



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**ANTEPROYECTO DE RECARGA GESTIONADA  
PARA EL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S A**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA**

Opción curricular: MANEJO DE CUENCAS

P R E S E N T A :

**Ing. Dail Enrique Palavicini Carrillo**

TUTOR:  
**Dra. Adriana Palma Nava**

Cd. Mx. Enero, 2023





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I. VÍCTOR FRANCO

Secretario: M.I. SIXTA HINNDI MENDOZA PÉREZ

Vocal: DRA. ADRIANA PALMA NAVA

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. FAUSTINO DE LUNA CRUZ

2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. LILIANA AGUILAR YAÑEZ

Lugar donde se realizó la tesina:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESINA:**

---

Dra. Adriana Palma Nava



PARA MI MAMÁ, TE AMO



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se revisan las metodologías unificadas por el “International Groundwater Resources Assessment Centre” (IGRAC) referentes a la Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR), técnica alternativa dentro de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos para dar solución a efectos directos e indirectos ocasionados por la sobreexplotación de las aguas subterráneas.

Posteriormente, se estudia la metodología para realizar una evaluación de factibilidad de proyectos, con ella, cualquier persona interesada en desarrollar un trabajo MAR, tendrá los pasos básicos a seguir en una etapa previa a los estudios de detalle, además, se presentan 3 casos en los cuales se utiliza alguna técnica de recarga gestionada para dar solución a una problemática medioambiental-social.

Finalmente, mediante la revisión del marco conceptual del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901) y la metodología de factibilidad, se selecciona un tipo de dispositivo MAR y una fuente de agua para la identificación de zonas potenciales y las características primarias de un anteproyecto.

## ABSTRACT

The beginning of this thesis is the study of the unified methodologies by the International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC) regarding about of Managed Aquifer Recharge (MAR), an alternative technique within the Integrated Management of Water Resources to solve direct and indirect effects caused by the overexploitation of groundwater.

Furthermore, the methodology to carry out a project feasibility evaluation is studied, with it, any person interested in developing a MAR plan, will have the basic steps to follow in a stage prior to the detailed studies, after this, are presented three cases whereas a managed recharging technique is used to solve an environmental-social problem.

Finally, after reviewing the conceptual framework of the Mexico City Metropolitan Aquifer (0901) and the methodology of feasibility projects, a MAR device and a water source are selected for choice some potential zones and the first characteristics of the draft.



## Contenido

Capítulo I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Objetivo General .....	2
1.2.- Objetivos Específicos .....	2
1.3.- Alcance .....	2
Capítulo II.- RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS (MAR).....	3
2.1.- Generalidades.....	4
2.2.- Métodos de Recarga Gestionada .....	6
2.1.1.- Métodos de dispersión .....	12
2.1.2.- Infiltración inducida .....	14
2.1.3.- Pozos, túneles y perforaciones .....	15
2.1.4.- Modificación al canal.....	16
2.1.5.- Cosecha de lluvia y escurrimientos.....	18
2.3.- Colmatación o taponamiento.....	19
2.4.- Fuentes y Calidad de Agua para la Recarga Gestionada .....	22
2.5.- Normatividad.....	23
2.5.1.- Ley de Aguas Nacionales .....	23
2.5.2.- NOM-001-SEMARNAT-2021 .....	25
2.5.3.- NOM-014-CONAGUA-2003 .....	25
2.5.4.- NOM-015-CONAGUA-2007 .....	26
Capítulo III.- FACTIBILIDAD DE LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS .....	29
3.1.- Metodología para la evaluación de factibilidad MAR .....	30
Capítulo IV.- EXPERIENCIAS DE RECARGA GESTIONADA .....	34
4.1.- En el mundo.....	35
4.2.- En México .....	37
4.3.- En el Acuífero de la Ciudad de México.....	39
Capítulo V.- POTENCIAL DE RECARGA GESTIONADA EN LA CIUDAD DE MÉXICO ..	42
5.1.- Marco Conceptual del Acuífero .....	43
5.1.1.- Descripción regional .....	43
5.1.2.- Descripción Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901) .....	43
5.1.3.- Censo de Aprovechamientos e hidrometría .....	51
5.1.4.- Balance de Aguas Subterráneas .....	52
5.1.5.- Disponibilidad de Aguas Subterráneas .....	53
5.2.- Factibilidad de Proyecto .....	54
5.3.- Zonas potenciales MAR .....	56
5.4.- Propuesta de Anteproyecto .....	59
CONCLUSIONES .....	65





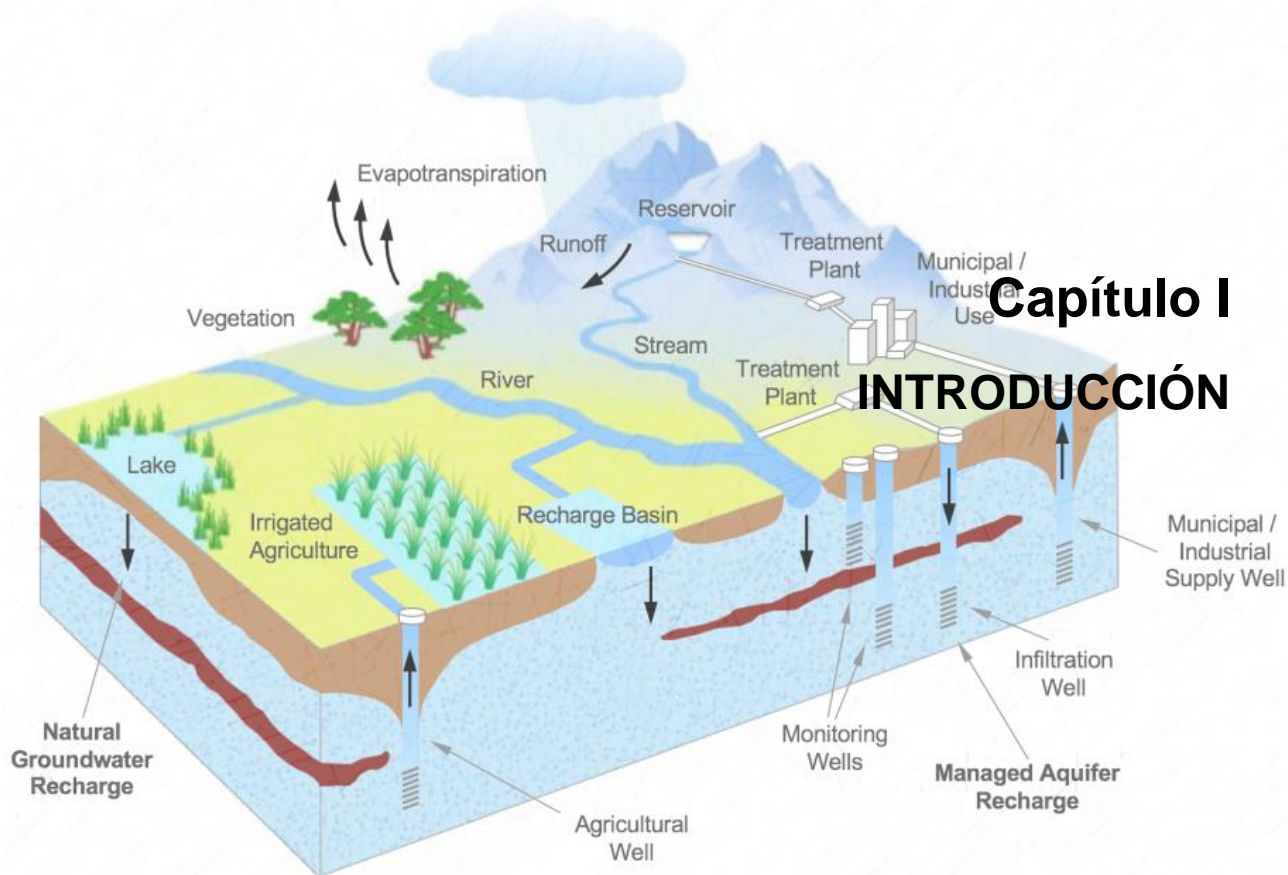
## Índice de Figuras

FIGURA 1.- EJEMPLOS DE POZOS PARA RECARGA, TRADUCCIÓN PROPIA, FUENTE: FIGURA 3.2. ASCE, 2020 .....	4
FIGURA 2.- COMPONENTES DE UN SISTEMA MAR: (A) ASR EN ACUÍFERO CONFINADO; (B) SAT EN ACUÍFERO LIBRE, (TOMADO DE FIGURA 3.1 ASCE, 2020, FUENTE NRMCM ET AL. 2009, FIGURA 2.1) .....	6
FIGURA 3.- TÉCNICAS MAR UTILIZADAS EN TODO EL MUNDO (MODIFICADO DEL PORTAL MAR-IGRAC) .....	7
FIGURA 4.- ESQUEMA DE COLMATACIÓN MECÁNICA (TOMADO DE LÓPEZ, 2019, FUENTE: MARTIN, 2014). 19	
FIGURA 5.- ESQUEMA DE COLMATACIÓN BIOLÓGICA (TOMADO DE LÓPEZ, 2019, FUENTE: MARTIN, 2014) 20	
FIGURA 6.- ESQUEMA DE COLMATACIÓN QUÍMICA (TOMADO DE LÓPEZ, 2019, FUENTE: MARTIN, 2014)....	20
FIGURA 7.- ESQUEMA DE COLMATACIÓN FÍSICA (TOMADO DE LÓPEZ, 2019, FUENTE: MARTIN, 2014) .....	21
FIGURA 8.- DISEÑO PARA UNA LAGUNA DE INFILTRACIÓN FUENTE: MARTIN, 2014 .....	21
FIGURA 9.- DIFERENTES METODOLOGÍAS Y FUENTES DE AGUA DE ACUERDO A DILLON & GALE 2005. ....	22
FIGURA 10.- SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA PROYECTO SIDFA, TRADUCIDO DE: SHAMRUKH ET AL., 2021 .....	36
FIGURA 11.- COMPARACIÓN DE VOLÚMENES EN EXTRACCIÓN Y RECARGA SLRC, TRADUCCIÓN PROPIA, FUENTE: CAMPUZANO ET AL., 2021 .....	38
FIGURA 13.- DIAGRAMA DE RECOLECCIÓN DE AGUA PLUVIAL EN CIUDAD UNIVERSITARIA, FUENTE: ROSAS, 2013.....	39
FIGURA 14.- CUENCA DE MÉXICO Y DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS .....	44
FIGURA 15.- GEOLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO, MODIFICADO DE CARTA E14-2, SGM. ....	46
FIGURA 16.- ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO, MODIFICADA DE VÁSQUEZ ET AL., 2021 .....	46
FIGURA 17.- SECCIONES GEOLÓGICAS W-E, N-S VALLE DE MÉXICO, FUENTE: ARCE ET AL., 2019 .....	48
FIGURA 18.- SECCIÓN GEOLÓGICA S-N CON UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS, FUENTE: PALMA ET. AL., 2022 .....	48
FIGURA 19.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA FACTIBILIDAD DE PROYECTO.....	55
FIGURA 20.- TOTAL DE PTAR EN CDMX Y PTAR POTENCIALES PARA DISPOSITIVO MAR SUPERFICIAL ...	57
FIGURA 21.- PTAR SANTA FE Y POSIBLES ZONAS PARA CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO MAR .....	58
FIGURA 22.- VISTA AÉREA DE LA PTAR SANTA FE, FUENTE: GOOGLE MAPS .....	59
FIGURA 23.- VISTA AÉREA Y EN CALLE DE LOS CAMPOS DEPORTIVOS JALALPA, FUENTE: GOOGLE MAPS..	60
FIGURA 24.- VISTA AÉREA Y EN CALLE DEL PARQUE FORTÍN, FUENTE: GOOGLE MAPS .....	60
FIGURA 25.- VISTA AÉREA Y EN CALLE DEL PARQUE ACUÁTICO JALALPA 2000, FUENTE: GOOGLE MAPS ..	61
FIGURA 26.- VISTA SW-NE CON RELIEVE 3D DE LAS ZONAS POTENCIALES, FUENTE: GOOGLE EARTH .....	61
FIGURA 27.- FICHA DE ANTEPROYECTO “ESTANQUE DE INFILTRACIÓN CAMPOS JALALPA” .....	62



## Índice de Tablas

TABLA 1.- LISTADO DE TÉCNICAS MAR.....	7
TABLA 2.- CLASIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS MAR (IGRAC, 2013), ESQUEMAS TOMADOS DE INOWAS Y FERNÁNDEZ-ESCALANTE 2022.....	8
TABLA 3.- PROS Y CONTRAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE DISPERSIÓN.....	13
TABLA 4.- PROS Y CONTRAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INFILTRACIÓN INDUCIDA.....	14
TABLA 5.- PROS Y CONTRAS POZOS, TÚNELES Y PERFORACIONES .....	15
TABLA 6.- PROS Y CONTRAS MODIFICACIONES AL CANAL.....	17
TABLA 7.- PROS Y CONTRAS COSECHA DE LLUVIA Y ESCURRIMIENTOS .....	18
TABLA 8.- GENERALIDADES SIDFA, ASSIUT .....	35
TABLA 9.- CALIDAD DEL AGUA MARZO-ABRIL 2016, MODIFICADO DE SHAMRUKI ET AL., 2021 .....	36
TABLA 10.- GENERALIDADES SLRC.....	37
TABLA 11.- CALIDAD ANUAL DEL AGUA DE ENTRADA Y SALIDA A LA PTAR Y UN POZO DE OBSERVACIÓN DE 2010-2019, MODIFICADO DE CAMPUZANO ET AL., 2021.....	38
TABLA 12.- GENERALIDADES CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.....	40
TABLA 13.- UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO ZMCDMX .....	49
TABLA 14.- FAMILIAS HIDROGEOQUÍMICAS EN LA CUENCA DE MÉXICO .....	50
TABLA 15.- VOLÚMENES DE AGUA SUMINISTRADOS A LA CIUDAD DE MÉXICO.....	51
TABLA 16.- FACTIBILIDAD DE PROYECTO MAR ACUÍFERO CDMX.....	54
TABLA 17.- CLASIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA PROYECTOS MAR EN LA CIUDAD DE MÉXICO..	56



Managed Aquifer Recharge (MAR), Fuente: [inowas.com/mar](http://inowas.com/mar)

Afortunadamente, el ser humano es capaz de apreciar con sus sentidos una parte del ciclo hidrológico, por ejemplo; escuchar la lluvia, observar un río caudaloso después de una tormenta, sentir la humedad en el ambiente, pero, ¿Qué pasa con el resto del ciclo?, existe sin lugar a duda, solo que está presente debajo de nuestros pies y sigue un camino algunas veces rápido y otras tortuoso, en el cual, el ciclo de vida humano no representa ni el 1% del tiempo hidrológico.

En México, aproximadamente tenemos 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, de esta cifra, el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (Estadísticas del agua 2019, Comisión Nacional del Agua).

Si solo se infiltra el 6.4%, ¿Cuánta agua de la que se consume hoy en día es de reciente infiltración?, la respuesta está en función de las características hidrogeológicas de cada región del país, el desarrollo urbano y la demanda del vital líquido.

Se estima que por cada hectárea de suelo que se urbaniza al sur de la Ciudad de México la recarga de agua se reduce en 2.5 millones de litros al año (Manual para instalar



un sistema de captación pluvial en tu vivienda, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México, 2020).

Dentro de los planes de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos, se busca el desarrollo de políticas públicas favorables y el equilibrio ecológico para mejorar la calidad de vida de las generaciones presentes sin tener que limitar el acceso a las generaciones futuras.

Para lograr un equilibrio ecológico, se debe de comprender que los recursos naturales no tienen el mismo ciclo de vida que el tiempo humano, con esto, a lo largo del presente trabajo se explicará el uso de una técnica alternativa con impacto positivo.

### **1.1.- Objetivo General**

- Evaluar la factibilidad para proyectos de recarga gestionada dentro del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México e identificar zonas potenciales para realizar las generalidades de la primera etapa de anteproyecto.

### **1.2.- Objetivos Específicos**

- Seguir la metodología de factibilidad para evaluar las condiciones del acuífero.
- Seleccionar una línea de investigación para la ubicación de zonas potenciales específicas.
- Evaluar las zonas potenciales para realizar la propuesta de anteproyecto.

### **1.3.- Alcance**

El alcance del presente trabajo de investigación es proponer un anteproyecto de recarga gestionada dentro del área correspondiente al acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, para alcanzar esto, se utilizará la información disponible de manera pública, se considerarán fuentes de agua siempre disponibles y de calidad, se seguirá el método de factibilidad de proyectos y la normativa mexicana vigente.

## Capítulo II

# RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS (MAR)



Las dos palabras con mayor recurrencia a lo largo de todos los capítulos son **agua y gestión**, la primera, representa; vida, desarrollo, pureza, naturaleza, y crecimiento, conceptos que desgraciadamente cada día suenan menos prometedores, de ahí la importancia de nuestra segunda palabra, en donde se realizan acciones mediante la administración de recursos para conseguir o lograr un deseo

Para imaginar los orígenes de la recarga gestionada de acuíferos, es obligatorio retomar el principio mismo de la humanidad como civilización, nuestros antepasados fueron participes en la creación e implementación de técnicas para almacenar, transportar e infiltrar el agua de origen pluvial y fluvial a través del subsuelo, acelerando el proceso que ocurre de manera natural (*Acueductos de Cantalloc en Perú*, <https://tinyurl.com/LocNazca> ).

Es por ello, que en este capítulo se abordarán los principios básicos de la metodología, las diferentes técnicas estandarizadas en nuestros días, las fuentes y calidad necesaria del agua a infiltrar, la problemática existente en el proceso de recarga y la normativa aplicable para nuestro país.

## 2.1.- Generalidades

Algunos de los conceptos que se utilizarán a lo largo del presente texto y son esenciales para la comprensión de esta área de la hidrogeología aplicada son:

La palabra **infiltración** de acuerdo con Aparicio, 1989, se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

En cambio, **absorción**, derivada de la palabra absorber, es definida por la Real Academia de la Lengua Española como una sustancia capaz de atraer y retener respectivamente, un líquido o un gas o vapor.

**Zona vadosa** o zona no saturada, según la NOM-014-CONAGUA-2003 es la zona comprendida entre la superficie del terreno y la superficie freática en donde los poros están parcialmente ocupados por agua bajo presión menor a la atmosférica.

Por lo que se busca homogenizar terminologías de las obras de ingeniería de la siguiente manera:

**Pozo de absorción**, es la obra mediante la cual se busca favorecer al terreno para absorber el agua de lluvia en la superficie y evitar inundaciones.

**Pozo de infiltración**, es la obra cuyo objetivo principal es un acuífero, ya sea en contacto directo o en la zona vadosa del terreno.

**Pozo de inyección**, es la obra que requiere de presión para introducir agua, en este caso, para recargar un acuífero confinado.

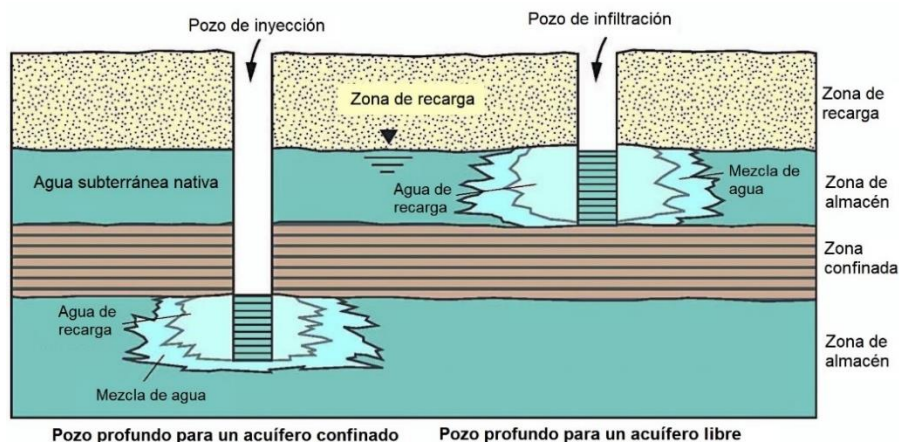


Figura 1.- Ejemplos de pozos para recarga, traducción propia, fuente: Figura 3.2. ASCE, 2020



El concepto de **recarga de acuíferos** tomando como base las definiciones anteriores se puede asociar al proceso mediante el cual el agua presente en la superficie terrestre es absorbida por el suelo, se infiltra a través de las diferentes capas o estratos y finalmente alcanza la zona saturada en el subsuelo. Como bien se sabe, dentro del ciclo hidrológico este proceso se lleva a cabo de manera natural.

Pero, ¿Qué ocurre cuando la actividad humana es participe en este proceso?, tenemos así, la **recarga no intencionada o incidental** y la **recarga intencionada**, para el primer caso, la recarga es consecuencia de actividades como el riego de jardines, fugas de agua en redes de distribución y alcantarillado, descargas de fosas sépticas e infiltraciones en canales de tierra y otros procesos que no cuentan con la infraestructura específica para la recarga intencionada (NOM-014-CONAGUA-2003). Un claro ejemplo es el caso del Valle del Mezquital, en el siguiente enlace se puede consultar mayor información sobre el tema <https://tinyurl.com/Lesseretal2011> .

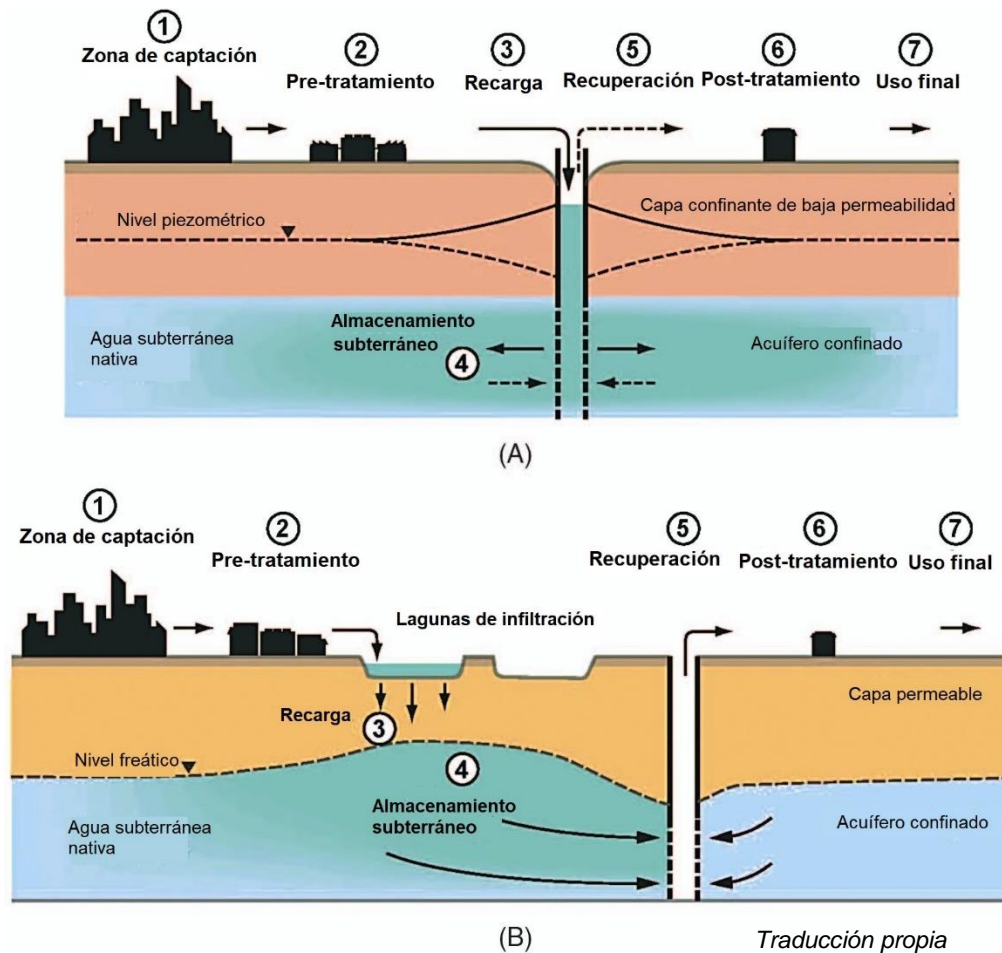
Finalmente, llegamos al concepto de **Recarga Intencionada de Acuíferos**, que en un principio fue nombrada Recarga Artificial de Acuíferos y en nuestros días es definida como **Recarga Gestionada de Acuíferos** (que en lo sucesivo también será nombrada **MAR** “Managed Aquifer Recharge”), logrando ser un gran número de procedimientos o metodologías mediante las cuales se consigue de manera intencionada recargar agua para los acuíferos, con el fin de tener una posterior recuperación o un beneficio ambiental (UNESCO, 2021).

Tenemos que, el **objetivo principal** es aumentar los recursos hídricos subterráneos disponibles y mejorar la calidad de las aguas, otros objetivos importantes son la reducción de intrusión salina, evitar procesos de hundimiento del terreno, almacenar agua en el subsuelo, conservar ecosistemas e implementar acueductos subterráneos naturales (Fernández-Escalante, 2022).

Para alcanzar los objetivos de las técnicas MAR, a continuación, se explica cada una de las metodologías existentes.

## 2.2.- Métodos de Recarga Gestionada

Los procedimientos o metodologías con los que conseguiremos de manera gestionada recargar agua, han sufrido cambios en sus categorías u organizaciones con el paso de los años (**Figura 2**), pero en sí, consisten básicamente en todo un mecanismo de ingeniería, en donde cada uno de sus componentes básicos según la guía ASCE, 2020, son; 1) orígenes del agua a recargar, 2) pretratamiento, 3) recarga, 4) almacenamiento, 5) recuperación, 6) post-tratamiento y 7) usos finales del agua.



**Figura 2.- Componentes de un sistema MAR: (A) ASR en acuífero confinado; (B) SAT en acuífero libre, (Tomado de Figura 3.1 ASCE, 2020, fuente NRMCC et al. 2009, Figura 2.1)**

Con el fin de unificar métodos y técnicas, el “International Groundwater Resources Assesment Centre” (IGRAC), es el organismo encargado de facilitar el intercambio de información y los conocimientos necesarios para el desarrollo de recursos de agua subterránea en todo el mundo, es un socio corporativo de la “International Asociation of Hydrogeologists” (IAH) y es apoyado financieramente por el Gobierno de los Países Bajos (<https://www.un-igrac.org/es/quienes-somos>).



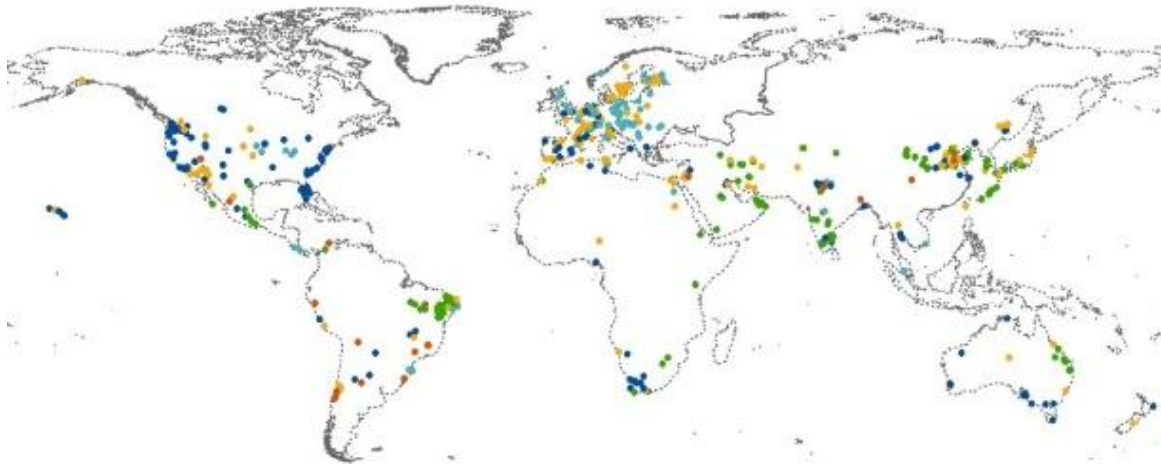
El IGRAC, clasifica las infraestructuras para recargar agua en dos tipos, las técnicas para INFILTRAR y las técnicas para INTERCEPTAR (**Tabla 1**).

**Tabla 1.- Listado de Técnicas MAR**

Técnicas para infiltrar	Técnicas para interceptar
Métodos de dispersión	Modificaciones del canal
Infiltración inducida	Cosecha de lluvia
Pozos, túneles y perforaciones	

La primera de estas consiste en todas aquellas metodologías en las que el origen del agua está controlado, ya sea a través de plantas de tratamiento de agua residual, plantas desalinizadoras o cuerpos de agua superficiales y su interés ingenieril es el diseño de la infiltración.

Por otra parte, las técnicas para interceptar dan mayor peso a la forma de recolectar el agua para su posterior recarga, ya sea mediante la captación de agua de lluvia o la modificación de cauces.



**Figura 3.- Técnicas MAR utilizadas en todo el mundo (modificado del Portal MAR-IGRAC)**

A continuación, se detallan cada una de las metodologías pertinentes a este capítulo (**Tabla 2**), proponiendo en este texto incluir a los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS, “Sustainable Drainage System”) dentro de la técnica Cosecha de lluvia, además, los links de ejemplos dirigen a una serie de videos, notas de divulgación, artículos científicos y localizaciones en Google Maps con casos reales de cada metodología.

Tabla 2.- Clasificación de metodologías MAR (IGRAC, 2013), esquemas de INOWAS (1) y Fernández-Escalante 2022(2).

	Tecnología	Tipología	Esquema	Ejemplo
Técnicas para la infiltración de agua	Métodos de dispersión ("Spreading Methods")	Lagunas y estanques de infiltración		<a href="https://tinyurl.com/Vllelca">https://tinyurl.com/Vllelca</a> <a href="https://tinyurl.com/BanNong">https://tinyurl.com/BanNong</a> <a href="https://tinyurl.com/Ganotetal">https://tinyurl.com/Ganotetal</a>
		Lagunas con humedales de infiltración (SAT)		<a href="https://tinyurl.com/OOmaps">https://tinyurl.com/OOmaps</a> <a href="https://tinyurl.com/SLRCMx">https://tinyurl.com/SLRCMx</a> <a href="https://tinyurl.com/SharmaK">https://tinyurl.com/SharmaK</a>
		Inundación controlada		<a href="https://tinyurl.com/DavisFlood">https://tinyurl.com/DavisFlood</a> <a href="https://tinyurl.com/MemorialBird">https://tinyurl.com/MemorialBird</a> <a href="https://tinyurl.com/suscon01">https://tinyurl.com/suscon01</a>
		Zanjas, surcos y canales		<a href="https://tinyurl.com/FiveCrwns">https://tinyurl.com/FiveCrwns</a> <a href="https://tinyurl.com/RSmithetal">https://tinyurl.com/RSmithetal</a> <a href="https://tinyurl.com/ditches01">https://tinyurl.com/ditches01</a>
		Recarga Incidental por riego		<a href="https://tinyurl.com/UmidaAG">https://tinyurl.com/UmidaAG</a> <a href="https://tinyurl.com/GRIPP01">https://tinyurl.com/GRIPP01</a> <a href="https://tinyurl.com/IrriBang">https://tinyurl.com/IrriBang</a>



	Tecnología	Tipología	Esquema	Ejemplo
Técnicas para la infiltración de agua	Infiltración inducida ("Induced Bank Filtration")	Filtración en las márgenes de los ríos/lagos		<a href="https://tinyurl.com/Berliner01">https://tinyurl.com/Berliner01</a> <a href="https://tinyurl.com/GRIPP02">https://tinyurl.com/GRIPP02</a> <a href="https://tinyurl.com/Schellingetal">https://tinyurl.com/Schellingetal</a>
		Filtración inter-dunar		<a href="https://tinyurl.com/WKdune">https://tinyurl.com/WKdune</a> <a href="https://tinyurl.com/Meijendeldunes">https://tinyurl.com/Meijendeldunes</a> <a href="https://tinyurl.com/Stuyfzand">https://tinyurl.com/Stuyfzand</a>
	Pozos, túneles y perforaciones ("Well, Shaft & Borehole Recharge")	Almacenamiento en acuífero con recuperación (ASR)		<a href="https://tinyurl.com/AustinASR">https://tinyurl.com/AustinASR</a> <a href="https://tinyurl.com/GeorgiaASR">https://tinyurl.com/GeorgiaASR</a> <a href="https://tinyurl.com/BiharASR">https://tinyurl.com/BiharASR</a>
		Almacenamiento en acuífero, transferencia y recuperación (ASTR)		<a href="https://tinyurl.com/SalisburyASTR">https://tinyurl.com/SalisburyASTR</a> <a href="https://tinyurl.com/GisborneASTR">https://tinyurl.com/GisborneASTR</a> <a href="https://tinyurl.com/AusASTR">https://tinyurl.com/AusASTR</a>
		Pozo poco profundo / fosa de infiltración		<a href="https://tinyurl.com/BanShallow">https://tinyurl.com/BanShallow</a> <a href="https://tinyurl.com/Sottanietal">https://tinyurl.com/Sottanietal</a> <a href="https://tinyurl.com/ChinaShallow">https://tinyurl.com/ChinaShallow</a>



	Tecnología	Tipología	Esquema	Ejemplo
Técnicas para interceptar el agua	Modificaciones del canal ("In Channel Modification")	Represas de recarga	<p>(1)</p>	<a href="https://tinyurl.com/EdwardDam">https://tinyurl.com/EdwardDam</a> <a href="https://tinyurl.com/LaPalmaMx">https://tinyurl.com/LaPalmaMx</a> <a href="https://tinyurl.com/Standenetal">https://tinyurl.com/Standenetal</a>
		Represas subsuperficiales	<p>(1)</p>	<a href="https://tinyurl.com/BraSubsurf">https://tinyurl.com/BraSubsurf</a> <a href="https://tinyurl.com/Changetal">https://tinyurl.com/Changetal</a> <a href="https://tinyurl.com/SWHSmar">https://tinyurl.com/SWHSmar</a>
		Represas de arena	<p>(1)</p>	<a href="https://tinyurl.com/TVEdomex">https://tinyurl.com/TVEdomex</a> <a href="https://tinyurl.com/KenyaMar">https://tinyurl.com/KenyaMar</a> <a href="https://tinyurl.com/Ruival">https://tinyurl.com/Ruival</a>
		Represas con serpenteos	<p>(1)</p>	<a href="https://tinyurl.com/SantanaRiver">https://tinyurl.com/SantanaRiver</a>

	Tecnología	Tipología	Esquema	Ejemplo
Técnicas para interceptar el agua	Cosecha de lluvia (Rainwater & Run-off Harvesting)	Captación de agua de lluvia en techos		<a href="https://tinyurl.com/EduriteMar">https://tinyurl.com/EduriteMar</a> <a href="https://tinyurl.com/WaterAidMar">https://tinyurl.com/WaterAidMar</a>
		Barreras y bunds		<a href="https://tinyurl.com/Ruvivial02">https://tinyurl.com/Ruvivial02</a> <a href="https://tinyurl.com/HendriksMar">https://tinyurl.com/HendriksMar</a> <a href="https://tinyurl.com/AguaComp">https://tinyurl.com/AguaComp</a>
		Trincheras		<a href="https://tinyurl.com/AztecaNotMar">https://tinyurl.com/AztecaNotMar</a> <a href="https://tinyurl.com/ChileMar">https://tinyurl.com/ChileMar</a> <a href="https://tinyurl.com/TrenchesKarst">https://tinyurl.com/TrenchesKarst</a>
		Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*		<a href="https://tinyurl.com/Susdrainanim">https://tinyurl.com/Susdrainanim</a> <a href="https://tinyurl.com/CostaEsme">https://tinyurl.com/CostaEsme</a> <a href="https://tinyurl.com/SudsMon">https://tinyurl.com/SudsMon</a>

\* Propuesta de inclusión a la clasificación IGRAC Rainwater & Run-off Harvesting bajo el concepto de captación urbana.  
 Traducción propia realizada para los esquemas de INOWAS



### 2.1.1.- Métodos de dispersión

(**Spreading Methods**) Se utilizan cuando la geología e hidrología del sitio permiten recargar el acuífero directamente desde el nivel del suelo (IGRAC, 2013).

- Lagunas de Infiltración

Son lagunas y estanques excavados para contener volúmenes de agua en zonas planas, con ayuda de pozos de extracción aledaños generan infiltración hacia la zona saturada, una variante de la misma son las Lagunas con Humedales de Infiltración (Soil Aquifer Treatment), las cuales consisten en el uso de lagunas facultativas y humedales para realizar varios procesos de purificación del agua proveniente de plantas de tratamiento de agua residual y posteriormente realizar el proceso de recarga.

- Inundación controlada

Consiste en la generación de infiltración natural mediante la inundación controlada en zonas específicas con agua sobrante de cualquier evento hidrometeorológico extremo.

- Zanjas, Surcos y Canales

Técnica utilizada principalmente en la agricultura para la distribución del agua de riego, mediante estas estructuras poco profundas de diferentes geometrías y tamaños, además de permitir el movimiento del agua, se genera una infiltración natural en el terreno.

- Exceso de Riego

Esta técnica originalmente de recarga incidental, busca tener un nuevo enfoque al estudiar con mayor cuidado la calidad de las aguas de riego y los componentes del suelo, su función es regar en exceso zonas de cultivo durante el barbecho.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los métodos de dispersión, actividad que se repetirá al final de la descripción de los métodos subsecuentes.



**Tabla 3.-Pros y Contras de los diferentes métodos de dispersión**

Modificado de Fernández-Escalante 2022	Lagunas de Infiltración	Inundación controlada	Zanjas, Surcos y Canales	Exceso de Riego
<b>Es deseable</b>	Litología detrítica, aluvial o kárstica Niveles freáticos cercanos a la superficie Fuentes de disponibilidad de agua menor a 10km	Terreno declarado zona inundable Adecuados en zonas costeras con altitud menor de 5 m (marismas)	Trazados lo más rectilíneos posible para evitar llagas y desprendimientos Conveniencia de construir una vía de servicio paralela para el mantenimiento y limpieza Controlar el nivel del agua en el canal con objeto de que la tasa de infiltración sea la mayor posible	Zonas con riesgo de inundación muy bajo o nulo Uso de agua con salinidad baja Acuíferos libres con profundidad del agua menor a 75 m
<b>Pros</b>	Recarga acuífero libre	Uso estacional amortiguando inundaciones	Posibilidad de enterrar tramos mediante tuberías troqueladas en zanjas filtrantes Dispositivo idóneo en zonas de montaña urbana	Zonas con permeabilidad media a muy alta con cualquier litología
<b>Contras</b>	Necesidad de vallado perimetral Necesidad de operación de limpieza y mantenimiento en seco Problemas de anegación en aluviales por desbordamientos	Uso incompatible con canales o balsas de infiltración por riesgo de anegación Necesidad de mantenimiento en caso de labrar caballones En zonas inundables resulta incompatible con la presencia de otros dispositivos de recarga	Efecto barrera para determinadas especies Problemas de estabilidad de taludes según litología Desarrollo de especies vegetales en el fondo del canal	Salinización del suelo con dosis de lavado escasas
<b>Aspectos Medioambientales</b>	Posibilidad uso para toma de agua (incendios forestales) Posibilidad asentamiento avifauna Posibilidad regeneración hídrica ecosistemas húmedos degradados	Alto valor en zonas inundables costeras y de marismas Lugar proclive para asentamiento de avifauna	Efecto barrera Rápido crecimiento de vegetación de ribera	Los retornos en zonas regadas con aguas subterráneas conllevan impactos negativos Los retornos accidentales en zonas urbanas en ocasiones son aguas de baja calidad



## 2.1.2.- Infiltración inducida

(**Induced bank filtration**) Describe la infiltración inducida de agua superficial de un río o lago mediante el bombeo de un pozo, la mejora en la calidad del agua debido al paso subterráneo es el objetivo MAR (IGRAC,2013),

- Filtración en las márgenes de los ríos/lagos

Consiste en descender el nivel freático adyacente al río o lago aportador mediante pozos de bombeo paralelos al mismo, con esto, el cuerpo de agua superficial se infiltra al subsuelo reduciendo la cantidad de contaminantes en el agua mediante geopurificación.

- Filtración interdunar

Es un sistema de dunas en las cuales el agua superficial se infiltra a través del material altamente poroso, su recuperación se hace aguas abajo mediante pozos o galerías.

**Tabla 4.- Pros y Contras de los diferentes métodos de infiltración inducida**

Modificado de Fernández-Escalante 2022	Filtración en las márgenes de los ríos	Filtración Interdunar
<b>Es deseable</b>	Formaciones exclusivamente aluviales Adecuada en la inmediación de embalses Calidad de las aguas aceptable	En facies detríticas cartografiadas como dunas A escasa distancia de la costa Zonas áridas en general
<b>Pros</b>	La técnica permite su asociación de depuradoras de tamaño medio y elevado Idóneo para abastecimiento de ciudades fluviales	Suelen contar con cartografía detallada
<b>Contras</b>	Determinadas sustancias no son reducidas mediante la técnica Problemas de colmatación frecuentes Su ubicación en zonas inundables requiere una alta protección de las captaciones	Dificultad en dunas fosilizadas
<b>Aspectos Medioambientales</b>	Requiere tuberías y canalizaciones que conecten el banco del río con la ciudad	Suelen ser zonas muy frágiles desde el punto de vista ecosistémico





### 2.1.3.- Pozos, túneles y perforaciones

(Well, shaft & Borehole recharge) Como su nombre lo indica, son un grupo de métodos en los cuales la excavación de estructuras por debajo del terreno natural está en función de la profundidad del objetivo a recargar (IGRAC, 2013).

- ASR / ASTR

(ASR) El Almacenamiento en acuífero con recuperación (“Aquifer Storage and Recovery”) consiste en un pozo profundo en dónde de manera directa con el acuífero se extrae o inyecta agua según sea la necesidad del operador.

(ASTR) En el Almacenamiento en acuífero, transferencia y recuperación (“Aquifer Storage, Transfer and Recovery”), el proceso es similar al anterior, la diferencia es que se utiliza un pozo para inyectar agua y metros adelante otro pozo tiene la función de extraer agua.

- Pozo poco profundo / Fosa de infiltración

Los “shallow well/shaft/pit infiltration” son herramientas para acuíferos libres en las cuales no se cuenta con suficiente planicie de infiltración y los primeros estratos cercanos a la superficie tienen capas con baja permeabilidad.

**Tabla 5.- Pros y Contras Pozos, túneles y perforaciones**

Modificado de Fernández-Escalante 2022	ASR / ASTR	Pozo poco profundo / Fosa de infiltración
<b>Es deseable</b>	Niveles freáticos mayores a 50 m Requiere un alto conocimiento del acuífero y de la zona de tránsito	Apropiado en materiales detríticos, kársticos y volcánicos Posibilidad de acondicionar minas abandonadas No apto en masas forestales
<b>Pros</b>	Posibilidad de inyección profunda e inducida	Idóneo alrededor de pequeños pueblos Adecuado en zonas áridas al reducir la evaporación
<b>Contras</b>	Riesgo de salinización Requiere alimentación eléctrica para la inyección Sistema de valvulería complejo	Riesgo de variaciones de la calidad de las aguas por su configuración Riesgo de contaminación apreciable Oxigenación de las aguas y reducción de la tasa de infiltración
<b>Aspectos Medioambientales</b>	Posibilidad de problemas geotécnicos (asentamientos, grietas, etc)	Protección adecuada para evitar caída de ganado y fauna



#### 2.1.4.- Modificación al canal

(In channel modification) Son tecnologías construidas sobre la margen de ríos perennes e intermitentes, las cuales permiten disminuir la velocidad del cauce, interceptar agua o detener el flujo para su posterior recarga al acuífero. (modificado de IGRAC, 2013).

- Represas de recarga

Son embalses o pequeñas presas construidas aguas arriba con cortinas o muros impermeables cuyo propósito es retener el agua superficial para la generación de infiltración al subsuelo en el sitio o su liberación controlada para lograr recarga aguas abajo.

- Represas subsuperficiales

Consisten en zanjas delimitadas con barreras impermeables y rellenas con producto de la excavación, con las barreras se logra modificar el movimiento del agua subterránea generando una elevación del nivel freático, creando así, presas subterráneas.

- Represas de arena

Consisten en la creación de un acuífero artificial de arena y grava aguas arriba de la cortina de un embalse sobre cauces intermitentes, dando lugar a la acumulación de agua en la época de lluvia, con esto, para el periodo de sequías el material granular evitará la evaporación del líquido y se aprovechará el agua atrapada.

- Serpenteos

Son modificaciones al canal en las cuales se busca mejorar la infiltración, ya sea aumentando el ancho del río, nivelando o instalando estructuras que disminuyan la velocidad del flujo, con esto, los tiempos de permanencia del agua en el cauce aumentan junto con el potencial de recarga.



**Tabla 6.- Pros y Contras Modificaciones al canal**

Modificado de Fernández-Escalante 2022	<b>Represas de recarga</b>	<b>Represas subsuperficiales</b>	<b>Represas de arena</b>	<b>Serpenteos</b>
<b>Es deseable</b>	Adecuado en zonas de cabecera de cuenca y áreas forestales Zonas con un cierto riesgo de inundación En un rango altitudinal alto	Adecuados en zonas con afloramientos evaporíticos (incidencia en la calidad) Idóneo incluso en zonas de elevadas pendientes (valles encajados) Posibilidad de crear estructuras tipo aljibe protegidas de la evaporación	En un rango altitudinal alto	Dispositivo típico de formaciones aluviales Zonas de escasa pendiente
<b>Pros</b>	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga gestionada Retención de aludes y movimientos gravitatorios en zonas de montaña	Permiten el abastecimiento a pequeñas poblaciones con filtración Permite corregir problemas geotécnicos en zonas urbanas	Retención de aludes y movimientos gravitatorios en zonas de montaña	Posibilidad de intercalar barreras artificiales (hinchables) y estructuras flotantes
<b>Contras</b>	Retención de sedimentos Problemas de colmatación	Problemas de colmatación Requiere cierto mantenimiento y reemplazo eventual de la arena filtrante	Retención de sedimentos	Impacto visual
<b>Aspectos Medioambientales</b>	Cierto impacto visual negativo Retención de sedimentos	No hay impacto visual Mejora de la calidad de las aguas	Los impactos positivos sobrepasan los negativos	Incidencia en el régimen hidrodinámico del río Posible incidencia en la vegetación de ribera



## 2.1.5.- Cosecha de lluvia y escurrimientos

(**Rainwater & Run-off Harvesting**) Consiste en la recolección de agua de lluvia y escurrimiento en zonas rurales mediante la fabricación de estructuras para su posterior infiltración o aprovechamiento (IGRAC, 2013), en este trabajo de investigación se propone que los sistemas utilizados en zonas urbanas sean integrados en esta categoría.

- Captación de agua de lluvia

Es la técnica más usada en zonas rurales, con ayuda de los techos impermeables de las casas se capta el agua de lluvia.

- Barreras y Muros de gaviones

Con ayuda de materiales impermeables se delimita territorio en zonas rurales para la acumulación de agua de lluvia y escurrimiento con fines de recarga.

- Trincheras

Son estructuras pre fabricadas o excavadas en sitio con las cuales se acumula el agua de esorrentía para su posterior infiltración.

- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Surgen a partir de la problemática de grandes volúmenes de escurrimiento y poca infiltración en las ciudades, su diseño es interdisciplinario con otras áreas como el urbanismo y la arquitectura.

**Tabla 7.- Pros y Contras Cosecha de lluvia y escurrimientos**

Condicionantes de cada dispositivo (Modificado de Fernández-Escalante 2022)	
<b>Es deseable</b>	Reducir agentes contaminantes en el paso del ciclo hidrológico
<b>Pros</b>	Aprovechamiento en zonas con excedentes hídricos Adecuado en zonas urbanas Superficies asfálticas
<b>Contras</b>	El agua se carga de contaminantes nocivos en áreas urbanas Mosquitos y fauna no deseada Escasa conciencia ciudadana
<b>Aspectos Medioambientales</b>	Problemas hidrológicos en avenidas punta Tipologías tan variadas que requieren estudios concretos

### 2.3.- Colmatación o taponamiento

Es el proceso natural existente en todos los proyectos MAR, en el cual se forma una costra o capa (clogging or cake) en las paredes y en el fondo de la superficie de infiltración, obstruyendo los espacios entre los poros y reduciendo drásticamente la capacidad de recarga.

Ya que cada proyecto tiene características únicas, diversos especialistas se encuentran desarrollando métodos empíricos y modelos numéricos para obtener tiempos de formación y acumulación de clogging, algunos factores aprendidos con los años de acuerdo con Fernández-Escalante, 2022, son; la necesidad de tener la misma calidad del agua de recarga con el agua del acuífero, además, es conveniente reducir la generación de turbulencia y el aporte de coloides al momento del contacto entre cuerpos de agua, con esto, la generación de colmatación será menor.

A continuación, se mencionan los tipos de colmatación existentes de acuerdo a su origen:

#### Colmatación mecánica

Se produce debido a la entrada de aire o gas (oxígeno, nitrógeno y/o metano biológico), también por un mal diseño, construcción o falla de la tipología MAR (Martin, 2013). Estas burbujas ocasionan reemplazar el volumen de agua que podría entrar a la formación por volumen de aire.

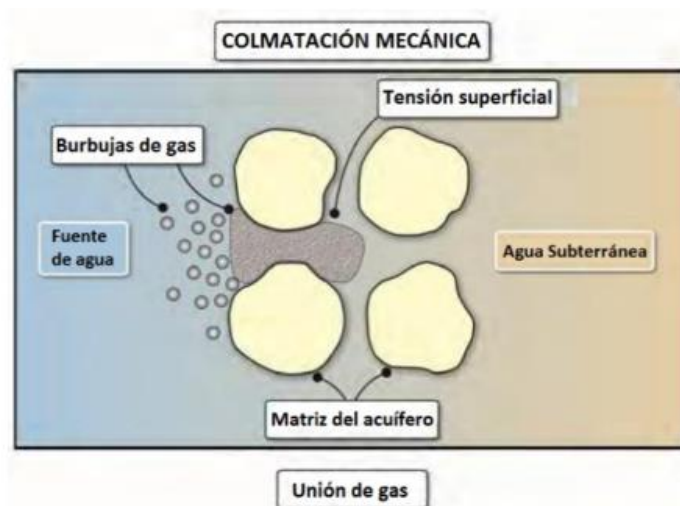
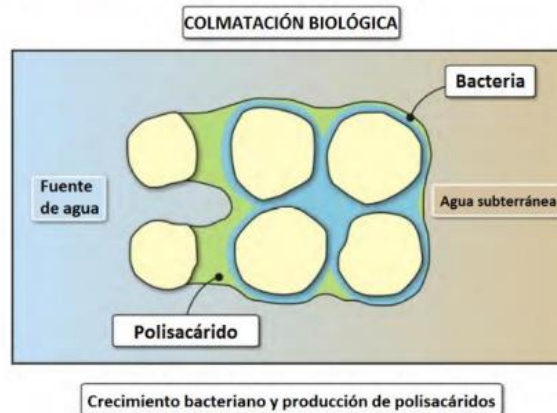


Figura 4.- Esquema de colmatación mecánica (Tomado de López, 2019, fuente: Martin, 2014)

## Colmatación biológica

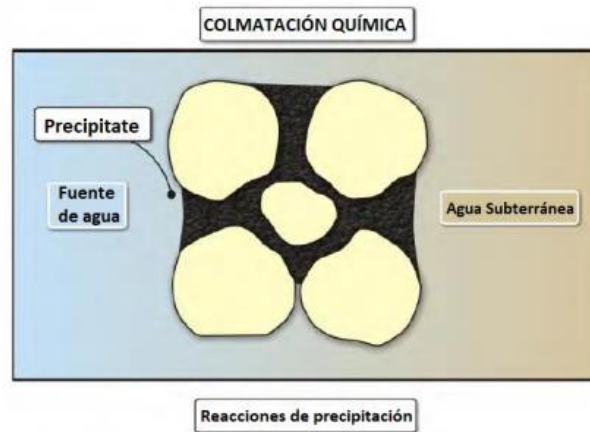
Ya sea por el aumento en la temperatura o el bajo nivel de calidad del agua de recarga, Martin, 2013, menciona que la colmatación biológica incluye el crecimiento de algas, acumulación de flóculos biológicos, hierro, bacterias reductoras de sulfato, producción microbiológica de polisacáridos, arrastre y crecimiento bacteriano.



*Figura 5.- Esquema de colmatación biológica (Tomado de López, 2019, fuente: Martin, 2014)*

## Colmatación química

Las aguas tanto de recarga y nativas en el acuífero, tienen componentes químicos que al no ser similares, ocasionan de acuerdo con Martin, 2013, reacciones geoquímicas que dan como resultado la precipitación de minerales como hierro, aluminio o carbonato de calcio, también la disolución de la matriz del acuífero, la generación en el aumento de la conductividad hidráulica, intercambio iónico, adsorción de iones, reducción de oxígeno, formación de sarro, lo que provoca obstrucción en los espacios entre los poros de las paredes de infiltración.



*Figura 6.- Esquema de colmatación química (Tomado de López, 2019, fuente: Martin, 2014)*

## Colmatación física

Su principal enemigo es la acumulación de sólidos totales disueltos y coloides de la familia de las arcillas, al sedimentarse y estar en contacto con el agua crea paredes similares a los lodos de perforación, los cuales crean una capa que modifica las condiciones naturales del sitio.

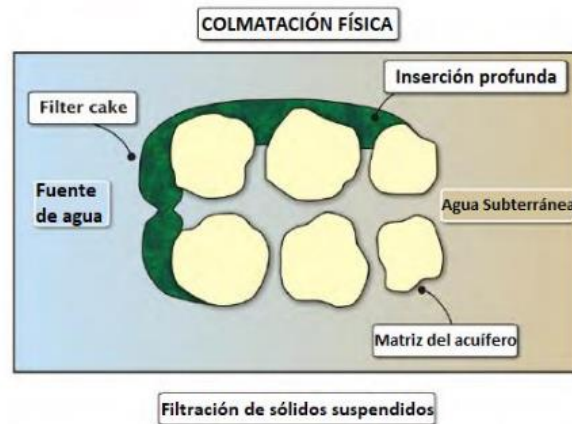


Figura 7.- Esquema de colmatación física (Tomado de López, 2019, fuente: Martin, 2014)

## Diseño y operación para el control de clogging

Con el fin de no perder capacidad de infiltración por colmatación en los sistemas MAR, Martin, 2014, da mayor énfasis al diseño de ingeniería, la intervención química, las prácticas operacionales, el monitoreo constante y la remediación, por ejemplo, una laguna de infiltración (Figura 8) al tener pendientes pronunciadas (1) genera derrumbes y erosión, con grandes profundidades (2), se tiene turbiedad y cambios de temperatura, la zona de recarga (3) al tener contacto directo con el nivel freático (4) acelera las reacciones geoquímicas entre los cuerpos de agua, esto y más eleva los costos de producción MAR.

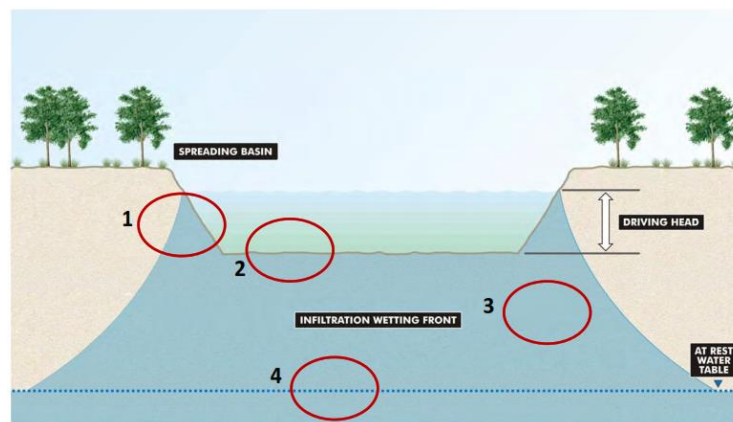


Figura 8.- Diseño para una laguna de infiltración fuente: Martin, 2014

## 2.4.- Fuentes y Calidad de Agua para la Recarga Gestionada

Lo que se busca en cualquier proyecto de recarga gestionada, es contar con la disponibilidad de una o varias fuentes de agua siempre presentes o excedentes, con las cuales, proveer al sistema de recarga, siempre y cuando la calidad de la misma cumpla los lineamientos hidrogeoquímicos particulares para cada caso en estudio, para ello, se pueden disponer de aguas de origen y tipo:

- Fluvial, presente en los ríos perennes e intermitentes
- Pluvial, se produce por la precipitación
- Subterránea, obtenida mediante pozos
- Lagunar, presente en lagos, lagunas o cualquier cuerpo de agua sin movimiento
- Residual, producto del uso doméstico e industrial con un tratamiento listo para rehúso medioambiental positivo
- Marítima, producto de plantas desaladoras
- Mezcla, compuesta de varios orígenes

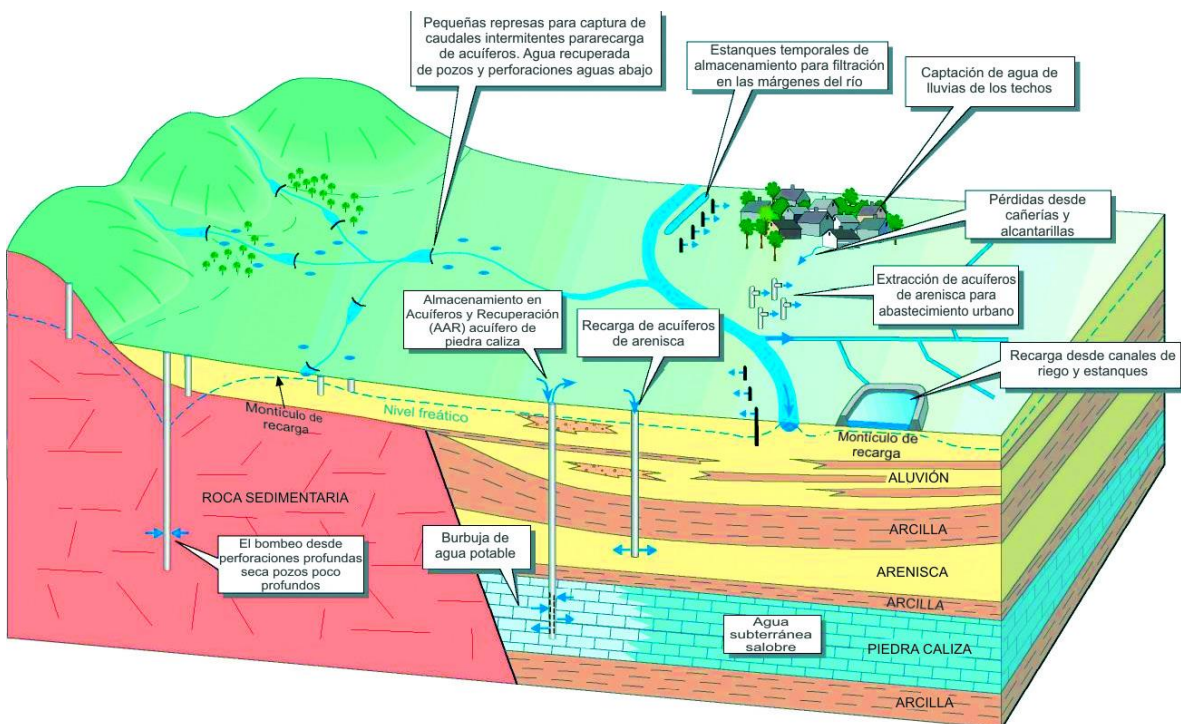


Figura 9.- Diferentes metodologías y fuentes de agua de acuerdo a Dillon & Gale 2005.





## 2.5.- Normatividad

Hasta el momento, de acuerdo con Fernández-Escalante 2022, en el mundo existen 18 países en los cuales se tienen normativas o legislaciones regionales o estatales para regular las técnicas MAR, en ellas se estudian los valores máximos permisibles de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos de las aguas de recarga, existiendo por supuesto, países más estrictos que otros en la cantidad y concentración de elementos a regular, es por eso que, en este apartado se presentan resumidas las leyes y normas mexicanas con el fin de mostrar al lector una recopilación de información referente a la recarga de acuíferos.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el párrafo sexto de su artículo 4º. Establece que; “toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos”.

En el Artículo 27.- “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada “.

### 2.5.1.- Ley de Aguas Nacionales

Es el principal marco de referencia legislativo emanado a partir del artículo 27 de la constitución, en esta ley encontramos que:

Artículo 7. “Se declara de utilidad pública” Fracción I. “La gestión integrada de los recursos hídricos, superficiales y del subsuelo, a partir de las cuencas hidrológicas en el territorio nacional, como prioridad y asunto de seguridad nacional” Fracción II. Establece que la infiltración natural o artificial de aguas para reabastecer mantos acuíferos es acorde con las “Normas Oficiales Mexicanas.

Artículo 44. “Las personas que infiltren o descarguen aguas residuales en el suelo o subsuelo o cuerpos receptores distintos de los sistemas municipales de alcantarillados de las poblaciones, deberán obtener el permiso de descarga respectivo, en los términos de esta Ley independientemente del origen de las fuentes de abastecimiento”.



Artículo 47. Las descargas de aguas residuales a bienes nacionales o su infiltración en terrenos que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos, se sujetarán a lo dispuesto en el Título Séptimo de la presente Ley. “La Autoridad del Agua” promoverá el aprovechamiento de aguas residuales por parte de los municipios, los organismos operadores o por terceros provenientes de los sistemas de agua potable y alcantarillado.

Artículo 85 “Las personas físicas o morales, incluyendo las dependencias, organismos y entidades de los tres órdenes de gobierno, que exploten, usen o aprovechen aguas nacionales en cualquier uso o actividad, serán responsables de realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y en su caso, para reintegrar las aguas referidas en condiciones adecuadas”.

Artículo 88. Las personas físicas o morales requieren permiso de descarga expedido por “la Autoridad del Agua” para verter en forma permanente o intermitente aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.

Artículo 91. La infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos, requiere permiso de “la autoridad del agua” y deberá ajustarse a las Normas Oficiales Mexicanas que al efecto se emitan.

Artículo 119. “La Autoridad del Agua” sancionará conforme a lo previsto por esta Ley, las siguientes faltas”:

XIV. Arrojar o depositar cualquier contaminante, en contravención a las disposiciones legales, en ríos, cauces, vasos, lagos, lagunas, esteros, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, o infiltrar materiales y sustancias que contaminen las aguas del subsuelo.

Para la consulta detallada de las normas que a continuación se mencionan, se podrá realizar a través de los enlaces que aparecerán junto al título de cada norma. Es importante señalar que la NOM-014-CONAGUA-2007 se encuentra en etapa de reestructuración, por lo que el día que entre en vigor la nueva norma, el enlace aquí presente seguramente ya no será válido.



### 2.5.2.- NOM-001-SEMARNAT-2021

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (<https://tinyurl.com/001semarnat>)

En la norma el usuario tiene una serie de tablas en las que se observan los límites permisibles para la concentración de parámetros básicos, contaminantes patógenos y parasitarios, metales y cianuros que las descargas de agua residual no deben de sobrepasar al momento de ser descargadas en los cuerpos receptores establecidos.

También se indica la periodicidad y procedimiento en el que se debe muestrear y analizar el agua de descarga y por último el procedimiento mediante el cual el organismo encargado de evaluar la norma dará fe de conformidad al cumplimiento de la misma.

### 2.5.3.- NOM-014-CONAGUA-2003

Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la Recarga Artificial de Acuíferos con Agua Residual Tratada (<https://tinyurl.com/014conagua>).

Los puntos importantes en esta norma son los requisitos que se deben de cumplir en materia de estudios previos, calidad del agua de recarga y del acuífero y la periodicidad de los muestreos.

En la norma señalan mas no limitan el contenido del estudio con lo siguiente:

- Mapa de configuración y de profundidad de niveles piezométricos del (los) acuífero(s) que subyacen en la zona del proyecto de recarga.
- Perfil estratigráfico, obtenido mediante perforaciones exploratorias y sondeos geofísicos.
- Características hidráulicas del acuífero que se pretende recargar.
- Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua subterránea nativa.
- Captaciones de agua subterránea existentes o por construir (características).
- Determinación de la posible conexión hidráulica entre acuíferos.
- Fuentes de contaminación aledañas al área de recarga.



El nivel de exigencia de la norma está en función de dos casos, cuando existen captaciones para el suministro público urbano o doméstico mayores a un kilómetro y a menos de un kilómetro, para este último caso además del contenido anterior, se debe de cumplir con lo siguiente:

- Realizar un proyecto piloto de recarga in situ con duración suficiente para determinar el comportamiento del sistema
- Modelación numérica hidrogeológica e hidrogeoquímica del proyecto
- Respetar los tiempos de residencia del agua dentro del acuífero antes de su extracción (Recarga superficial subsuperficial, distancia mínima de 150 m, tiempo de residencia 6 meses / Recarga directa, distancia mínima 600 m, tiempo de residencia 12 meses)

Es importante señalar que no se permiten proyectos de recarga en zonas con antecedentes de contaminación y en terrenos sin cobertura edáfica y con alta permeabilidad, para el diseño de pozos se debe consultar la NOM-003-CONAGUA-1996.

Los parámetros de calidad del agua residual tienen que ser óptimos para el consumo humano.

#### 2.5.4.- NOM-015-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. (<https://tinyurl.com/015conagua>)

Similar a la norma anterior, en este caso se solicitan estudios de caracterización del sitio, planes de muestreo, tablas con límites permisibles de la calidad del agua y sugerencias de operación del sistema.

En las especificaciones de las características de las obras se observa que los dispositivos de recarga deben de contar con un mecanismo de cierre manual o automático, las zonas de captación deben estar libres de residuos y los pozos deben tener una distancia mínima de 5 m entre el fondo de la obra de ingeniería y la superficie freática con el fin de tener una geopurificación natural. La calidad del agua solicitada para recarga en esta norma es menos estricta que la NOM-014, más no significa que se pueda recargar agua de mala calidad.



## Referencias

### **IGRAC**

<https://ggis.un-igrac.org/view/marportal>

### **INOWAS**

<https://inowas.com/category/mar-methods/>

### **Aparicio, 1989**

Aparicio F., 1989, Fundamentos de Hidrología de Superficie, México, Grupo Noriega Editores.

### **ASCE, 2020**

Standard Guidelines for Managed Aquifer Recharge, 2020, American Society of Civil Engineers, United States of America.

**Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**, 5 de febrero de 1917.

### **Dillon & Gale, 2005**

Dillon P., Gale, I., 2005, Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas, París, UNESCO.

### **Fernández-Escalante, 2022**

Fernández-Escalante, E., 2022, Curso Acción formativa, teórica y práctica sobre Hidrogeología Aplicada: Técnicas de Recarga Gestionada, Instituto de Ingeniería, UNAM.

### **IGRAC, 2013**

International Groundwater Resources Assessment Centre MAR Portal <https://www.un-igrac.org/>

### **LAN, 1992**

Ley de Aguas Nacionales, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 01 de diciembre de 1992, Última reforma publicada DOF 06-01-2020.

### **Lesser et al 2011**

Lesser-Carrillo L, Lesser-Illades J, Arellano-Islas S, González-Posadas D, Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.28, núm. 3, 2011, p. 323-336.

### **López, 2019**

López Martínez, L., Anteproyecto de Recarga Artificial del Acuífero en la Zona Federal del Ex Lago de Texcoco, Tesis de Licenciatura, Ciudad Universitaria, México.

### **NOM-001-SEMARNAT-2021**

Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación

### **NOM-014-CONAGUA-2003**

Norma Oficial Mexicana, NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.



**NOM-015-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.

**Martin, 2013**

Martin, R., (ed.) (2013) Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Aquifer Recharge, Australia.

**Martin, 2014**

Martin, R., 2014, Curso Clogging During Managed Aquifer Recharge, Instituto de Ingeniería, UNAM.

**UNESCO, 2021**

Chapter I Introduction. Pp. 21-28 in Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G., and Dillon, P., (eds.), 2021. Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability. Paris, UNESCO.



### Capítulo III

## FACTIBILIDAD DE LA RECARGA GESTIONADA DE ACUIFEROS

*Serpenteos sobre el Santana River, Orange County, USA, Modificado de Google Earth 03/2020*

Núñez-Jiménez, 1997, define **factibilidad** como “la posibilidad de que un proyecto se lleve a cabo en forma exitosa. Se dice que un proyecto es factible cuando la solución escogida para realizarlo se considera que es la más adecuada desde todos los aspectos que afectan un proyecto: mercado, técnicos, financieros, institucionales, administrativos y socioeconómicos”.

Para lograr seleccionar la solución correcta, Arshad, et al. 2014, en su figura 2 señalan los siguientes aspectos que afectan un proyecto MAR: hidrológicos, hidrogeológicos, riesgos medioambientales, mecanismos regulatorios, ingeniería, finanzas y partes involucradas.

En cambio, para una etapa temprana en la factibilidad MAR, Imig et.al., 2022, desarrollan una metodología que aquí se explica y en el capítulo 5 se llevará a la práctica. Se recomienda al lector consultar las siguientes guías en materia internacional.

- Guía Metodológica, Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos, Ministro de Agricultura, Chile.
- Guidelines for Managed Aquifer Recharge (MAR) – Health and Environmental Risk Management, 2009, Victoria, Australia.
- A Water Quality Guide to Managed Aquifer Recharge in India, 2014, UNESCO .



### 3.1.- Metodología para la evaluación de factibilidad MAR

#### Balance hídrico

El primer paso consiste en conocer las necesidades del sitio en estudio, verificar mediante la revisión literaria la cantidad de agua en explotación, sus diferentes usos, las entradas, las salidas, es decir, definir un objetivo por el cual se busca utilizar la técnica MAR como solución al o los problemas hídricos que afectan el lugar.

#### Fuentes y calidad de agua disponibles

Retomando el *subcapítulo 2.4 Fuentes y Calidad de Agua para la Recarga Gestionada*, se realiza una revisión literaria para la selección del origen del agua a utilizar y se evalúan de manera general cuestiones como la periodicidad de la disponibilidad del líquido y sus propiedades fisicoquímicas y bacteriológicas.

#### Hidrogeología

La hidrogeología es el fundamento dentro de los aspectos de factibilidad a considerar, ya sea un marco conceptual generalizado para idealizar el anteproyecto de recarga o toda una serie de estudios a detalle para la implementación y seguimiento del prototipo MAR, para el caso de factibilidad de anteproyecto podemos estudiarlo de la siguiente manera:

- Aspectos hidrogeológicos regionales. Consiste en recabar información sobre el sitio en estudio, para el caso de la República Mexicana, la CONAGUA tiene con libre acceso documentos denominados “Actualización de la Disponibilidad de Agua” para cada acuífero del país.
- Transición marco regional a local. Se busca complementar la información regional por medio de otras fuentes de información, con esto logramos detallar materiales geológicos superficiales con alta permeabilidad, estratos a profundidades intermedias con gran potencial de recarga, una o varias formaciones hidrogeológicas profundas objetivo, o simplemente una combinación de todos los casos.





## **Dispositivos MAR**

Mediante el uso de tablas y/o diagramas (ejemplificado en el capítulo 5), se busca zonificar los diferentes tipos de dispositivos MAR aplicables, para esto, se deberá integrar la información del balance hídrico, fuentes y calidad de agua disponible e hidrogeología. Obviamente, cada locación tiene características únicas, por lo que el desarrollador de proyecto tomará la decisión de sólo utilizar esta información o requerir complementar la misma antes de la etapa de desarrollo a detalle.

## **Evaluación y mitigación de riesgos**

En este paso debemos idealizar cualitativamente los posibles riesgos existentes antes, durante y después de la implementación de nuestro dispositivo de recarga, además, tener identificado una serie de posibles tratamientos ante el riesgo, ya que una mala evaluación y gestión del mismo, pone en peligro la calidad del agua del acuífero en recuperación.

## **Localización del dispositivo MAR**

El uso de Sistemas de Información Geográfica es fundamental para esta etapa en donde se unifican los dos puntos antes mencionados para generar un mapa final, logrando con él, un comienzo en la investigación de factibilidad a detalle.

## **Investigación detallada**

Una vez seleccionado el motivo por el cual vamos a implementar un dispositivo MAR, el sitio para la construcción y las fuentes de calidad de agua, es momento de cuantificar costos vs beneficios en comparación a otras técnicas que también puedan resolver la problemática analizada. En IIUNAM 2016, mencionan los siguientes costos que se deberán tomar en cuenta:

- Investigación hidrogeológica
- Adquisición de terreno
- Instalaciones de pretratamiento
- Instalaciones auxiliares
- Instalaciones de recarga
- Instalaciones de control y seguimiento
- Explotación y conservación



Al tener idealizado el posible método de recarga gestionada a implementar, es momento de corroborar su factibilidad hidrogeológica, para ello es necesario realizar estudios geofísicos, ejecutar sondeos geotécnicos y/o pozos exploratorios, realizar pruebas in situ de permeabilidad, pruebas de bombeo, piezometría, direcciones de flujo, zonas de descarga natural, mapeo de pozos aledaños y de posibles fuentes contaminantes, análisis fisicoquímicos del agua de recarga y del agua nativa (acuífero), creación de modelos numéricos del flujo e hidrogeoquímicos.

Si la fuente de agua es de origen pluvial y fluvial, es necesario realizar un estudio hidrológico a detalle. Si se decide realizar modificaciones al canal, se complementará la base de datos con la elaboración de un estudio potamológico. En cambio, al considerar otras fuentes de abastecimiento, en este punto se evalúan; La localización de nuestra PTAR, desalinizadora, pozo de agua, etc. La ubicación puntual del dispositivo MAR. La infraestructura y diseño hidráulico necesario para la conducción del agua de recarga al dispositivo.

En el subcapítulo 2.5.- *Normatividad*, revisamos las leyes en materia de agua y el organismo encargado de regular su funcionamiento, con esto, el especialista desarrollador del proyecto MAR tiene que evaluar el correcto cumplimiento de las mismas con el fin de evitar paros en la operación y obviamente, problemas ambientales.

Es importante que la parte técnica y operativa de cualquier proyecto, realicen un manual de operación y mantenimiento institucional para cada dispositivo MAR, creando una serie de normas y procedimientos que se complementarán con la experiencia obtenida conforme el pasar de los años.

Al valorar todos los escenarios de riesgo y mitigación a detalle, reiterando que cada proyecto es único, se deberán de realizar mapeos de focos de infección directo e indirecto, proyección de mapas de inundación y avenidas, simulación de la dirección y velocidad del flujo subterráneo y revisión constante de maquinaria empleada para el mantenimiento MAR.

Durante todo el proceso de investigación a detalle, se tendrá que invitar a los beneficiarios del recurso hídrico, ya que sus funciones consisten en exigir agua de excelente calidad, a un bajo costo y de saber elegir adecuadamente a los funcionarios que se encargarán de generar políticas públicas favorables y remuneraciones fiscales para el desarrollo de más proyectos como el estudiado en la presente tesina.



## Referencias

### **Arshad et al., 2014**

Arshad M., Guillaume J., Ross A., Assessing the Feability of Managed Aquifer Recharge for Irrigation under Uncertainty, *Water* 2014, 6, 2748-2769, doi:10.3390/w6092748.

### **Fernández-Escalante, 2022**

Fernández-Escalante, E., 2022, Curso Acción formativa, teórica y práctica sobre Hidrogeología Aplicada: Técnicas de Recarga Gestionada, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México.

### **Imig et.al., 2022**

Anne Imig, Sophia Klausner, Kristen Welsh-Unwala, Arno Rein, Methodology for identifying feasibility of managed aquifer recharge on the example of Grand Bahama, 11th International Symposium on Managed Aquifer Recharge, April 2022, Long Beach California.

### **IIUNAM, 2016**

Instituto de Ingeniería UNAM, 2016, Memorias del Taller “Recarga Artificial del Acuífero del Valle de México”, Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

### **Nuñez-Jiménez, 1997**

Nuñez-Jiménez, E., 1997, Guía para la preparación de Proyectos de servicios públicos municipales, Instituto Nacional de Administración Pública, A.C.



## Capítulo IV

# EXPERIENCIAS DE RECARGA GESTIONADA

*Sistema SAT, San Luis Río Colorado, Sonora México, copyright Jorge Ramírez Hernández*

Las definiciones de **experiencia** según la RAE consisten en; 1. hecho de haber sentido, conocido o presenciado alguien algo, 2. Práctica prolongada que proporciona conocimiento o habilidad para hacer algo, 3. Conocimiento de la vida adquirido por las circunstancias o situaciones vividas, 4. Circunstancia o acontecimiento vivido por una persona, 5. Experimento.

Todas las vivencias positivas y negativas, son herramientas para la toma de decisiones al momento de resolver problemas. Para nuestra área de la hidrogeología aplicada, alrededor del mundo existen infinidad de casos MAR, desde el proyecto casero de infiltración de agua de lluvia, hasta el mega proyecto de las nuevas ciudades verdes, esta infinidad de vivencias, desgraciadamente no siempre son compartidas, dificultando así, la recopilación de experiencias.

Para el caso de México, el Instituto de Ingeniería (IIUNAM) y la Red del Agua de la Universidad Nacional Autónoma de México, se han dado a la tarea de recopilar la información creando fichas técnicas de los dispositivos MAR implementados en el territorio nacional, con esto, el objetivo primordial es y será tener libre acceso a la información.

A continuación, se presentan tres ejemplos de manera muy reducida para que el lector pueda generar su propio criterio sobre la recarga intencionada de acuíferos.



## 4.1.- En el mundo

### Ciudad de Sidfa, Assiut, Egipto

La Ciudad de Sidfa se localiza al norte de Egipto dentro del Valle del Nilo, el objetivo del proyecto fue abastecer con agua potable alrededor de 30,000 residentes mediante un sistema de seis pozos con una profundidad de 60 m e instalados de 20 a 40 m de distancia de las márgenes del Río Nilo. (Shamruki et al., 2021).

De acuerdo con Shamruki et al., 2021, todo comienza en los años 60s, los residentes de la ciudad recibían agua a través de pipas provenientes de un pozo kilómetros alejado del Nilo, esto fue hasta que comenzaron los problemas de contaminación por hierro, manganeso y coliformes fecales, problemas típicos en las aguas subterráneas egipcias. En los años 90s, la ciudad construyó una pequeña planta para coagular-filtrar-desinfectar el agua del Río Nilo, la cual no tuvo la capacidad suficiente para abastecer Sidfa. Por lo que, en el año 2004 se construyó la batería de pozos para el sistema de filtración en las márgenes de los ríos (RBF). Después de varios años de operación, se estableció en 2018 que la nueva planta de tratamiento de agua superficial (PTAS) fuera la encargada de abastecer la ciudad (con capacidad 10 veces mayor al sistema RBF) permitiendo que la batería de pozos sea utilizada para casos de alta demanda o en situaciones en las que la planta de tratamiento tiene problemas con los altos niveles de sólidos suspendidos ocasionados por avenidas y derrames de sustancias químicas.

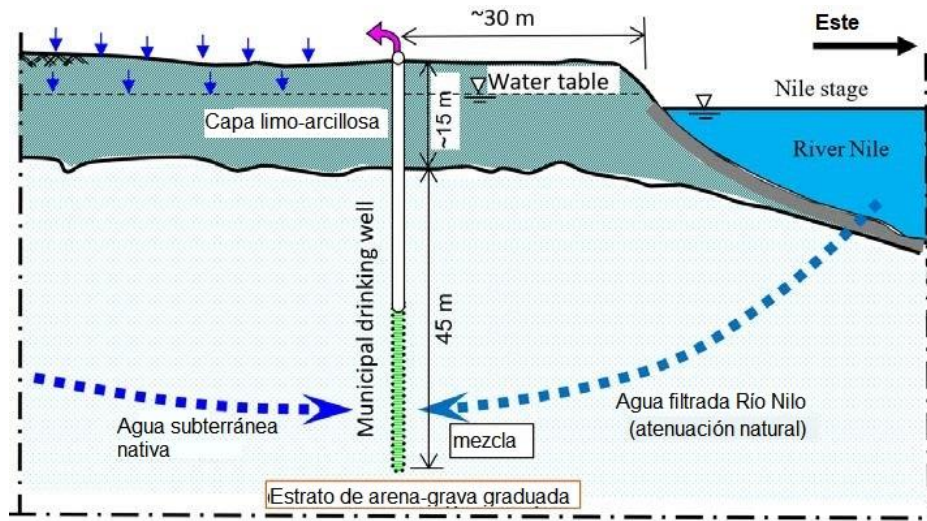
**Tabla 8.- Generalidades Sidfa, Assiut**

Modificado de Shamrukh et al., 2021

<b>Localización</b>	26°58.265'N, 31°22.991'E a 26°58.343'N, 31°23.026'E
<b>Responsable</b>	Assiut Company for Water and Wastewater (Branch company)
<b>Origen del agua</b>	Río Nilo y agua subterránea
<b>Técnica</b>	Filtración en las márgenes de los ríos (RBF)
<b>Año de inicio</b>	2004
<b>Extracción</b>	2.19 Mm <sup>3</sup> /año
<b>Uso final</b>	Agua potable
<b>Tipo de acuífero</b>	Semiconfinado, Arena-grava aluvial graduada del Pleistoceno
<b>Red de monitoreo</b>	En los pozos de extracción
<b>Ventaja principal</b>	Abastecimiento de agua potable sostenible

Desde el año de inicio de operaciones, Shamrukh et al., 2021, exponen que el sistema no ha mostrado mala calidad en el agua en extracción, observando que los contaminantes presentes en el río son retenidos en el subsuelo, además, la recarga

inducida (**Figura 10**) también disuelve las concentraciones de hierro presentes en el agua nativa del acuífero, la mejora de la calidad (**Tabla 9**) es debido a la mezcla entre el agua de recarga inducida y la natural. En cuestiones de consumo de energía, el sistema necesita de 0.3KWh/m<sup>3</sup>, cantidad mucho menor a la requerida por la PTAS, la producción de agua potable mediante RBF estimada es de \$0.03 dólares/m<sup>3</sup>, esto la convierte en la más económica en comparación a la producción mediante pozos profundos los cuales tienen problemas de contaminación y posterior operación, lo más probable es que en un futuro se tengan más sistemas como este operando a lo largo del Río Nilo.



**Figura 10.- Sección hidrogeológica proyecto Sidfa, traducido de: Shamrukh et al., 2021**

**Tabla 9.- Calidad del agua Marzo-Abril 2016, modificado de Shamruki et al., 2021**

Parametro (Mg/L o mencionado)	Río Nilo (Ave, (SD))	RBF; pozos de extracción	Agua subterránea nativa	Estándares para agua potable
pH	7.70*(0.1)**	7.75 (0.02)	7.8 (0.04)	6.5-8.5
Turbiedad (NTU)	6.7 (0.75)	0.5 (0.15)	0.3 (0.14)	1.0
TDS	150 (6.10)	250 (5.60)	530 (5.50)	1000
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	110 (2.40)	161 (2.60)	247 (3.00)	500
Fe	0.05 (0.01)	0.07 (0.01)	0.27 (0.40)	0.3
Mn	0.07 (0.02)	0.11 (0.03)	0.33 (0.20)	0.4
Ca	24 (1.60)	28 (1.00)	45 (1.70)	-
Mg	16 (1.30)	22 (1.00)	31 (1.70)	-
K	4.6 (0.50)	5.0 (0.40)	6.1 (1.20)	-
Cl	20 (1.00)	24 (0.80)	37 (1.20)	250
SO <sub>4</sub>	24 (2.20)	38 (1.50)	71 (2.20)	250
NO <sub>3</sub>	3.2 (0.70)	7 (1.30)	22 (2.50)	45
PO <sub>4</sub>	0.8 (0.12)	1.0 (0.20)	1.1 (0.22)	-
Coliformes totales (cfu/100ml)	970 (10.00)	1.0 (0.30)	0.8 (0.70)	2
E-Coli (cfu/100ml)	225 (5.45)	0.0 (0.02)	1.0 (0.70)	No permitido

\* Valor promedio (Ave), \*\*Desviación estándar (SD) (para todos los valores en la tabla), Marzo-Abril 2016



## 4.2.- En México

### San Luis Río Colorado (SLRC), Sonora

La ciudad de San Luis Río Colorado, es una ciudad transfronteriza en el desierto de Sonora con una precipitación media anual de 55 mm, sus principales fuentes de abastecimiento de agua son la superficial proveniente del Delta del Río Colorado (gestionado por los Estados Unidos) y la subterránea con un acuífero sobreexplotado, de acuerdo con Campuzano et al., 2021, la demanda de agua es de 31.5 Mm<sup>3</sup>/año con un uso del 77% para la agricultura.

La historia del proyecto según Campuzano et al., 2021, inicia con la descarga de la red de drenaje de la ciudad hacia el lecho seco del Río Colorado, generando contaminación, por lo que en el año de 2005 se construyó una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) con un caudal promedio de 8.75 Mm<sup>3</sup>/año, el proyecto piloto de infiltración consistió en una laguna de 28 m<sup>2</sup> y 4 pozos de observación con monitoreo de las tasas de infiltración y calidad de las aguas, dando lugar a la posterior construcción del proyecto a gran escala.

**Tabla 10.- Generalidades SLRC**

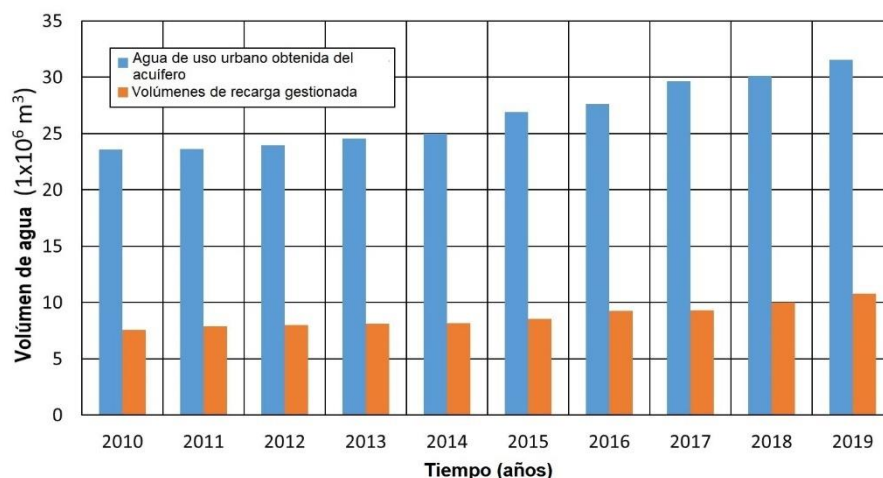
Modificado de Campuzano et al., 2021

<b>Localización</b>	32°23.502´N, 114° 49.521´O Frontera Mx-EUA
<b>Responsable</b>	OOMAPAS
<b>Origen del agua</b>	Agua Residual tratada
<b>Técnica</b>	12 lagunas de infiltración (1.21 Ha área c/u)
<b>Año de inicio</b>	2007
<b>Recarga</b>	~10.5 Mm <sup>3</sup> /año
<b>Uso final</b>	Agricultura, Recuperación en el acuífero
<b>Tipo de acuífero</b>	Depósitos aluviales del Cuaternario
<b>Red de monitoreo</b>	Pozos de observación
<b>Ventaja principal</b>	Reúso sostenible de agua en zonas áridas

De manera general, los beneficios presentados por Campuzano et al., 2021 son la respuesta hidrogeológica favorable en regular los niveles piezométricos en el acuífero sobreexplotado (**Figura 11**), el agua recuperada es recomendada solo para uso agrícola (**Tabla 11**), la transferencia de agua entre las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración (sin laguna de aeración) es gravitacional, por lo que no se requiere de energía eléctrica adicional a la demanda de la PTAR, los costos totales de recarga (personal operativo,



remoción de colmatación en lagunas, monitoreo del nivel de las aguas, análisis químicos de las muestras de los pozos de observación, gastos por verificación de un laboratorio certificado externo) se estimaron para el año 2017 en \$0.02 dólares por m<sup>3</sup>, logrando ser la alternativa más barata en comparación a la segunda opción de realizar un tratamiento secundario con un monto de \$0.06 dólares por m<sup>3</sup>.



**Figura 11.- Comparación de volúmenes en extracción y recarga SLRC, traducción propia, fuente: Campuzano et al., 2021**

**Tabla 11.- Calidad anual del agua de entrada y salida a la PTAR y un pozo de observación de 2010-2019, modificado de Campuzano et al., 2021**

Parametro*	PTAR entrada		PTAR salida		NOM-001 conc**	Pozo de observación (25m)		NOM-014 conc**
	conc	s.d.	conc	s.d.		conc	s.d.	
Turbiedad (NTU)	274.5	25.1	136.5	16.6	n/s	7.24	1.1	5
SST (mg/l)	99.1	15.3	70.6	8.9	75	1.69	0.4	n/s
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	2,400,000	n/s	260.6	30.86	1,000	0	n/s	0
BDO (mg/l)	154.7	19.26	25.80	4.59	75	12.0	1.04	n/s
Hierro (mg/l)	0.147	0.016	0.16	0.013	0.2	0.19	0.005	0.3
Manganeso (mg/l)	0.27	0.022	0.28	0.012	n/s	0.28	0.033	0.15
Cloruro (mg/l)	477.3	24.5	510.6	10.3	n/s	541.3	20.59	250

\*conc, concentraciones obtenidas a partir de la media anual basada en muestras tomadas cada 15 días desde 2010 hasta 2019 (~240 muestras, 24 cada año durante 10 años). s.d., desviación estándar. n/s, no especificado  
\*\*NOM-001 los valores son el nivel máximo de concentración permitido para el riego agrícola dispuesto en embalses artificiales. NOM-014 valores de concentraciones máximas permitidas para recarga de acuíferos.

Gracias a los años en operación de la planta y la participación de diversos actores de la sociedad, en el año 2022, la CONAGUA comenzó la reevaluación de la NOM-014, ya que, a partir del año de su implementación, los proyectos MAR en México disminuyeron considerablemente debido a la exigencia en los valores máximos permisibles y a la falta de estímulos a los organismos públicos o privados encargados de proyectos de recarga.

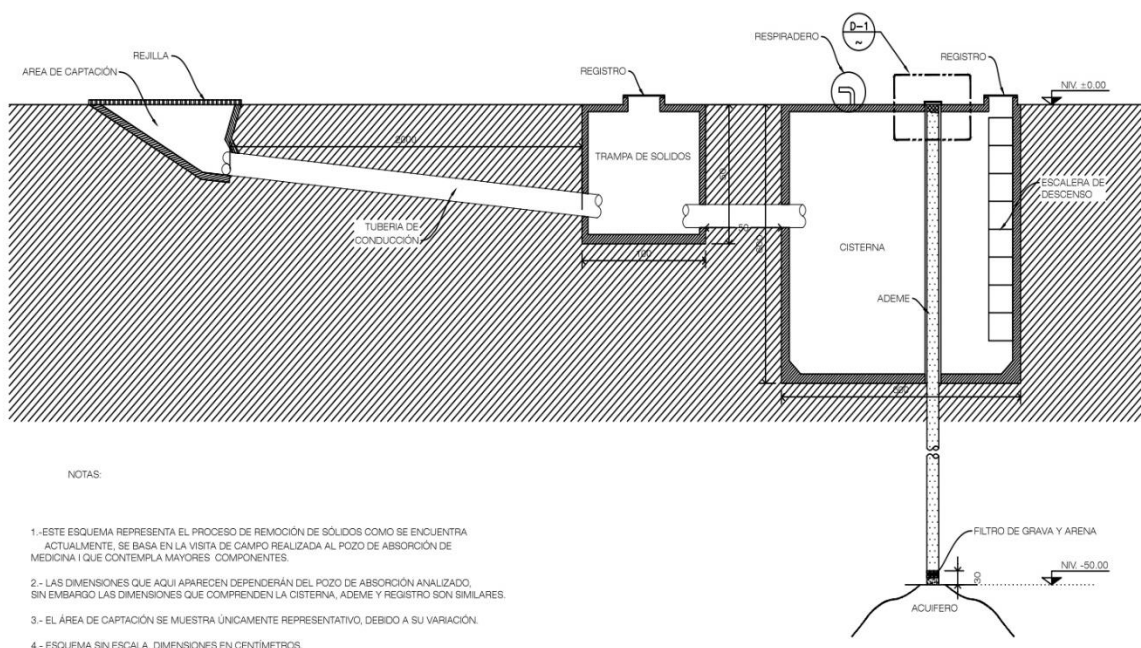


### 4.3.- En el Acuífero de la Ciudad de México

#### Ciudad Universitaria (CU)

El campus central de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se localiza sobre coladas basálticas producto de la erupción del volcán Xitle (Sierra del Chichinautzin) al sur de la Ciudad de México. De acuerdo con PUMAGUA, 2017, el balance hidráulico de ese año para el complejo universitario con una población aproximada de 185,000 personas fue de 2.35 Mm<sup>3</sup>, distribuidos de la siguiente manera: extracción promedio en 3 pozos concesionados a la UNAM 76 lps (litros por segundo), consumo en edificios 33 lps (43.4%), riego áreas verdes 17 lps (22.4%) y pérdidas en el sistema 26 lps (34.2%).

Según Rosas, 2013, entre los años 1994 a 1996, se realizaron perforaciones a 50 m de profundidad aproximadamente y la construcción de cisternas de almacenamiento de agua de lluvia en toda la ciudad universitaria con el fin de reducir los problemas de encharcamiento y dar solución a la escasez hídrica en el sitio, en su trabajo de investigación menciona la existencia de 9 pozos solamente, señalando la ausencia de información para la localización de más estructuras.



**Figura 12.- Diagrama de Recolección de agua pluvial en Ciudad Universitaria, Fuente: Rosas, 2013**



**Tabla 12.- Generalidades Ciudad Universitaria, CDMX**

Elaboración propia con información de Rosas, 2013 e IIUNAM, 2017

<b>Localización</b>	19° 19.793'N, 99° 11.354'O
<b>Responsable</b>	DGO UNAM
<b>Origen del agua</b>	Agua pluvial
<b>Técnica</b>	Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)
<b>Año de inicio</b>	1994
<b>Recarga</b>	5 hasta 41 litros por segundo dependiendo el pozo
<b>Uso final</b>	Recuperación en el acuífero
<b>Tipo de acuífero</b>	Libre, volcánico del Cuaternario
<b>Red de monitoreo</b>	Sin información
<b>Ventaja principal</b>	Desalojo de agua de lluvia

Es importante señalar que la ingeniería de pozos se realizó antes de la publicación de la NOM-015, por lo que este y otros proyectos en el Valle de México requieren de una reestructuración adecuada.

### **Breve resumen de experiencias MAR en CDMX**

Dentro del inventario de Palma et.al., 2022, desgraciadamente se aprecia la diferencia entre el interés de realizar proyectos antes y después de la publicación oficial de la normativa mexicana vigente, la cual es perfectamente razonable su interés de cuidar la integridad de las aguas subterráneas, pero su rigurosidad entorpece dar solución a los efectos secundarios de la sobreexplotación.

De manera extremadamente breve, algunos años importantes en proyectos recopilados por Palma et.al., 2022 son:

1943-1960, modificación Río Magdalena para inundación controlada (73.5 Mm<sup>3</sup>). 1953-1958, primer pozo de absorción San Fernando (0.30 Mm<sup>3</sup>). 1977, comienzo de pozos de inyección con agua potable para controlar hundimientos en el edificio de Palacio Nacional. 1989-1992, programa general de recarga artificial para la Ciudad de México utilizando pozos de inyección con agua residual tratada, (10.90 Mm<sup>3</sup>). 2009, represas superficiales sobre el Río Magdalena (0.5 Mm<sup>3</sup>). 2017, pozos de inyección con agua residual en Chapultepec, proyecto que se realizó una visita técnica en junio de 2022 y los pozos no se encontraban en operación.



## REFERENCIAS

### **Campuzano et al., 2021**

Campuzano-Chávez, R., Hernández-Aguilar, M., Palma-Nava, A., Ramírez-Hernández, J., 2021, Case Study 3: Managed Aquifer Recharge to recycle water for agricultural use in San Luis Río Colorado, Sonora, México, Pp. 105 – 111 in Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G., and Dillon, P., (eds.), 2021. Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability. Paris, UNESCO.

### **IIUNAM, 2017**

Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2017, Ficha técnica pozos de absorción Ciudad Universitaria, Documento Interno.

### **Palma et.al., 2022**

Palma-Nava, A.; Parker, T.; Carmona-Paredes, R.B., 2020, Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area, Groundwater, NGWA, <https://doi:10.1111/gwat.13237>

### **PUMAGUA, 2017**

PUMAGUA, 2017, Informe de avances Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM, Ciudad Universitaria, México.

### **RAE**

Real Academia Española, Diccionario en línea (<https://dle.rae.es/>).

### **Rosas, 2013**

Rosas, C., 2013, Diagnóstico de la infiltración de agua pluvial en Ciudad Universitaria mediante los pozos de absorción, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.

### **Shamrukh et al., 2021**

Shamrukh, M., Abdel-Lah, A., 2021, Case Study 22: Sustainable drinking water supply from riverbank filtration of the Nile for Sidfa, Egypt, Pp. 277 - 283 in Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G., and Dillon, P., (eds.), 2021. Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability. Paris, UNESCO.

## Capítulo V

# POTENCIAL DE RECARGA GESTIONADA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

*Fotografía modificada de pexels.com Autor: Santiago López*

La Ciudad de México tiene 8.92 millones de habitantes y 4.2 millones de población flotante para una superficie de 1,485 km<sup>2</sup>, lo que corresponde al 7.5% de la población del país y un territorio nacional de 0.08%, referente a los recursos hídricos y condiciones del suelo, el déficit estimado de agua potable se estima en 3m<sup>3</sup>/s, la sobreexplotación del acuífero es de 17.79 m<sup>3</sup>/s, la disminución de los niveles de agua subterránea es de 1 m/año y el hundimiento del subsuelo llega a alcanzar los 30 cm/año (SACMEX, 2019).

En la actualización del inventario de proyectos MAR (IIUNAM-Red del Agua) realizado por Palma et. al., 2022a, recolectan un total de 23 proyectos para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, de los cuales tristemente 14 operaron en el pasado durante un corto periodo de tiempo, mientras que el resto corresponden a prototipos y anteproyectos que no se tiene mayor información o siguen sin concretarse.

A lo largo del presente trabajo de investigación se ha revisado las características de los dispositivos de recarga gestionada, la normatividad mexicana aplicable, la metodología a seguir para la evaluación de factibilidad y algunos ejemplos de proyectos en los que se aprovecha la geopurificación o los filtros naturales del subsuelo, para este último capítulo, se revisará de manera muy general el marco conceptual del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901) y se llevará a la práctica la teoría estudiada.



## 5.1.- Marco Conceptual del Acuífero

### 5.1.1.- Descripción regional

La zona de estudio se localiza en la Cuenca de México, formando parte del Eje Neovolcánico, provincia fisiográfica caracterizada por fosas tectónicas y vulcanismo reciente que, antes de su origen, las evidencias presentes en pozos exploratorios y formaciones geológicas aledañas, señalan que la zona de estudio se encontraba bajo el agua. Si el lector así lo desea, puede consultar el bosquejo geológico publicado por Santoyo et. al., 2005 o el Informe técnico de la Carta E14-2 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) para profundizar en la historia geotectónica del sitio.

Palma, 2022, menciona que dentro de esta cuenca se encuentra el Valle de México, también llamado Valle de Anáhuac y comúnmente confundido con la Cuenca de México, la cual está integrada por cuatro valles; Valle de Cuautitlán, Valle de Apan, Valle de Tizayuca y Valle de México.

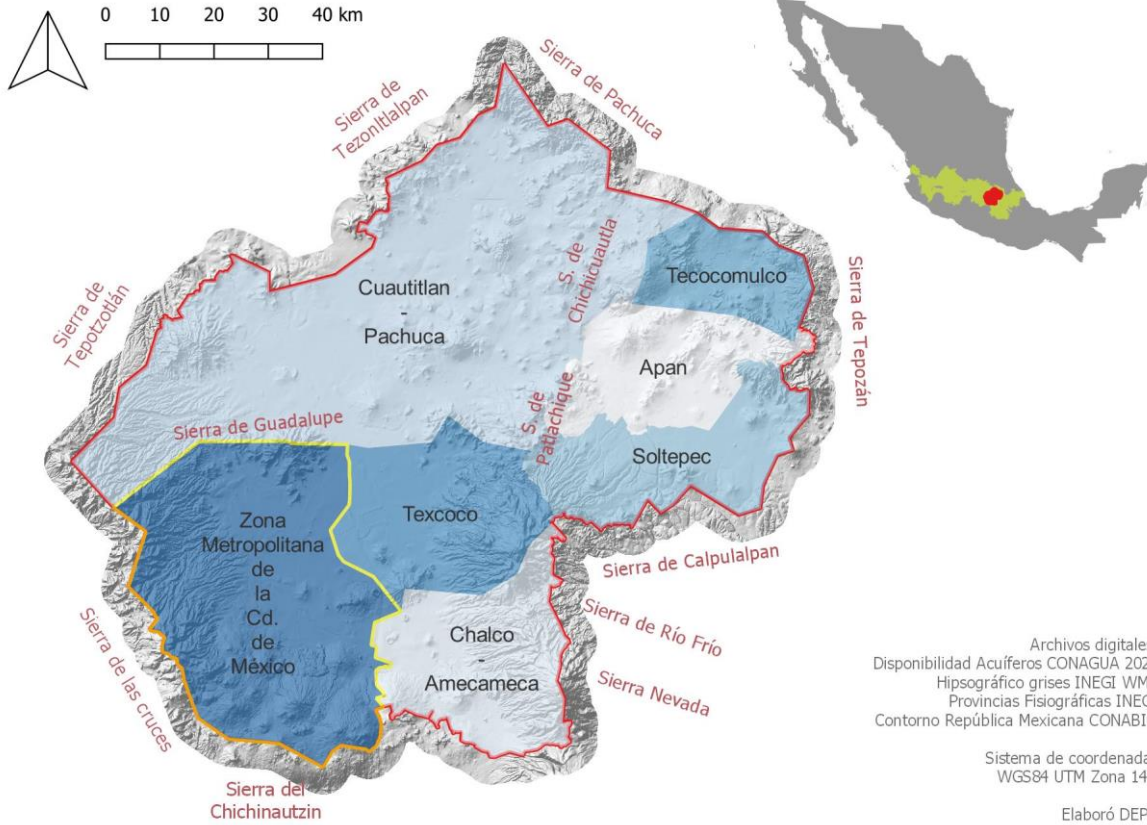
A la Cuenca la define una serie de cuerpos montañosos de los cuales el más reciente corresponde a la Sierra del Chichinautzin, la cual cerró el drenaje superficial en el Cuaternario (Santoyo et. al., 2005).

Administrativamente, la CONAGUA delimita al agua subterránea debajo de la Cuenca de México en 7 acuíferos: Tecocomulco, Apan, Soltepec, Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Palma et., al., 2022b señalan que los últimos cuatro acuíferos mencionados están conectados en función de sus flujos regionales.

### 5.1.2.- Descripción Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901)

#### Localización

El Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901) que a lo largo de este trabajo simplemente denominamos Acuífero de la Ciudad de México, de acuerdo con CONAGUA, 2020, se encuentra ubicado al surponiente de la Cuenca de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica, abarcando la totalidad de la Ciudad de México y una porción del Estado de México.



**Figura 13.- Cuenca de México y delimitación de acuíferos**

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCDMX) se encuentra limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como son la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al poniente, La Sierra Chichinautzin al sur, el volcán del Ajusco al suroeste y la Sierra Nevada al oriente. Dentro de este valle existen algunos aparatos volcánicos aislados como son la Sierra de Santa Catarina, el Peñón del Marqués, el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella (CONAGUA, 2020).

## Clima

Comparando la información publicada por el DOF, 2016 y la CONAGUA, 2020, podemos clasificar muy general a la ZMCDMX con un clima templado subhúmedo y semifrío subhúmedo para las partes montañosas. La temperatura promedio anual mínima es entre 6 a 12 °C y máxima entre 21 a 27 °C. El promedio anual de precipitación reportado en la CONAGUA, 2020, mediante isoyetas es de 768.5 mm con mayor concentración de lluvia en los meses de junio a septiembre.



## Hidrografía

Pertenciente a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México, la zona de estudio se delimita fisiográficamente en la Región Hidrológica (RH) 26 Río Alto Pánuco.

Debido a la alta población en la zona de estudio, la mayoría de los cuerpos superficiales se encuentran con algún tipo de obra hidráulica de protección, de manera parcial o en su totalidad. En cuestión de calidad de agua, toda la cuenca está en números rojos (nota sugerida, Periódico El Economista, 01/08/2022: <http://tiny.cc/calidad> ).

Algunos de los cuerpos de agua presentes son: el Río Magdalena, Río Mixcoac, Río Tacubaya, Río San Joaquín, Río Hondo, Río de los Remedios, Río San Gregorio, Río Santiago, Río San Lucas, Río San Buenaventura, Río San Jerónimo, Río Becerra, Lagunas de Xochimilco y Tláhuac, Canal de Cuemanco, Canal Nacional, Canal de Garay.

## Geología

En la carta E14-2 del SGM, delimitan la extensión de las rocas asociadas al Eje Neovolcánico sobreyaciendo partes como la secuencia vulcanosedimentaria del Terreno Guerrero, rocas sedimentarias de la Cuenca de Zimapán, calizas de la Cuenca Sierra Madre Oriental y calizas de la Cuenca Guerrero Morelos.

Hasta el momento, en la columna estratigráfica publicada por Vásquez et. al., 2021, las siguientes Formaciones y eventos volcánicos son de interés para el Valle de México.

Descritas en el Informe E14-2, la Formación Morelos consiste en bancos de calizas y dolomías interestratificadas, así como brechas calcáreas con bandas y nódulos de pedernal negro y vetillas de calcita, su espesor máximo identificado es de 1,430 m. La Formación Mezcala, es una secuencia variable de limolitas, lutitas, areniscas y margas, en su base predominan horizontes calcáreos. La Formación Balsas, consiste en conglomerados, areniscas y limolitas, esta formación constituye la molasa continental del Terciario, por lo que los fragmentos que la conforman son generalmente variables y la composición depende del protolito del cual proviene.

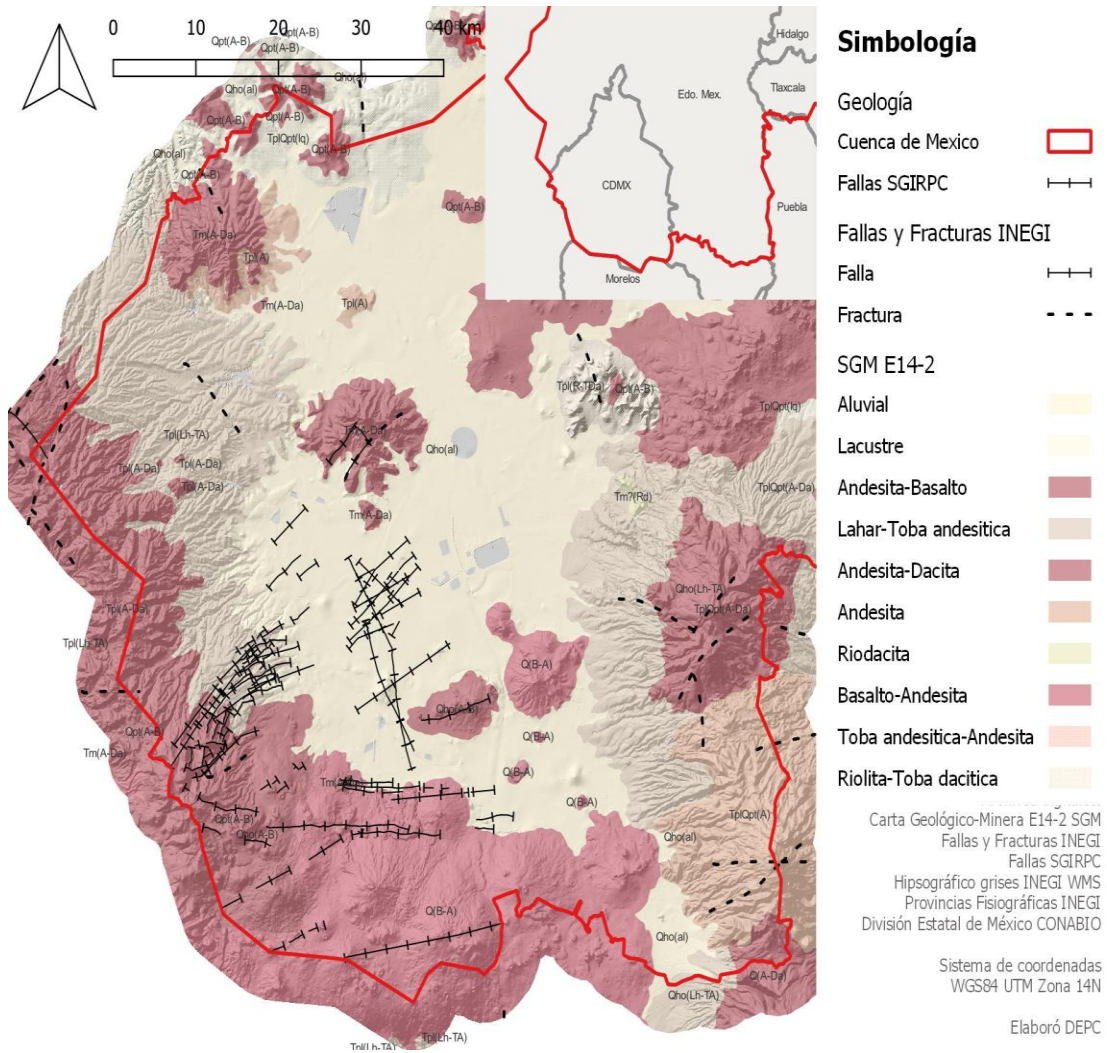


Figura 14.- Geología de la zona en estudio, modificado de Carta E14-2, SGM.

Estratigrafía modificada de Vásquez et. al., 2021

Mesozoico		Cenoico						
Cretácico		Paleógeno			Neógeno		Cuaternario	
Temprano	Tardío	Paleoceno	Eoceno	Oligoceno	Mioceno	Plioceno	Pleistoceno	Holoceno
	Formación Morelos			Grupo Balsas				
	Formación Mezcala							
					Vulcanismo del Oligoceno. 1260 m de prof Pozo Mixhuca (Mix) - 29 Ma. 2210 m de prof Pozo Roma (Rm) - 25 Ma.			
					Sierra de Guadalupe (14-16 Ma) y Formación Tepoztlán (18.7-22.8 Ma)			
						Sierra de las Cruces (0.4 - 3.7 Ma)		
							Sierra Nevada, Chichinautzin y sedimentos lacustres (1.4 Ma al Reciente)	

Figura 15.- Estratigrafía de la zona en estudio, modificada de Vásquez et al., 2021





Campo Volcánico Guadalupe-Sierra La Muerta, caracterizado por secuencias volcánicas de andesita-dacita, andesita, andesita-basalto y sedimentos lacustres.

Campo Volcánico Sierra Las Cruces, las secuencias volcánicas de este campo presentan diferentes eventos andesítico-dacíticos, lahares-tobas andesíticas y finalmente una secuencia de tobas y rocas clásticas semiconsolidadas.

Campo Volcánico Sierra Nevada, consiste en una serie de eventos de riodacita, andesita-dacita, lahar toba andesítica y andesita-basalto. El Campo Volcánico Sierra Chichinautzin, sus unidades son lahares y tobas andesíticas, basalto-andesita y andesita-basalto, este último producto del volcán Xitle.

El aluvión que rellena los valles de México, Toluca y Puebla, está conformado por gravas, arenas, cenizas y arcillas, el espesor varía de 30 a 300m (E14-2, SGM). Por último, los sedimentos lacustres con productos clásticos y piroclásticos se depositaron en los antiguos lagos existentes.

Estructuralmente, al ser una provincia fisiográfica con gran historia tectónica, la existencia de fracturamientos y fallamientos es más que evidente, afectando el basamento cretácico, los complejos volcánicos del terciario y cuaternario, además de los depósitos sedimentarios. Vásquez et. al, 2021, señalan que se han documentado por lo menos tres sistemas de fallas con cinemática normal: NNW-SSE, E-W y NE-SW, definiendo, en el centro de la cuenca dos sistemas de fallas principales; uno ENE-WSW, representado por lineamientos paralelos a la Sierra de Santa Catarina y el otro NNW-SSE con el cual se definió la cima del mesozoico.

Conforme se consigue mayor información de exploración directa e indirecta, diversos autores detallan sus modelos geológico-conceptual para el estudio de la Cuenca de México y sus Valles (**Figura 16** y **Figura 17**).

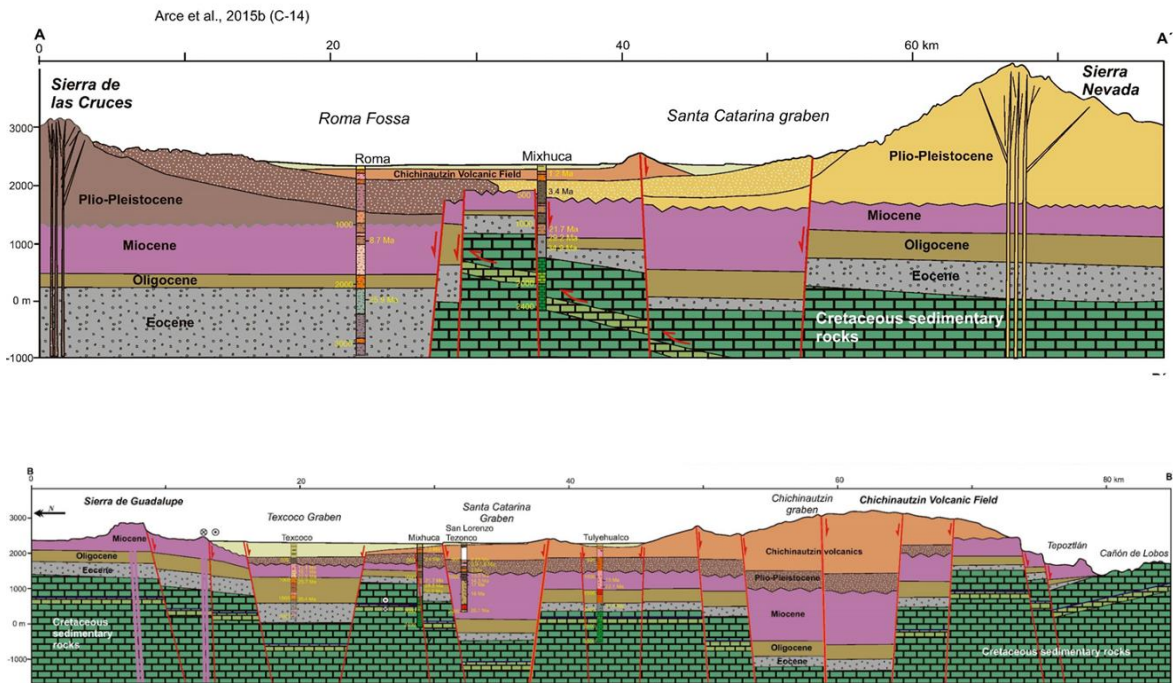


Figura 16.- Secciones geológicas W-E, N-S Valle de México, fuente: Arce et al., 2019

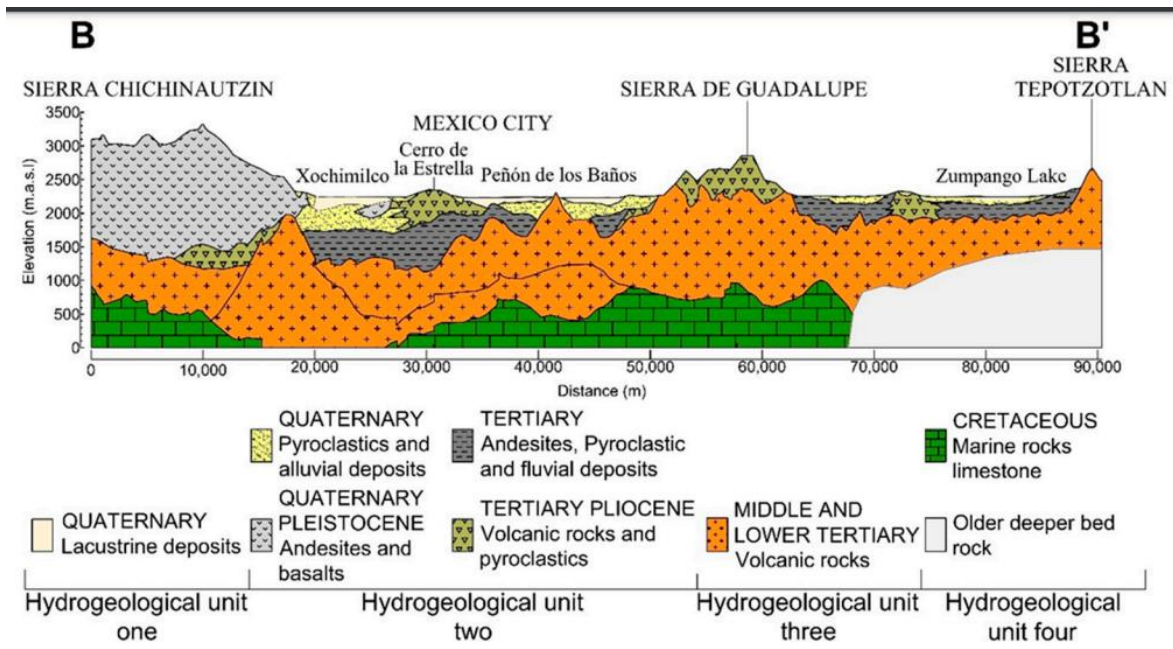


Figura 17.- Sección geológica S-N con unidades hidrogeológicas, fuente: Palma et. al., 2022



## Hidrogeología

Debido a las características litológicas de cada uno de los materiales depositados en nuestra cuenca en estudio, la conceptualización de un modelo de aguas subterráneas queda definido semejante a lo publicado por Palma et. al., 2022b (Tabla 13), en donde las zonas montañosas corresponden a un acuífero libre, para la parte central el acuífero se localiza por debajo de los depósitos lacustres y queda pendiente generar mayor bibliografía para el acuífero profundo y su capa superior confinante.

**Tabla 13.- Unidades hidrogeológicas del acuífero ZMCDMX**

Modificado de Palma et. al., 2022b

Unidad	Clasificación	Propiedades
1	Acuitardo Superior	Arcillas lacustres con alta porosidad y baja permeabilidad
2	Acuífero	Depósitos aluviales conectados hidráulicamente, basaltos fracturados del Cuaternario y rocas volcánicas fracturadas del Terciario agrupadas como un solo acuífero con alta permeabilidad
3	Acuitardo inferior	Evaporitas y conglomerado del Terciario; formación aislada con características aún no definidas. Materiales impermeables entre el acuífero principal y el profundo
4	Acuífero profundo	Calizas y dolomías con alta permeabilidad producto de fracturamiento y disolución

## Niveles del agua subterránea

Se reportan para el año de 1997 en CONAGUA, 2020, las profundidades del nivel del agua subterránea más bajas en la parte sur de la Sierra de Guadalupe entre 20 a 40 m, en cambio, la elevación del nivel estático presentaba valores de 2,310 a 2,390 msnm en las inmediaciones de las Sierras Monte Alto y Sierra de las Cruces (70 a 170 m de profundidad) y en la porción central de la ciudad las elevaciones fluctuaban de 2,185 a 2,200 msnm (60 a 65 metros de profundidad).

Para el año 2018, el mapa de isopiezas publicado en Palma et. al., 2022b, muestra equipotenciales similares a los mencionados del año 1997. Debido a falta de información actualizada y detallada, se pondrá de ejemplo el análisis de 1987 a 1997 realizado por CONAGUA. 2020, en donde observaron la evolución del nivel estático obteniendo valores negativos de hasta 15 metros en la parte sur, -5 a -12 en la parte central, +5 a +10 en la parte occidental y en la parte oriental no hubo cambios.



## Hidrogeoquímica y calidad del agua

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos en el estudio de Palma et. al., 2022b para una clasificación hidrogeoquímica de las aguas en la Cuenca de México con datos de campo del año 2018.

**Tabla 14.- Familias hidrogeoquímicas en la Cuenca de México**

Elaborado con Información de Palma et. al., 2022b

# familia	Tipo	Características
1	Mg-HCO <sub>3</sub>	Periferia de la cuenca y zonas de recarga
2	Mezcla-HCO <sub>3</sub>	Pie de monte y zonas aluviales
3	Na-HCO <sub>3</sub>	Pie de monte y zonas aluviales
4	Mezcla-Cl	Zona lacustre y poca transmisividad
5	Na-Cl	Zona lacustre y poca transmisividad

Las familias son resultado natural del paso del flujo del agua a través de los materiales geológicos. Palma et. al., 2022b explican que las andesitas y dacitas de las Sierras Pachuca, Las Cruces y Nevada producen agua bicarbonatada cálcica-sódica, producto de la disolución de feldespato y anfíboles, para el caso de los basaltos y basalto-andesita de la Sierra Chichinautzin predominan iones bicarbonatos, cálcicos y magnésicos, productos de la disolución de plagioclasa y piroxenos, finalmente, en el centro de la cuenca el agua clorurada sódica sugiere tiempos de residencia, efectos de evaporación y alta salinidad asociada al flujo convectivo en la parte baja del acuífero.

Para el caso de la calidad del agua, los autores antes citados únicamente presentan un mapa de isoyetas en el cual se observan altas concentraciones del ion cloruro conforme el flujo del agua se dirige al centro de la cuenca.

En cambio, en CONAGUA, 2020, citan un estudio de 1995 reportando concentraciones del mismo ion un 250% arriba del límite permisible, en la parte norte de la CDMX se presentaron parámetros de dureza total con un incremento de 200 mg/l, el residuo seco total tuvo un incremento de 900 mg/l. y se rebasaron los límites permisibles de amonio.

En general, los demás iones y contenidos químicos se encuentran dentro de la norma establecida, con excepción de la porción oriente del acuífero, específicamente en Iztapalapa, donde el hierro y magnesio superan las máximas concentraciones (DOF, 2016).



### 5.1.3.- Censo de Aprovechamientos e hidrometría

En el DOF, 2016, mencionan que, en el censo de captaciones de agua subterránea de la CONAGUA, para el acuífero en estudio existían 1,118 captaciones, de las cuales 765 estaban activas, de ellas el 74% se destinaban al uso público urbano, 25% uso industrial y el 1% restante se distribuía en usos agrícola, pecuario y otros.

Para el caso de los manantiales, se localizan al sur y suroeste de la Ciudad de México, pero no se encontró un registro detallado, desafortunadamente, gran parte de ellos han ido desapareciendo con el transcurso de los años. De acuerdo con el DOF, 2016, los manantiales localizados en Tlalpan denominados Fuentes Brotantes y Peña Pobre, aportan caudales del orden de los 100 litros por segundo (lps), mientras que los manantiales localizados en Coyoacán Huayamilpa y Tetlameya aportan entre 5 y 1 lps respectivamente.

El volumen de extracción total se estima en 623.8 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales el 90% se destina al uso público urbano, 10% al uso industrial y las pequeñas fracciones restantes al uso agrícola, pecuario y otros (DOF, 2016).

Debido a la alta demanda del recurso hídrico y la necesidad de contrarrestar los efectos secundarios de la sobreexplotación, el gobierno de la ciudad recurrió a la importación de agua superficial y subterránea proveniente de cuencas vecinas (**Tabla 15**).

**Tabla 15.- Volúmenes de agua suministrados a la Ciudad de México**

Modificado de DOF, 2016

<b>Fuente</b>	<b>Volumen de agua en Mm<sup>3</sup>/año</b>
Agua subterránea extraída del acuífero ZMCDMX	623.8
Sistema Cutzamala (agua superficial)	479.4
Acuífero del Alto Lerma (pozos de los valles de Toluca e Ixtlahuaca)	123.0
Sistema Plan de Acción Inmediata (pozos de ramales Tizayuca-Pachuca, Zumpango, Castera, Los Reyes-FC, Los Reyes-Ecatepec y Teoloyucan)	233.4
Sistema Chiconautla (pozos del acuífero Cuautitlán-Pachuca)	31.5
Presas Madín y Río Magdalena (agua superficial)	18.9
<b>Total</b>	<b>1,510.0</b>



### 5.1.4.- Balance de Aguas Subterráneas

A partir de la ecuación general de balance, en la CONAGUA, 2020, publican los siguientes resultados despreciando en la descarga las variables de Evapotranspiración, Descargas Naturales y Flujo Subterráneo:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de masa}$$

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

$$Rv + Ri + Eh - B = \pm \Delta V(S)$$

**(Rv) Recarga vertical**, considera la infiltración del agua a través de precipitación y escurrimientos, a partir del balance hidrometeorológico obtienen:

Área del acuífero ZMCDMX: 2,139 km <sup>2</sup>	Volumen de lluvia 1,645 hm <sup>3</sup>
Lamina media de lluvia: 769 mm	Volumen de evapotranspiración: 1,251 hm <sup>3</sup>
Evapotranspiración: 585 mm	Volumen de escurrimiento: 169 hm <sup>3</sup>
	Volumen de infiltración: 225 hm <sup>3</sup>
<b>Volumen de recarga efectiva (20%): 45.0 hm<sup>3</sup></b>	

**(Ri) Recarga incidental**, estimada a partir de las fugas en la distribución de agua potable, desprecian la actividad agrícola debido a la alta urbanización.

Volumen promedio anual para dotación de agua potable y servicios: 1,807 hm<sup>3</sup>  
**Considerando 20% de pérdidas del volumen total: 361.4 hm<sup>3</sup> anuales**

**(Eh) Entradas por flujo subterráneo horizontal**, calculada utilizando las elevaciones del nivel estático del año 1995 y la Ley de Darcy.

$$\text{Caudal} = \text{Transmisividad} * \text{Longitud} * \text{Gradiente Hidráulico}$$

**Volumen total de 106.4 hm<sup>3</sup>/año**

**(B) Bombeo**, es la extracción de agua mediante pozos

**Agua mediante pozos dentro del acuífero: 623.8 hm<sup>3</sup>**

**(ΔV S) Cambio de almacenamiento**, para este caso, estima una mayor salida de agua de la que el acuífero está recibiendo.

$$Rv + Eh + Ri - B = \Delta V(S)$$

Rv	Eh	Ri	B	<b>ΔV(S)</b>
45.0	106.4	361.4	623.8	<b>-111.0</b> <b>hm<sup>3</sup>/año</b>



### 5.1.5.- Disponibilidad de Aguas Subterráneas

Para la estimación de la disponibilidad media anual de aguas subterráneas la CONAGUA, 2020, basados en la NOM-011-CONAGUA-2015 presentan lo siguiente:

$$DMA = R - DNC - VEAS$$

**(R)** *Recarga total media anual*, es la suma de todos los volúmenes naturales e indirectos que recargan el acuífero.

**Recarga vertical + Recarga inducida=512.8 hm<sup>3</sup> anuales**  
 Valor con ligera diferencia a lo publicado en el Balance de aguas subterráneas

**(DNC)** *Descarga natural comprometida*, son los volúmenes de agua provenientes de captaciones naturales que son aprovechados y concesionados, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a los acuíferos vecinos.

**No aplica para el acuífero en estudio**

**(VEAS)** *Volumen de extracción de agua subterránea*, es la sumatoria de los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la CONAGUA.

**Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 20 de febrero del 2020 1,020,030,340 m<sup>3</sup>/año**

**(DMA)** *Disponibilidad Media Anual*, constituye el volumen al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas (CONAGUA, 2020).

$$R - DNC - VEAS = DMA$$

R	DNC	VEAS	<b>DMA</b>
512.8	0.0	1,020.03	<b>-507.230340</b> <b>hm<sup>3</sup>/año</b>

**Es importante señalar la falta de información actualizada con la que se dispone de manera pública, si bien los tiempos del ciclo hidrológico son largos, la anomalía antropogénica llamada extracción, modifica la naturaleza del ciclo, por lo que un documento del año 2020 con información de hace 23 años, dificulta la transición a un desarrollo sostenible.** Como resultado del balance y la disponibilidad de aguas subterráneas, se reflejan únicamente dos áreas de oportunidad para contrarrestar los efectos secundarios ocasionados por la sobreexplotación, la primera, regresar o conseguir cuerpos de agua superficiales de calidad para la Ciudad de México, o aplicar la técnica MAR ajustando la infraestructura existente.



## 5.2.- Factibilidad de Proyecto

Retomando lo descrito en el *Capítulo III Factibilidad de la Recarga Gestionada de Acuíferos* y las generalidades de nuestro sitio en estudio, se elaboró la **Tabla 16** para identificar las variables aplicables a nuestro proyecto y poder crear el diagrama de flujo (**Figura 18**) necesario para elegir la ruta de trabajo, es importante recalcar que, en función de los requerimientos del desarrollador de proyectos, será el nivel de detalle del diagrama.

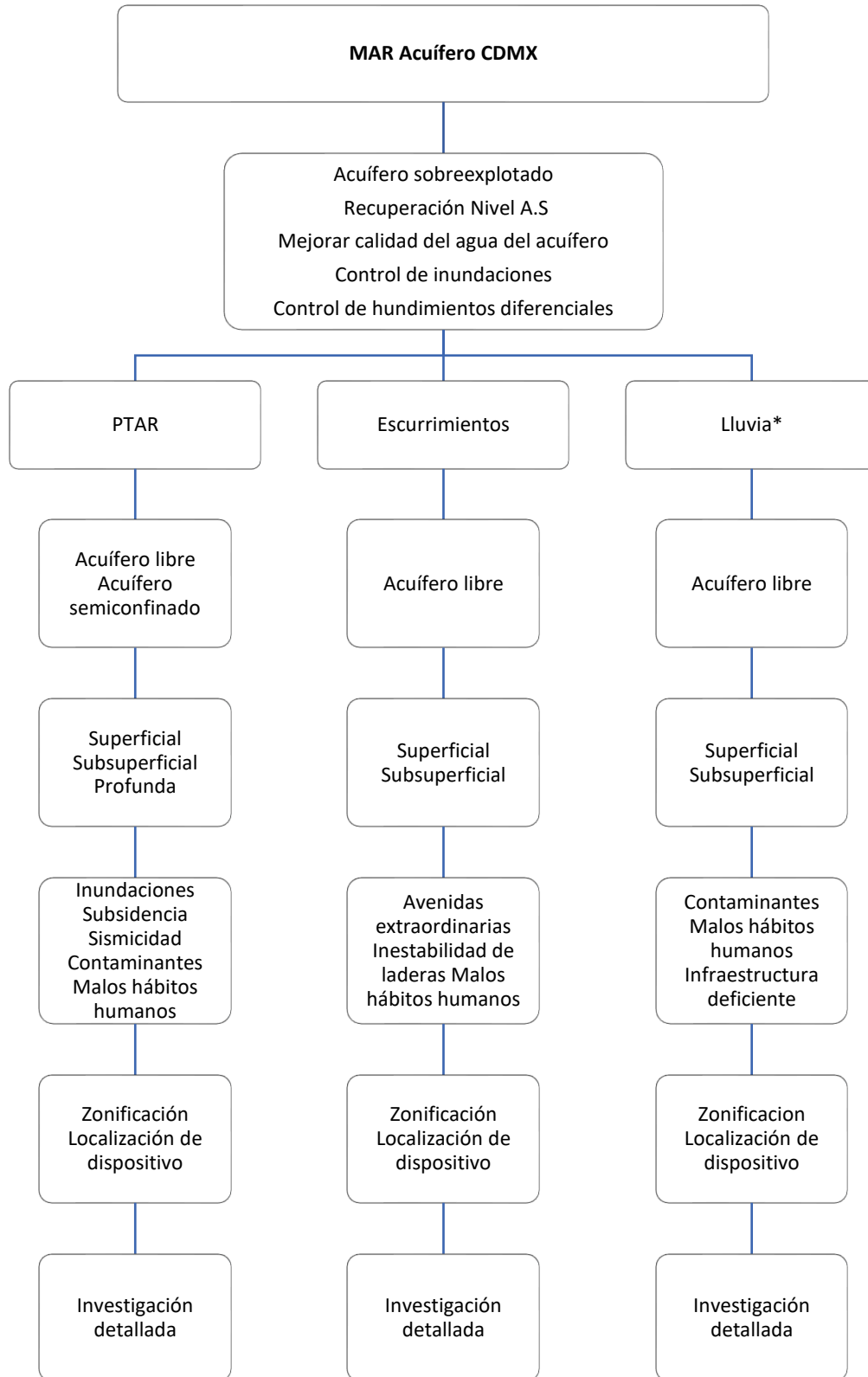
**Tabla 16.- Factibilidad de proyecto MAR Acuífero CDMX**

Elaboración propia

<b>Balance hídrico</b>					
	Acuífero Sobreexplotado	Recuperación nivel del agua subterránea	Mejorar calidad del agua	Control de inundaciones	Control de hundimientos
Notas			Sin información de zonas específicas		
<b>Fuentes y calidad de agua disponibles</b>					
Notas	PTAR 63 PTAR ZMCDMX 25 tratamiento terciario	Ríos perennes Dudosa calidad	Escurremientos Exclusivo en zonas no urbanas	Lluvia*	
<b>Hidrogeología</b>					
Notas	Acuífero Cuaternario-Terciario Libre	Acuífero Cuaternario-Terciario Semiconfinado	Acuífero Mesozoico Confinado		
			Reciente explotación, poca bibliografía		
<b>Dispositivos MAR</b>					
	Lagunas y estanques de infiltración SAT Inundación controlada Zanjas, surcos y canales Recarga incidental por riego	Filtración en los márgenes de los ríos Filtración interdunar	ASR ASTR Pozo poco profundo	Estanque de percolación Represas subsuperficiales Represas de arena Represas con serpenteos	Captación de agua de lluvia en techos Barreras y bunds Trincheras SUDS
<b>Evaluación y mitigación de riesgos</b>					
Riesgos	Inundaciones	Subsistencia	Sismicidad	Lente contaminante	Actividad antropogénica
Mitigación	Hidráulica	MAR	Diseño geotécnico	Válvulas de cierre	Vigilancia
<b>Localización del dispositivo MAR</b>					
Mapa					

\*Necesario identificar concentraciones de metales pesados en agua de lluvia  
PTAR, Planta de Tratamiento de Agua Residual, 63 PTAR dentro de la poligonal del acuífero ZMCDMX





\*Métodos SUDS en zona lacustre desalojan agua con objetivo al acuitardo superior

Elaboración propia

**Figura 18.- Diagrama de flujo para factibilidad de proyecto**



### 5.3.- Zonas potenciales MAR

En el resumen del taller impartido por IIUNAM, 2017, los colaboradores discretizan zonas y formaciones en las que las rocas pueden agruparse de acuerdo a su capacidad de infiltración, la circulación y el almacenamiento del agua en el subsuelo (**Tabla 17**). En este texto se contribuye agregando la fila de zonas lacustres.

**Tabla 17.- Clasificación de zonas potenciales para proyectos MAR en la Ciudad de México**

Elaboración propia con información de IIUNAM, 2017

Sitio	MAR	K	Observaciones
Sierra de Chichinautzin, Sierra de Santa Catarina	Superficial, subsuperficial	Alta	En algunas baterías existentes se logró recargar 60 lps por pozo. A través de estanques, como el que fue ubicado en la Sierra de Santa Catarina, se logró infiltrar gastos de hasta 1,000 lps
Formación Tarango	Superficial y subsuperficial	Media	Se concluyó que es factible recargar agua al subsuelo a razón aproximada de 30 lps.
Sierra Nevada, Cerro de la Estrella	Superficial y subsuperficial	Media	Intercalaciones de materiales granulares y volcánicos con caudales de infiltración de 20 lps
Zona Lacustre	Profunda	Media / Baja	En función del agua de la PTAR y del diseño del pozo, caudales de infiltración menores a 10 lps

K = Permeabilidad

Utilizando el diagrama de flujo para factibilidad de proyecto, en este trabajo se selecciona la línea de investigación siguiente:

- fuente de agua, **PTAR**
- objetivo, **acuífero libre**
- dispositivo MAR, **laguna o estanque de infiltración (método superficial)**

En la **Figura 19** se observa en primera instancia el total de PTAR presentes para la poligonal del Acuífero, posteriormente se discretiza la información considerando las plantas con tratamiento terciario (información proporcionada de manera verbal en el IIUNAM) y suprayaciendo las formaciones con buenas respuestas de infiltración superficial (en Palma et.al., 2022c realizan un mapeo mediante APLIS para la Cuenca de México, además, existen por mencionar otros autores como Boyás et.al., 2021 y Morales et.al., 2020 con sus respectivos mapas).

Para la **Figura 20**, en este trabajo de investigación se selecciona la PTAR Santa Fe debido a su capacidad instalada de tratamiento, para la identificación de las zonas potenciales de recarga gestionada, se seleccionaron terrenos con disponibilidad de construcción y aparentemente libres de generar conflicto con la sociedad.

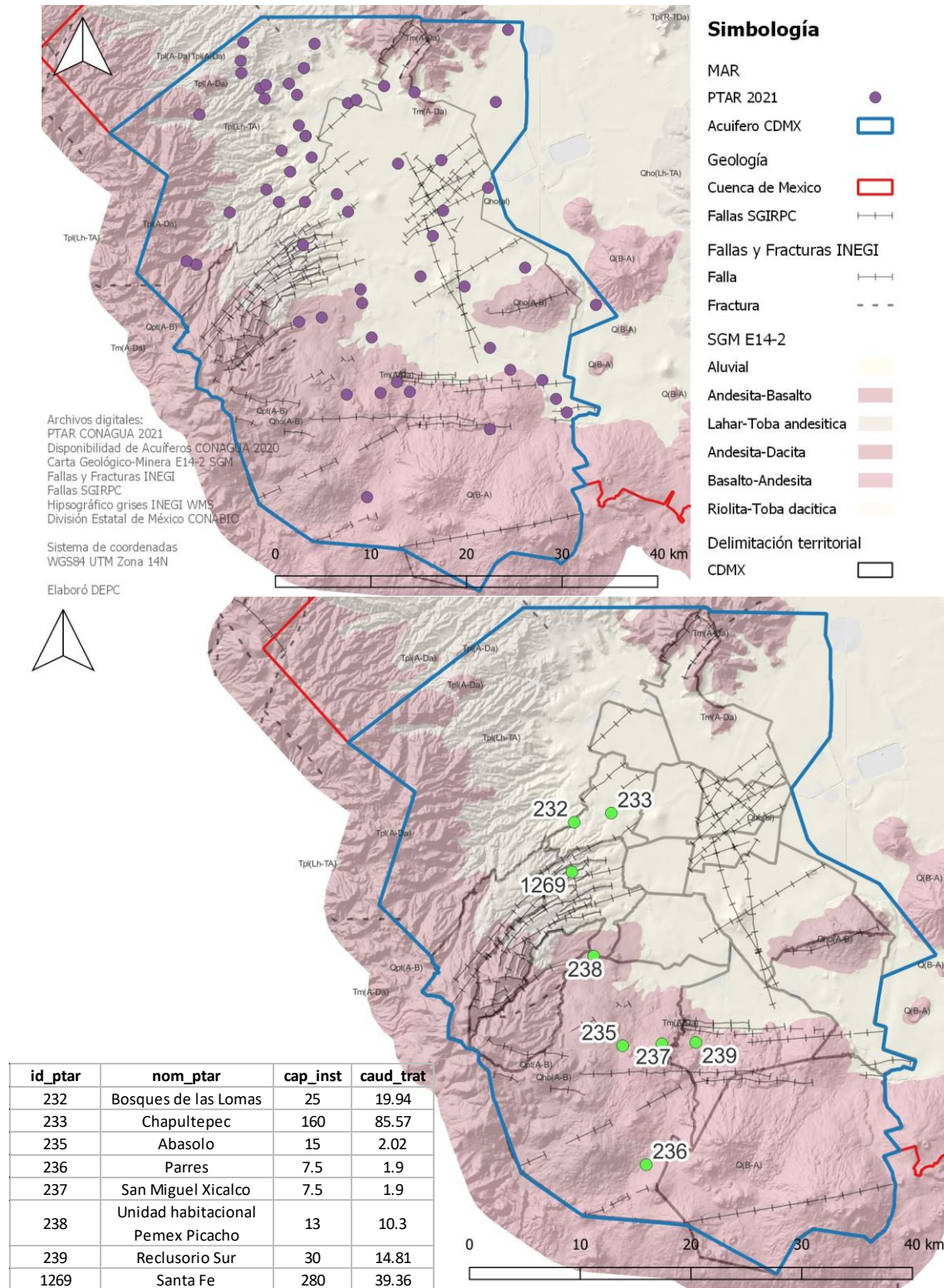
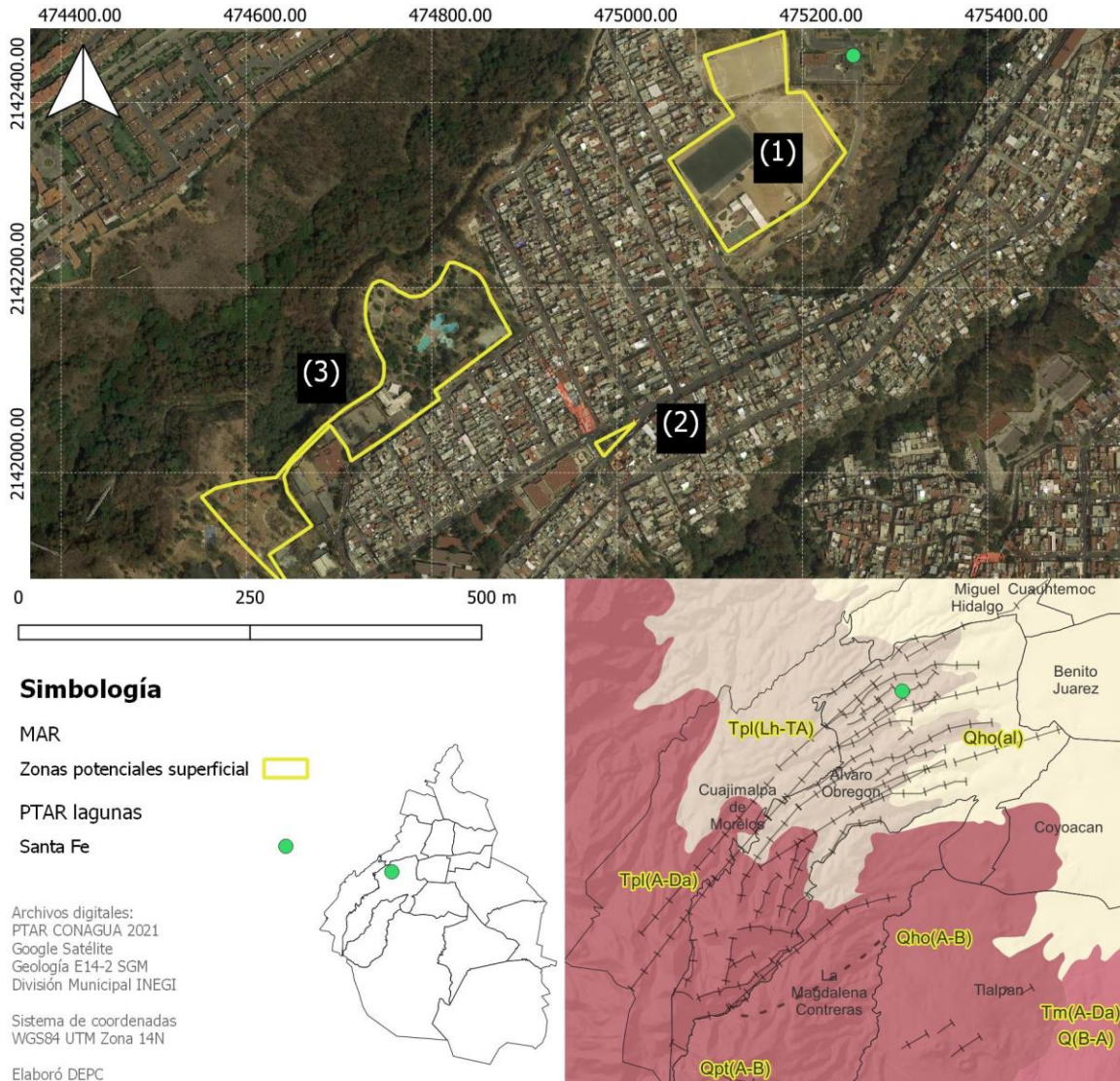


Figura 19.- Total de PTAR en CDMX y PTAR potenciales para dispositivo MAR superficial



**Figura 20.- PTAR Santa Fe y posibles zonas para construcción de dispositivo MAR**

Con el fin de cumplir la NOM-014-CONAGUA-2007, se buscaron de manera satelital las casetas de pozos de agua del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) para verificar las distancias menores a 1 km a la redonda entre recarga y extracción, debido a que no se tuvo acceso a un archivo digital con ubicación fidedigna de los pozos, puede existir un cierto rango de error en el mapeo.

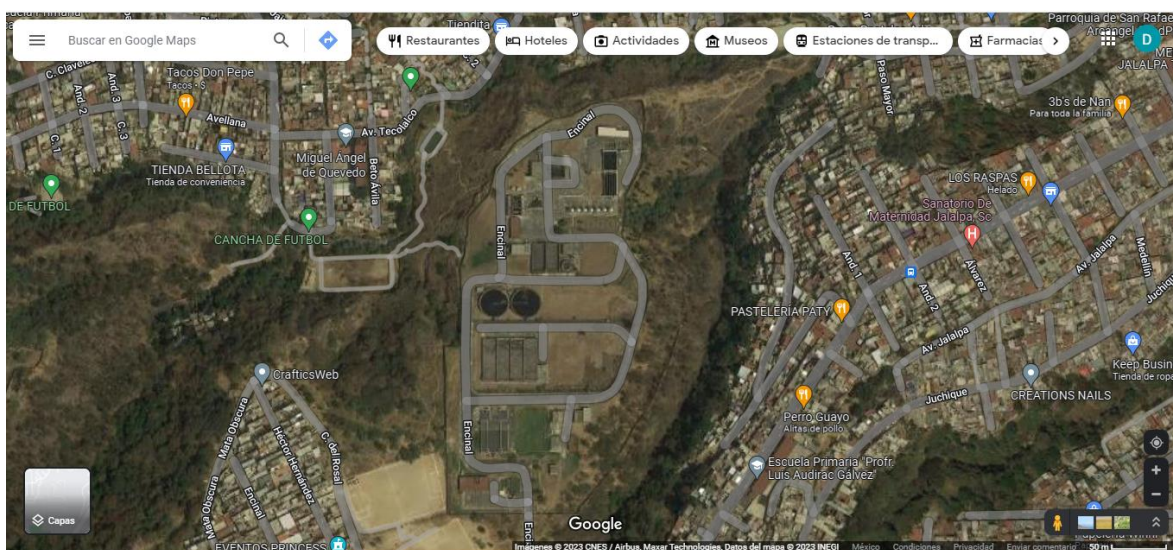
La revisión de zonas potenciales aguas abajo de la planta no se considera fructífera para esta etapa de anteproyecto, ya que los campos de fútbol existentes a las orillas son los únicos espacios de esparcimiento para la colonia, mientras que metros más abajo se tendría que diseñar métodos profundos debido a la ausencia de terrenos libres.

## 5.4.- Propuesta de Anteproyecto

La fuente y calidad de agua a utilizar para el anteproyecto de recarga gestionada aquí propuesto será mediante la Planta de Tratamiento de Agua Residual Santa Fe (1269), correspondiente a la alcaldía Álvaro Obregón y localizada con las coordenadas UTM zona 14N 0474234.77, 2142430.34 y altitud media de 2,415 msnm.

La PTAR Santa Fe (**Figura 21**), de acuerdo a la tabla de atributos del archivo digital de CONAGUA para las PTARs de toda la República Mexicana con año de actualización 2021, tiene una capacidad instalada de 280 lps de los cuales trata un caudal de 39.36 lps.

Debido a que no se cuenta con el plan maestro de la PTAR para conocer la existencia de espacio sobrante disponible dentro de la misma, se consideraron las siguientes áreas cercanas aguas arriba con espacio suficiente para la construcción del estanque de infiltración.



**Figura 21.- Vista aérea de la PTAR Santa Fe, fuente: Google Maps**

(1) El terreno denominado “Campos Deportivos Jalalpa” (**Figura 22**) se localiza junto a la PTAR con una altitud media de 2,444 msnm y un área aproximada de 23,833 m<sup>2</sup>. Mediante el recorrido espacial con la plataforma Google Maps se observa una parte del deportivo con reja y otra sección con llanos.



Figura 22.- Vista aérea y en calle de los Campos Deportivos Jalalpa, fuente: Google maps

(2) El “Parque Fortín” (Figura 23) es un pequeño parque sobre la diagonal de una avenida principal, se encuentra aproximadamente a 496 m de distancia de la PTAR, tiene un área de 413 m<sup>2</sup> y una altitud media de 2,456 msnm. En el recorrido satelital se observa el parque enrejado y con mucho tránsito de personas.

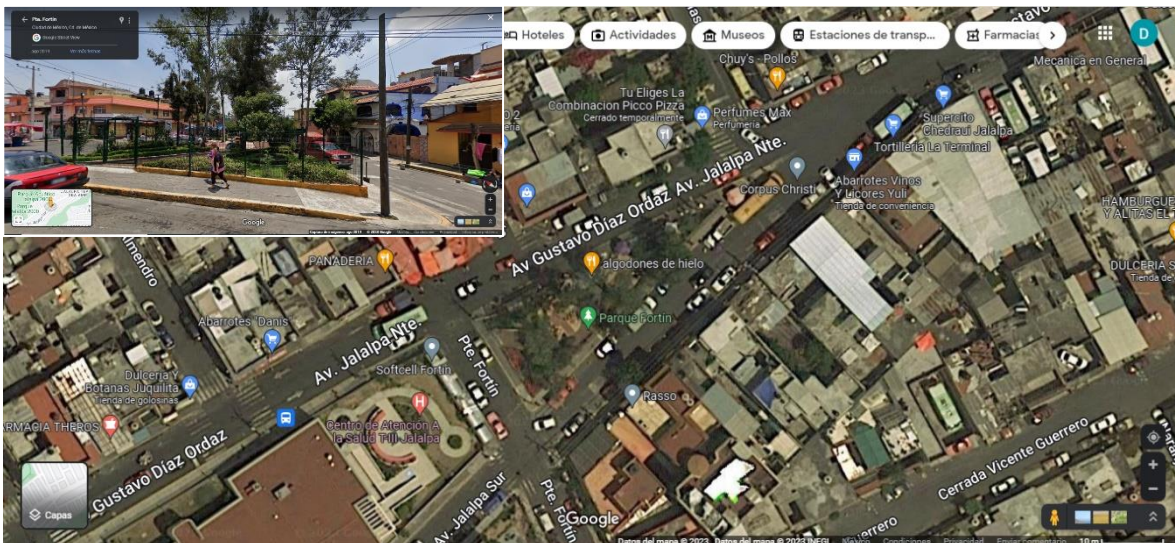


Figura 23.- Vista aérea y en calle del Parque Fortín, fuente: Google maps

(3) El “Parque Acuático Jalalpa 2000” (Figura 24) tiene una distancia aproximada a la PTAR de 819m, un área de 25,467 m<sup>2</sup> y una altitud media de 2,465 msnm, en él se realizan actividades recreativas y de esparcimiento público, revisando los comentarios del lugar, recientemente tuvo una remodelación.

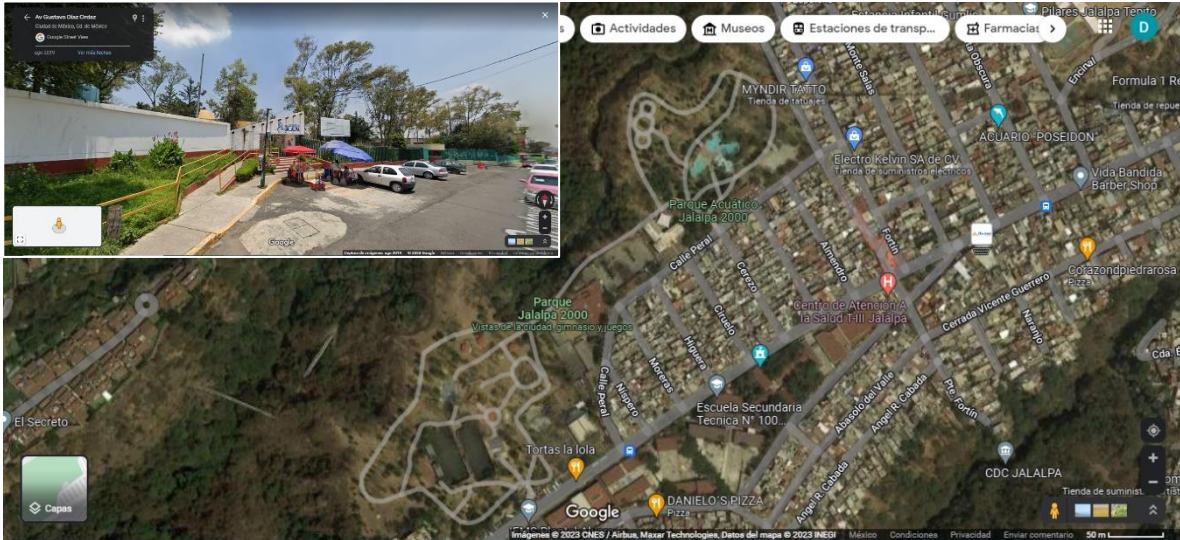


Figura 24.- Vista aérea y en calle del Parque Acuático Jalalpa 2000, fuente: Google maps



Figura 25.- Vista SW-NE con relieve 3D de las zonas potenciales, fuente: Google earth

Analizando las zonas potenciales de recarga gestionada tenemos el Parque Acuático con dimensiones del terreno adecuadas, la temática del parque ayudaría a integrar los proyectos de recarga gestionada a la comunidad, el inconveniente es la infraestructura necesaria de conducción y bombeo aguas arriba.



El Parque Fortín es un proyecto de integración con la sociedad muy importante, ya que está a la vista de todos los habitantes, los inconvenientes serían el mismo que el caso anterior, aunado a una gran incertidumbre sobre los cuidados que pueda recibir el sitio y el comportamiento de la sociedad.

Debido a que en esta propuesta de anteproyecto no se cuenta con una topografía a detalle y un estudio de mecánica de suelos, no se está considerando la construcción de represas superficiales aprovechando las pendientes de los taludes.

Definitivamente, los Campos Deportivos Jalalpa son la mejor opción para la instalación de un estanque de infiltración, específicamente, el primer campo que se encuentra junto a la PTAR. Con esta ubicación, los costos en diseño hidráulico disminuirán, también, el personal de la planta podrá atender y monitorear de manera inmediata cualquier anomalía en el sistema. La siguiente ficha resume la propuesta de anteproyecto.

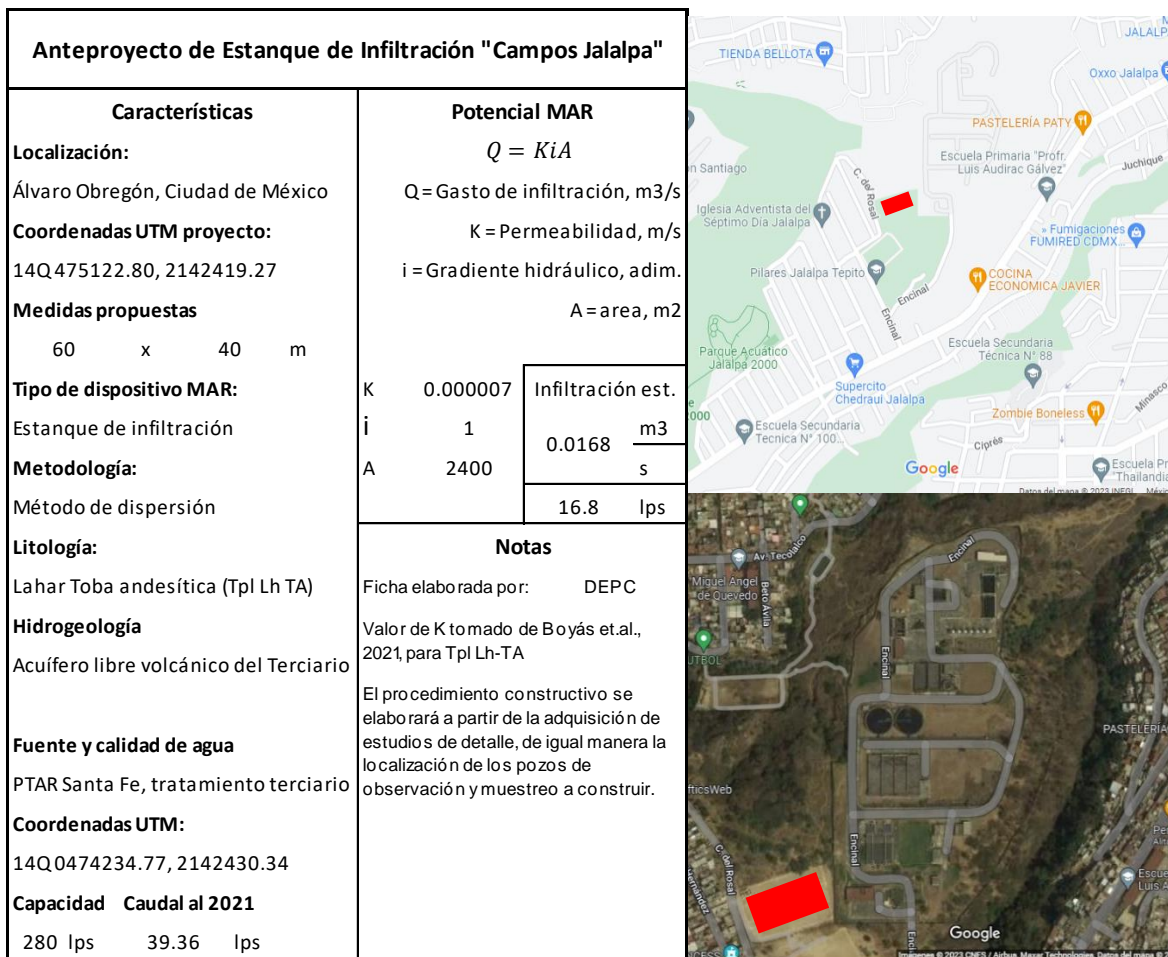


Figura 26.- Ficha de Anteproyecto "Estanque de Infiltración Campos Jalalpa"





## REFERENCIAS

### **Arce et. al., 2019**

José Luis Arce, Paul W. Layer, José Luis Macías, Eric Morales-Casique, Armando García-Palomo, Fernando J. Jiménez-Domínguez, Jeff Benowitz & Alberto Vásquez-Serrano (2019) Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt, Supplementaru material, Journal of Maps, 15:2, 320-332.

<https://doi:10.1080/17445647.2019.1593251>

### **Boyás et.al., 2021**

Boyás-Martínez, E., González-Mora M.F., Paredes-Tavares J., Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México, Cuadernos Geográficos 60(3), 73-94.

### **CONAGUA, 2020**

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901), Ciudad de México, 2020, Comisión Nacional del Agua.

### **DOF, 2016**

Diario Oficial de la Federación, 26/09/2016, Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, clave 0901, en la Ciudad de México, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México.

### **El Economista, 2022**

Rodríguez I., Contaminada, 59.1% del agua superficial de México, Periódico El Economista, Nota del 01/08/2022:

<https://www.eleconomista.com.mx/politica/Contaminada-59.1-del-agua-superficial-de-Mexico-20220801-0005.html>

### **NOM-011-CONAGUA-2000**

Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

### **Morales et.al., 2020**

Morales-Escalante R., Borja-Martínez A., Mares-Tepanohaya R.U. (2020). Estudio Hidrogeológico de Zonas de Recarga Acuífero para el Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México. México. Moro Ingeniería S.C.-The Nature Conservancy.

### **Palma et. al., 2022a**

Palma-Nava A; Parker, T.; Carmona-Paredes, R.B. Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area. Grounwater NGWA.

<https://doi.org/10.1111/gwat.13237>

### **Palma et. al., 2022b**

Palma A.; Rivera A.; Carmona R.: A Unified Hydrogeological Conceptual Modelo f the Mexico Basin Aquifer after a Century of Groundwater Exploitation. Water 2022, 14, 1584.

<https://doi.org/10.3390/w14101584>



**Palma et. al., 2022c**

Palma-Nava A; Pavón-Ibarra, I.; Domínguez-Mora, R.; Carmona-Paredes, R.B. Estimación de la recarga natural en la Cuenca de México mediante la aplicación del método APLIS. Ing. Investig. Tecnol. 2022, 23, 1-10.

**Palma, 2022**

Palma A.; Evaluación de la sostenibilidad del agua subterránea en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Cuenca de México, Tesis de Doctorado en Ingeniería, 2022, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

**Santoyo, 2005**

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E, Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México, TGC Geotecnia, 2005, Ciudad de México.

**SACMEX, 2019**

Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Presentación Cumbre Fondos de Agua, No hay agua que perder, Julio 2019.

<https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/aguas.pdf>

**SGM, E14-2**

Carta geológico-minera Ciudad de México E14-2, escala 1: 250 000, Estados de México, Guerrero y Puebla, Servicio Geológico Nacional (antes Consejo de Recursos Minerales), 2002.

Informe Carta geológico-minera Ciudad de México E14-2, escala 1: 250 000, Estados de México, Guerrero y Puebla, Servicio Geológico Nacional (antes Consejo de Recursos Minerales), 2002.

**SGM, E14-5**

Informe Carta geológico-minera y geoquímica Cuernavaca E14-5, escala 1: 250 000, Estados de México, Morelos, Guerrero, Puebla y Oaxaca, Servicio Geológico Nacional (antes Consejo de Recursos Minerales), 1998.

**Vásquez et. al., 2021**

Vásquez-Serrano, A., Arce-Saldaña, J.L., Rangel-Granados, E., Morales-Casique, E., Arroyo López, S.M., 2021, Arreglo de fracturas geológicas en rocas miocénicas de la cuenca de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 38, núm. 1, p. 1-17. Doi: <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.1.1582>



## CONCLUSIONES

Ante los efectos secundarios ocasionados por la sobreexplotación de acuíferos, la idea de recuperar una ciudad con cuerpos de agua superficiales de calidad tal y como actualmente ocurre en varias ciudades de Asia, es una tarea titánica que ojalá algún día se llegue a concretar para Latinoamérica. Mientras tanto, **la Recarga Gestionada de Acuíferos es la respuesta medioambiental** más efectiva para controlar los hundimientos del terreno, mejorar la calidad del agua subterránea, remediar un porcentaje de los volúmenes de recarga natural no infiltrados debido a la densidad urbana, implementar acueductos subterráneos naturales, crear presas subterráneas, entre otras.

En cuestiones del diagrama de factibilidad desarrollado, en este texto se seleccionó la primera línea de investigación correspondiente a; PTAR - Acuífero Libre - Método Superficial, **quedando abiertas numerosas oportunidades de desarrollo de proyectos dentro de la Ciudad de México.**

Es importante señalar la **falta de información actualizada con la que se dispone de manera pública**, si bien los tiempos del ciclo hidrológico son largos, la anomalía antropogénica llamada extracción, modifica la naturaleza del ciclo, por lo que no es posible tener una Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901), del año 2020 con información referente para hace 23 años.

**El estanque de infiltración Campos Jalalpa** con unas medidas propuestas de 60 m de largo por 40 m de ancho, de acuerdo con las características geológicas del sitio tiene un **potencial de recarga** de agua procedente de la PTAR Santa Fe de 16.8 litros por segundo, equivalente a 0.0168 m<sup>3</sup>/s, por lo que es **igual a 529 mil m<sup>3</sup> de agua al año** aproximadamente.

Bajo el lineamiento de la NOM-014-CONAGUA-2003 sobre la **necesidad de realizar un proyecto piloto de recarga in situ**, se determinaron las medidas propuestas del anteproyecto, logrando así, tener la disponibilidad de terreno suficiente para duplicar el tamaño del estanque al momento hipotético de demostrar su efectividad operacional. La mención del dispositivo MAR corresponde a un **ejercicio didáctico**, para la implementación del mismo u otros **proyectos de recarga gestionada es obligatorio realizar rigurosos estudios de detalle.**



Si bien, las medidas que logre alcanzar el dispositivo no se comparan en nada al potencial de recarga generado por las hectáreas de las lagunas de la PTAR San Luis Río Colorado, con la creación de un cuerpo de agua superficial se logra tener un regulador natural de temperatura, se mejora el paisaje urbano, se analiza la aceptación social, se reducen los costos de construcción en comparación a la perforación de pozos y finalmente, este tipo de obras superficiales a la vista de todos, son las favoritas electoralmente hablando para los gobiernos.

Dentro de los planes maestros de agua potable para la Ciudad de México, ya no debe ser suficiente las zonas boscosas para recargar agua al acuífero en explotación, de acuerdo con el Reporte de Plantas de Tratamiento Operadas por las Fuentes Fijas de la Ciudad de México para el año 2016 (Secretaría del Medio Ambiente “SEDEMA”), **existen 18 plantas con un nivel de tratamiento terciario** (7% del total de PTARs).

**Si se realiza una proyección conservadora de recarga gestionada** tomando las plantas de tratamiento terciario, tenemos que, mediante un método superficial y bajo un caudal de recarga de 10 lps para las ocho plantas de la **Figura 19** y 5 lps para las diez plantas restantes con un método subsuperficial o subterráneo, **la Ciudad de México está perdiendo al día de hoy, la capacidad de recargar 4.10 millones de m<sup>3</sup> de agua al año**, tal vez es una cantidad insignificante para estabilizar el déficit existente en el acuífero, pero es una cantidad abismal comparada a la ausencia de proyectos de recarga actual.

La aceptación social al consumo directo de agua por medio de plantas de tratamiento de agua residual, es un tema controversial, por lo que se tiene el gran potencial de aprovechar todos esos volúmenes **para la implementación MAR, el inconveniente principal es la falta de interés de los organismos operadores** para realizar este tipo de actividades **debido a las normativas oficiales mexicanas tan exigentes y la pérdida del derecho del recurso hídrico entrando en contacto al subsuelo**, en cambio, **el gobierno teme por la integridad del medio ambiente** al no tener una mejora regulatoria en todos sus procesos, **principalmente a las malas prácticas de recarga.**

**Una excelente forma de adquirir conocimiento, es mediante la experiencia de terceros**, por lo que aquí se recomienda revisar lo desarrollado por el Condado de Orange County en los Estados Unidos (<https://www.ocwd.com/>).