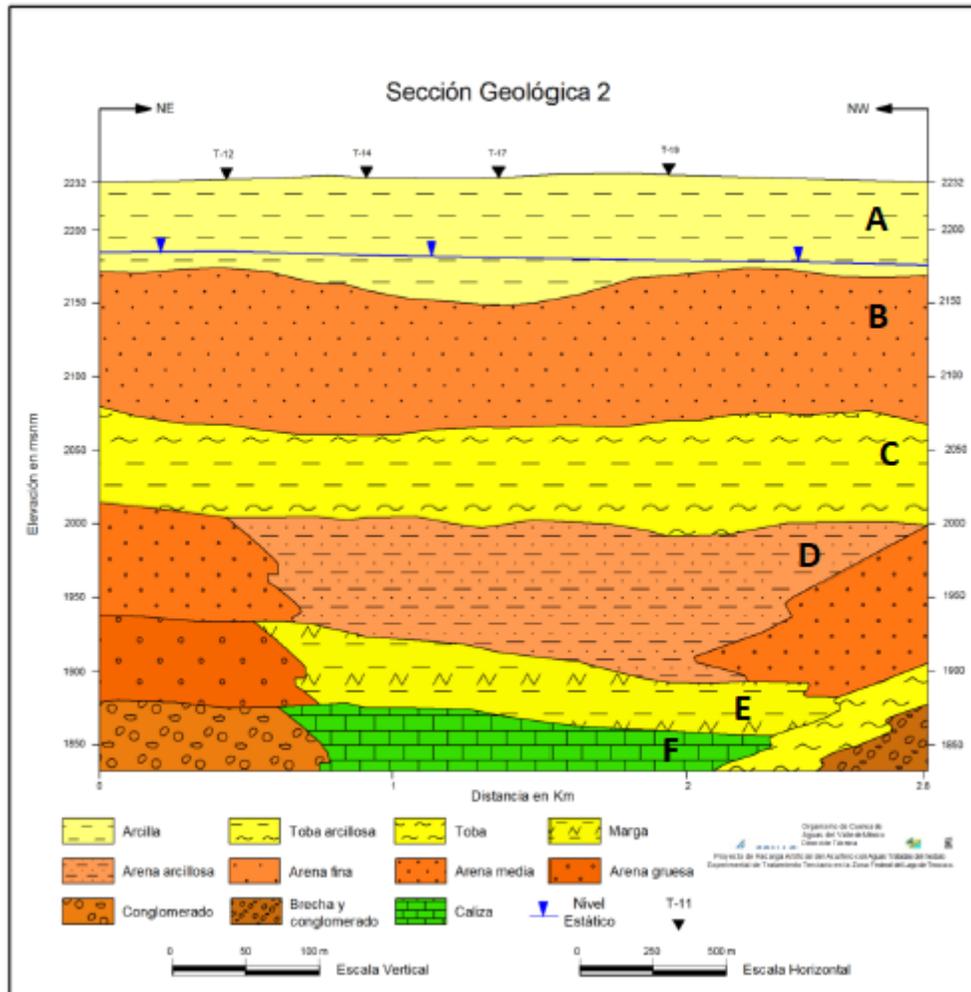


Figura 32. Sección Geológica obtenida por Instituto de Geofísica UNAM. Fuente: (Instituto de Geología de la UNAM, 2011).

La planicie de Texcoco se constituye de sedimentos cuya textura va desde arcilla hasta bloques de conglomerados. En la zona oeste del lago Nabor Carrillo, lugar donde se ubica el sitio seleccionado para llevar a cabo la recarga artificial, se infiere, con ayuda de la figura 32, la existencia de una secuencia homogénea de seis estratos de sedimentos finos alternados de arcilla, limo, arena fina y caliza lacustre.

Los espesores y permeabilidades estimados para estos estratos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12. Estratigrafía del subsuelo en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Profundidad (m)	Espesor (m)	Asociación litológica	Permeabilidad estimada
A	0 - 67	67	Arcilla	Muy baja
B	67 - 162	95	Arena fina	Baja a media
C	162 - 237	75	Toba arcillosa	Baja
D	237 - 322	85	Arena arcillosa	Baja
E	322 - 362	40	Marga	Muy Baja
F	>362	>60	Caliza	Media

Con ayuda de la tabla 12 se obtuvo la columna litológica de la zona (figura 33), la cual servirá para diseñar el pozo de inyección.

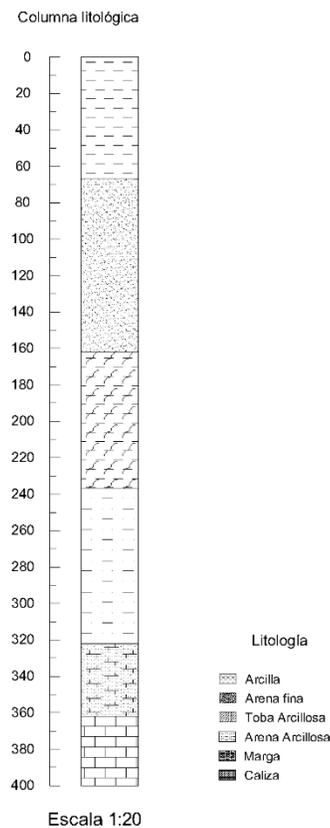


Figura 33. Litología inferida del proyecto realizado por el Instituto de Geología para la CONAGUA. Fuente: Elaboración propia.

V.2. Selección del método de recarga artificial.

La selección del mejor método de recarga artificial se realizó en función a los criterios que a continuación se mencionan:

- En el sitio seleccionado para la aplicación de la recarga, el acuífero es de tipo confinado mediante una capa de arcilla con un espesor aproximado de 70 m, esto quiere decir que el método de recarga seleccionado debe librar la capa de arcilla y conducir el agua de recarga a presión hasta el acuífero inferior, por lo tanto, los métodos de dispersión se descartan debido a que estos métodos infiltran el agua por gravedad desde la superficie.
- A causa del gran crecimiento poblacional y de la mancha urbana dentro del Valle de México, no se cuenta con extensas superficies libres para la aplicación y desarrollo de proyectos de recarga artificial de acuíferos, por lo cual, el método MAR seleccionado debe ocupar una extensión de superficie pequeña, por lo tanto una vez más los métodos de dispersión quedan descartados para este trabajo,
- El agua de recarga proviene del módulo experimental de tratamiento terciario de la Planta de Tratamiento de aguas residuales “Lodos Activados”, por lo tanto se garantiza que se cumpla la calidad del agua requerida por la NOM-014 para proyectos de recarga artificial con agua residual tratada, esto permite que el agua de recarga sea inyectada directamente al acuífero sin necesidad de utilizar los estratos del subsuelo como un filtro natural para mejorar la calidad del agua de recarga.
- Debido a que el sitio de aplicación se encuentra dentro de una zona federal perteneciente al terreno destinado para la PTAR “Lodos Activados” no se requiere la adquisición del predio, lo cual representa un ahorro económico significativo en el costo total del proyecto.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, el mejor método de recarga artificial para el sitio de estudio del presente trabajo es mediante **Pozos de Inyección**.



Figura 34. Método de recarga artificial seleccionado. Fuente: Elaboración propia

V.3. Diseño del dispositivo de recarga artificial

El diseño del pozo prototipo propuesto en este trabajo se llevó a cabo mediante una serie de procedimientos que determinan las dimensiones adecuadas de los elementos de la estructura así como la correcta elección de los materiales para utilizarse en la construcción y terminado del pozo basándose en la NOM-003-CONAGUA-1996 y el libro 8 *Captación en Pozos Profundos* del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) editado por la CONAGUA.

Es importante mencionar que el alcance de este trabajo solo incluye el diseño del pozo a un nivel de anteproyecto, debido a que no se cuenta con información específica del sitio seleccionado para llevar a cabo la perforación del pozo, dicha información se obtendrá con la ayuda de una perforación exploratoria, la cual permitirá obtener las condiciones geológicas reales, parámetros hidráulicos y muestras de la litología necesarios para realizar un análisis granulométrico.

Con los nuevos datos obtenidos mediante la perforación exploratoria se podrá perfeccionar y optimizar el diseño y rendimiento del pozo de inyección, que se presenta a continuación.

V.3.1. Ademe

El ademe es un tubo que sirve como recubrimiento y protección del pozo evitando el derrumbe o colapso que afectan la estructura integral del mismo. El tubo de ademe se divide en: tubería lisa y tubería ranurada o cedazo.

Los materiales que pueden ser empleados en el ademe son: politetrafluorotileno, acero o cloruro –polivinil (PVC), la elección del material depende de la profundidad, la geología del suelo, geoquímica del agua y contaminantes presentes en el agua.

Tubería lisa

Esta sección del ademe es recta y se utiliza en las zonas en que no va a haber ningún tipo de inyección o flujo de agua.

De acuerdo con la columna litológica determinada con anterioridad, la zona factible para realizar la inyección, se encuentra terminando el estrato de arcilla que confina el acuífero, es decir, después de los 70m de profundidad.

Comercialmente los tubos de ademe miden 6 m, por lo tanto:

$$\begin{aligned}70 \text{ m} &= 6\text{m} * \#tubos \\ \# \text{ tubos} &= \frac{70\text{m}}{6\text{m}} = 11.66 \approx \mathbf{12 \text{ tubos}} \\ L_{tl} &= 12\text{tubos} * 6\text{m} = \mathbf{72\text{m}}\end{aligned}$$

Por lo tanto, se propone que el tubo liso llegue hasta una profundidad de 72m.

Adicionalmente, la NOM-003-CONAGUA-1996 indica que el extremo superior del ademe debe sobre salir un mínimo de 50 cm por encima del nivel del terreno natural o sobreelevado como medida de protección sanitaria.

Tubería ranurada

Esta parte del ademe es la que permite el flujo de agua de inyección hacia el interior del acuífero. De acuerdo con la bibliografía consultada, para un acuífero confinado con espesor mayor a 16m, como lo es el acuífero de Texcoco, la longitud de la tubería ranurada debe ser del 80% del espesor del acuífero.

$$Ltr = 0.8Ea$$

Donde:

Ltr = Longitud de la tubería ranurada.

Ea= Espesor del acuífero a recargar.

De acuerdo con la figura 6 los estratos donde se puede inyectar el agua de recarga son dos, desde los 67m hasta los 237 metros de profundidad, con esto obtendremos el 80% de ese espesor.

$$Ea = 237m - 67m = 170m$$

Por lo tanto:

$$Ltr = 0.8Ea = 0.8 * 170m = 136 m$$

$$\#tubos = \frac{136m}{6m} = 22.67 tubos \approx \mathbf{23 tubos}$$

$$Ltr\ real = 23tubos * 6m = \mathbf{138 m}$$

Se propone una tubería ranurada de 132m de longitud donde como resultado un ademe de 204m de longitud o profundidad.

V.3.2. Contraademe

Según la NOM-003-CONAGUA-1996 se define al contra ademe como una “tubería, generalmente de acero, utilizada en la ampliación de la parte superior de un pozo, cuya función es evitar derrumbes, entradas de aguas superficiales e infiltraciones que contaminan al acuífero”.

Debe tener una longitud mínima de seis metros y debe sobresalir del nivel natural o sobre elevado, además, el espacio entre el contra ademe y la pared del pozo será relleno con una lechada de cemento normal.

Para el diseño presentado en este trabajo, se propone una longitud de 20m de profundidad y una altura sobresaliente al terreno natural de 50 cm y con un diámetro de 16 pulgadas.

V.3.3. Filtro Granular

Se trata de un material redondeado de origen natural, exento de materia orgánica o cualquier sustancia que altere o modifique sus propiedades físicas y químicas naturales, cuyo tamaño se selecciona en función de las características del acuífero; se coloca entre el ademe y el contra ademe, su función principal es la de evitar la entrada de material fino al interior del pozo.

Debido a que el estrato se sitúa la tubería ranurada del ademe es arena fina, se requiere la colocación de un filtro de grava, con el objetivo de aumentar la apertura de la rejilla y de evitar el ingreso de esta arena al pozo y por consiguiente evitar el taponamiento.

En esta fase de anteproyecto se propone para el diseño, únicamente el espesor de filtro de 14 pulgadas. La selección del diámetro de las gravas que forman el filtro, se deja para trabajos posteriores debido a que no se cuenta con un análisis granulométrico del material de cada estrato donde se colocará el tubo ranurado.

V.3.4. Rejilla o cedazo

Las aberturas con forma, tamaño y espaciamiento que integran la rejilla son diseñadas en función de las características granulométricas del acuífero, para este anteproyecto no se realizó el diseño debido a que no se cuenta con un análisis granulométrico del material del acuífero pero que se contempla en trabajos posteriores.

V.3.5. Brocal

El brocal es una base de concreto perimetral al ademe del pozo, colocada en el extremo superior del mismo para soportar al cabezal de descarga, en este caso de recarga.

Para el diseño del pozo se propone un brocal de 18 pulgadas de diámetro de concreto simple con una profundidad de 20m igual que el contra ademe.

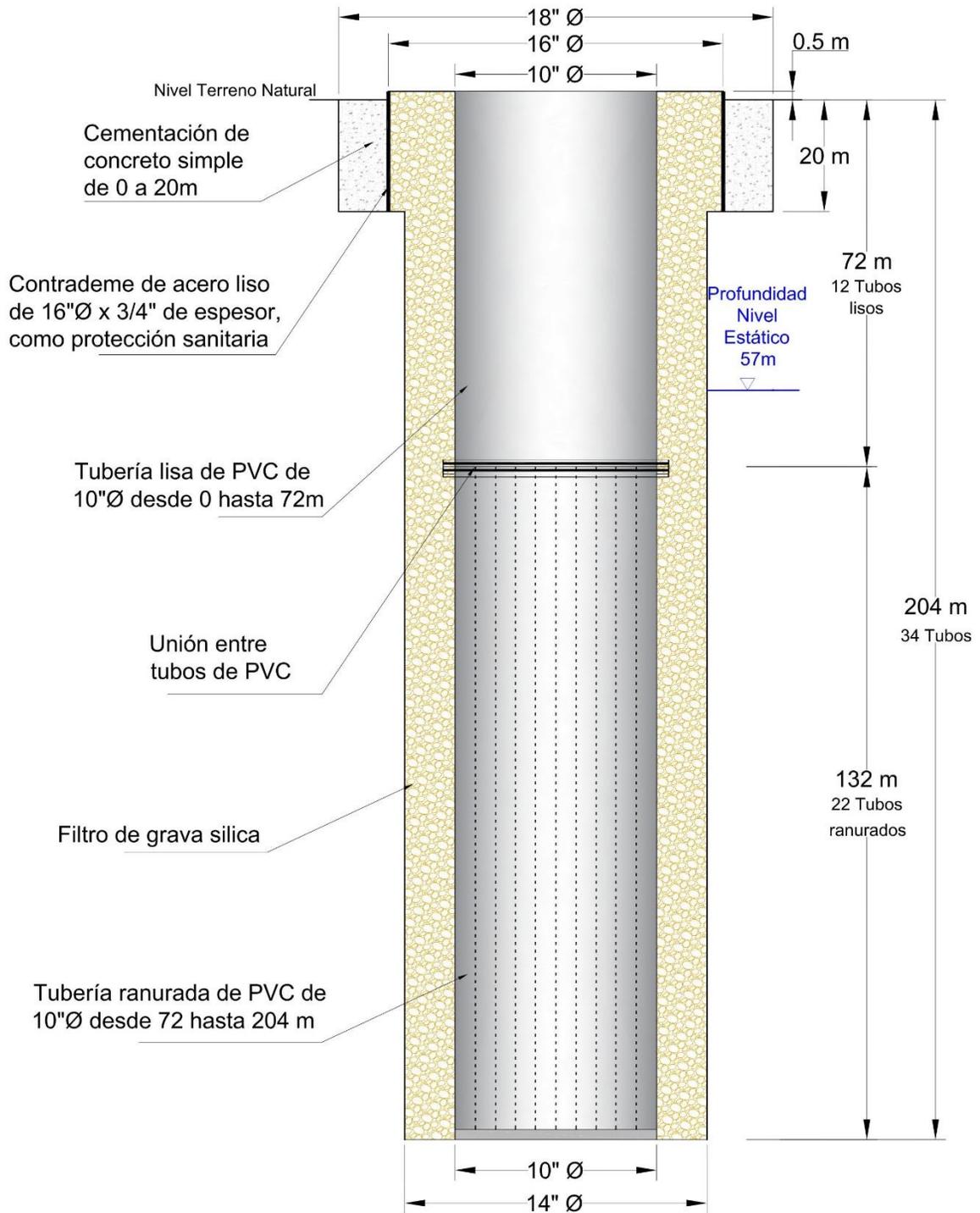
V.3.6. Plantilla

La plantilla es una losa de concreto colocada en forma perimetral al brocal para protección superficial del pozo. Para el diseño que se presenta en este trabajo, se propone con una altura de 15 cm, de los cuales, 5 cm estarán por debajo del nivel del terreno natural y 10 cm estarán por encima, con una pendiente del 2%, de tal manera que el agua u otro fluido que escurra se aleje del pozo en todas las direcciones. Es de forma cuadrada y tiene una longitud mínima por lado de tres veces el diámetro total de la perforación, que para este caso es de 18 pulgadas.

$$L_{plantilla} = 3D_{perforación}$$
$$L_{plantilla} = 3 * 18in \left(\frac{0.0254m}{1in} \right) = \mathbf{1.37m}$$

Una vez realizado el dimensionamiento de los principales elementos que conforman un pozo de inyección, se presenta la Figura 35, la cual muestra el esquema del prototipo del pozo inyección para recargar el acuífero Texcoco.

Es importante mencionar que se necesita realizar un sondeo exploratorio con la finalidad de obtener un muestreo del suelo para posteriormente obtener un análisis granulométrico además de realizar pruebas de infiltración de agua que permitan mejorar el diseño del pozo.



Sin escala gráfica

Figura 35. Diseño de pozo prototipo para inyección de agua residual al acuífero.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La escasez de agua y la dificultad para importar agua desde otras cuencas y acuíferos alejados de las urbanizaciones se ha incrementado en los últimos años a nivel internacional es por ello que la recarga artificial de acuíferos se ha convertido en una opción viable para contrarrestar la escasez de agua, frenar la sobreexplotación de los mantos acuíferos y todos los problemas que esto trae consigo.

Después de hacer una recopilación y clasificación de los distintos métodos de recarga que existen en el mundo hoy en día y una vez identificado que el acuífero Texcoco es de tipo confinado; ya que le subyace una capa de arcilla y materiales lacustres, se concluye que el método de recarga que mejor se adaptaba a las características del acuífero son pozos de inyección ya que estos permiten infiltrar el agua de manera directa en la zona saturada.

Debido a la falta de información hidrogeológica del acuífero y después de reunir estudios y trabajos sobre el acuífero Texcoco; se determinó con base en ellos que el sitio seleccionado para la instalación del pozo de inyección se localiza dentro del terreno perteneciente a la planta de tratamiento “Lodos Activados”, la zona es elegida debido a que cuenta con un tratamiento a nivel terciario, lo cual garantiza que se cumpla con los parámetros requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2007 para recarga artificial con agua residual tratada, es importante mencionar que se seleccionó el agua residual como fuente de recarga debido a que se tiene un caudal constante.

La elección de utilizar agua residual tratada como fuente de recarga se da como una alternativa para el uso del agua; donde actualmente es transportada de la cuenca del Valle de México hacia el Valle del Mezquital. En un futuro no se descarta la posibilidad de utilizar agua pluvial como fuente de recarga con el fin de completar el ciclo hidrológico del agua.

Es recomendable realizar un análisis para conocer a detalle la transmisibilidad, conductividad y el coeficiente de almacenamiento de los estratos localizados en la

zona mediante una serie de pruebas de bombeo, además de la perforación de un sondeo exploratorio en el sitio seleccionado que permita validar la columna estratigráfica y recuperar núcleos para así obtener un análisis granulométrico que permita mejorar el diseño del pozo.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2013). *Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?* México.
- Beltrán Molina, R. (2003). *Recarga artificial de acuíferos como solución a su explotación (Tesis de Licenciatura)*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Birkle, P., Torres, V., & González, E. (septiembre-diciembre de 2015). Evaluación preliminar del potencial de acuíferos profundos en la cuenca del valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México, Vol. X*(Núm. 3), págs. 47-53.
- Bouwer, H. (1999). *Hydraulic design handbook*. New York : McGraw-Hill.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology journal*, pp 121- 142.
- Chán Santisteban, M. (2012). *Métodos de almacenamiento del agua. Un elemento clave para la adaptación al cambio climático*. Guatemala: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.
- CONAGUA ; SEMARNAT;. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Captación de Pozos Profundos* (Vol. 8). Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (1996). *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de los acuíferos*. Distrito Federal: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2007). *Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2007, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. . Distrito Federal: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2007). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua*. Distrito Federal: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2013). *Estadísticas del Agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México*. . México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Distrito Federal: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2016). *Atlas del agua en México 2016*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

- CONAGUA; SEMARNAT;. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Alternativas Tecnológicas de Tratamiento de Aguas Residuales para la Recarga Artificial de Acuíferos* (Vol. 38). Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona, España: OMEGA.
- Dillon, P., & Gale, I. (2005). *Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*. Paris: UNESCO.
- Escobar Villagran, B. S., & Palacios Vélez, Ó. L. (abril-junio de 2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Revista: Tecnología y Ciencias del Agua, Vol III*(Núm 2), 67-84.
- Fernández Escalante, A. (2010). *Título 6: DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico*. Madrid: GRAFINAT.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall.
- González Torres, E. A., Morán Zenteno, D., Mori, L., & Martiny, B. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 67*(Núm. 2), p. 285-297.
- González Villarreal, F., Cruickshank Villanueva, C., Palma Nava, A., & Mendoza Mata, A. (enero - marzo de 2015). Recarga artificial de acuíferos en México. *Revista: H2O Gestión del agua*(Núm 5), pp 26 - 32.
- Hernández López, Ó. (2014). Proyecto Hidráulico del Lago de Texcoco., (pág. 26). Ciudad de México.
- IGME. (2000). *Recarga artificial de acuíferos, Conceptos Generales*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- IMTA. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. (O. Escolero Fuentes, C. Gutiérrez Ojeda, & E. Mendoza Cázares, Edits.) Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto de Geología de la UNAM. (2011). *Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la Zona Federal del Lago de Texcoco*. Ciudad de México: OCAVM, CONAGUA.
- Lesser J. M., & González D. . (2005). *El agua subterránea en la Ciudad de México. En: Memorias del V Congreso de Aguas Subterráneas*. Hermosillo, Sonora: Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Lesser y Asociados, S. A. de C. V. (mayo-agosto 1991). Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del Valle de México. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 65-70.
- Mendoza Archundia, E. (2012). *Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero* (Tesis de Licenciatura). México D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.

- Muciño, D. (2001). Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial. En *Estudio general del caso: Lago de Texcoco, México*. México: Convenio: IDRC-OPS/HEP/CEPIS.
- Murillo Díaz, J. M., Orden Gómez, J. A., Armayor Cachero, J. L., & Castaño Castaño, S. (2000). *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis Metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- OCWD. (2015). *Groundwater Replenishment System* . California: Orange County Water District .
- Palma Nava, A., Mendoza Mata, A., Cruickshank Villanueva, C., González Villarreal , F., Salas Salinas, M., & Val Segura, R. (2014). Inventario de la Recarga Artificial en México. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Piñon Martínez, N. (mayo-agosto de 1989). Módulo experimental de recarga de acuíferos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 67-72.
- Russell, M. (2013). *Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods* . Australia: IAHC Commission on Managing Aquifer Recharge.
- Salvador Delgadillo, R. (2013). *Recarga artificial del acuífero como parte de la gestión integral de los recursos hídricos en el Valle de México (Tesis de Licenciatura)*. México D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Secretaría de Salud. (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Distrito Federal .