



WATER ENGINEERING
INGENIERÍA DEL AGUA

EDICIÓN SOBRE:
RECARGA DE ACUÍFEROS GESTIONADA

ISBN: 978-99939-0-927-9



9 789993 909279

Volumen 3

2023

ISBN 978-99939-0-927-9

PROYECTO

FINDECYT/INTERCTI 02-2021

*Digitalización de la infraestructura verde para la gestión
sostenible de los recursos hídricos*

PROJECT

ERANet17/ICT2-0196

*Digital-enabled green infrastructure for sustainable water
resources management (DIGIRES)*



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



GOBIERNO *de*
GUATEMALA
DR. ALEJANDRO GIANMATTEI

SECRETARÍA
NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIGIRES

AUTORES

Jorge Cifuentes

Wener Ochoa

Migdalia del Cid

Osber Carias

Andrea Barrera

Karla Corzantes

Gabriel Estupinian

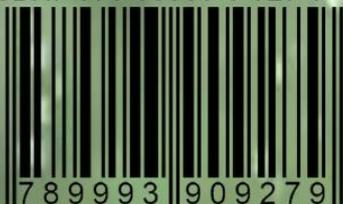
WATER ENGINEERING INGENIERÍA DEL AGUA

Volumen 3

2023

ISBN 978-99939-0-927-9

ISBN: 978-99939-0-927-9



9 789993 909279

EDICIÓN SOBRE:

**RECARGA DE
ACUÍFEROS
GESTIONADA**

CONTENIDO

Resumen	1
Summary	2
Introducción	3
Estado del arte	5
Marco teórico	8
Recarga gestionada de acuíferos	8
Escorrentía	8
Agua pluvial	9
Suelos	10
Infiltración	11
Ejemplos de recarga de acuíferos gestionada en Latinoamérica	13
Satélites	18
Software en recarga de acuíferos gestionada	18
Metodología para realizar recarga hídrica gestionada	19
Manual de recarga gestionada de acuíferos	20
Premisa	20
Introducción	20
Contexto del agua en el mundo y Guatemala	20
¿Qué es un acuífero?	20
¿Qué es la recarga de acuíferos gestionada?	21
Formas de recarga de un acuífero	21
Objetivos de la recarga de acuíferos gestioanda	21
Fuentes de agua a recargar	21
Algunas directrices generales	22
Información hidrogeológica a considerar	22

Información de calidad del agua a considerar para recarga	22
Algunas limitantes a considerar	22
Recarga por medio de pozos	23
Algunas características de los pozos de recarga	23
Técnicas de recarga básicas en Guatemala	24
Digital-enabled green infrastructure for sustainable water resources manager	25
Antecedentes	25
Objetivo	25
Metodología	25
¿Qué es INOWAS?	27
Recomendaciones	27
Referencias	29
Anexos	31

1. RESUMEN

La recarga de acuíferos gestionada es una parte fundamental de las soluciones para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y el acceso al agua en ciudades, pueblos, aldeas y caseríos. Para llevar a cabo esta recarga de manera adecuada, se deben tener en cuenta diversos factores técnicos. Una estrategia común es captar el agua de lluvia en techos y carreteras para luego trasladarla a sitios de infiltración natural o realizar recarga artificial. Es posible emplear pozos de inyección, pozos de infiltración y otros métodos que requieren un estudio detallado de los suelos, su permeabilidad, la precipitación pluvial, la topografía, las cuencas, la estratigrafía, la profundidad del acuífero, la estacionalidad y los deslaves, así como el uso de software y herramientas digitales. Además, es necesario monitorear de manera continua y evitar la contaminación con desechos orgánicos e inorgánicos, pesticidas, agroquímicos, aceites de maquinaria, grasas, jabones, desechos agroindustriales, industriales, comerciales, agrícolas y cualquier otro tipo de material extraño. En ciudades como Guatemala, así como en otras áreas del departamento de Guatemala, como Villa Nueva, Amatitlán y Chinautla, y en Chiquimula, El Progreso y Zacapa, existe un problema de sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo. Esta situación también se presenta en otros países de la región latinoamericana. Tanto las lotificaciones, urbanizaciones, edificios, industria alimentaria, agricultura, cemento, construcción y minería deben implementar la recarga gestionada de acuíferos para evitar inundaciones y garantizar la sostenibilidad de los recursos. El proyecto internacional *Digital-enabled green infrastructure for sustainable water resources management (DIGIRES)* y el proyecto *Digitalización de la infraestructura verde para la gestión sostenible de los recursos hídricos* son contribuciones importantes a nivel mundial, regional y nacional en el campo de la Recarga de Acuíferos Gestionada.

2. SUMMARY

Managed aquifer recharge is a fundamental part of the solutions to ensure the sustainability of water resources and access to water in cities, towns, villages, and hamlets. To carry out this recharge properly, various technical factors must be taken into account. A common strategy is to capture rainwater from rooftops and roads and then transport it to sites of natural infiltration or carry out artificial recharge. It is possible to use injection wells, infiltration wells, and other methods that require a detailed study of soils, permeability, rainfall, topography, watersheds, stratigraphy, aquifer depth, seasonality, landslides, as well as the use of software and digital tools. Additionally, continuous monitoring is necessary to prevent contamination from organic and inorganic waste, pesticides, agrochemicals, machinery oils, fats, soaps, agro-industrial, industrial, commercial, agricultural waste, and any other type of foreign material. In cities like Guatemala City, as well as in other areas of the department of Guatemala such as Villa Nueva, Amatitlán, and Chiquimula, and in Chiquimula, El Progreso, and Zacapa, there is a problem of overexploitation of groundwater resources. This situation also occurs in other countries in the Latin American region. Subdivisions, urban developments, buildings, food industry, agriculture, cement, construction, and mining must all implement managed aquifer recharge to prevent floods and ensure the sustainability of resources. The international project *Digital-enabled green infrastructure for sustainable water resources management (DIGIRES)* and the project *Digitalización de la infraestructura verde para la gestión sostenible de los recursos hídricos* are important contributions at the global, regional, and national levels in the field of Managed Aquifer Recharge.

3. INTRODUCCIÓN

La recarga gestionada de acuíferos es una técnica que se utiliza en todo el mundo para recargar los acuíferos subterráneos, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y mejorar la calidad del agua subterránea. Esta técnica es particularmente útil en países como Guatemala, donde la gestión del agua es un desafío constante debido a la variabilidad del clima, el cambio climático y la presión de la creciente demanda de agua debido al crecimiento poblacional.

Esta técnica, implica la captación, tratamiento y almacenamiento del agua de lluvia, que luego se inyecta en el acuífero subterráneo para su almacenamiento a largo plazo. Lo cual ayuda a mantener los niveles de agua subterránea y evita la sobreexplotación de los acuíferos, lo que puede tener efectos negativos en el medio ambiente y la disponibilidad de agua para la población.

En Guatemala, la recarga gestionada de acuíferos, se puede decir que es algo que se ha utilizado desde tiempos de los mayas, por medio de zanjas de infiltración y chultunes, entre otros, y recientemente se pueden ver de manera empírica en algunos proyectos en varias partes del país, incluyendo la cuenca del Lago de Atitlán y el Área Metropolitana de la ciudad de Guatemala.

Estos proyectos empiezan a demostrar que son efectivos para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua subterránea y mejorar la calidad del agua. Sin embargo, uno de los problemas es que no se conoce mucho sobre los costos, el tiempo que conlleva aplicar esta técnica así como los beneficios cuantificados de manera precisa y concreta en las diversas localidades guatemaltecas, las cuales tienen una diversidad y complejidad geológica bien marcada.

Sin duda alguna, la recarga gestionada de acuíferos es una técnica que se debe utilizar en Guatemala para reponer las reservas de agua subterránea en un acuífero mediante la inyección de agua en el subsuelo. Ya que con ello, contribuye a las soluciones efectivas para abordar la falta de abastecimiento de agua en zonas donde las reservas de agua subterránea están disminuyendo debido al aumento de la demanda y el cambio climático. Es por ello que se considera importante debido a los desafíos relacionados con la gestión del agua en el país.

Además, el cambio climático está afectando los patrones de lluvia y la disponibilidad de agua, lo que hace que la gestión adecuada de los recursos hídricos sea aún más crítica. Sin embargo, la implementación de la recarga gestionada de acuíferos en Guatemala requiere de una planificación cuidadosa y la consideración de una serie de factores, como conocer la geología e hidrogeología, la Climatología y la Meteorología, la ubicación de los acuíferos y la calidad del agua, la disponibilidad de fuentes de agua para la recarga y la capacidad de los acuíferos para almacenar y recuperar agua.

En resumen, la recarga gestionada de acuíferos es una técnica importante para la gestión del agua en Guatemala, que puede ayudar a garantizar la disponibilidad de agua para la población y mejorar la sostenibilidad de los recursos hídricos del país, y es precisamente en ese marco que el proyecto *Digitalización de la infraestructura verde para la gestión sostenible de los recursos hídricos* da sus primeros aportes en materia científica.

4. ESTADO DEL ARTE

La gestión adecuada de los recursos hídricos se ha convertido en una prioridad global debido a la creciente escasez de agua y los desafíos ambientales que enfrenta nuestro planeta. En este contexto, la recarga de acuíferos se ha posicionado como una estrategia fundamental para garantizar la disponibilidad y la calidad del agua subterránea, que es una fuente vital para abastecer a comunidades, agricultura, industria y ecosistemas. Algunas de las investigaciones que destacan a nivel nacional e internacional son las siguientes:

Tabla 1

Estado del arte en materia de recarga de acuíferos gestionada

Título	Autores	Punto a resaltar	Año de publicación
NIVEL NACIONAL (Guatemala)			
Caracterización de los pozos ubicados en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.	Pablo F. Santos, Julio R. Luna, Jorge I. Cifuentes y Andrea M. Barrera. Guatemala.	Acuífero formado por arena gruesa negra con una mezcla de grava negra que va de los 400 a 1000 pies. Anterior al estrato de sedimentos aluviales, se encuentran formaciones comprendidas por rellenos de tipo volcánico, aglomerados volcánicos, estratos de piedra pómez y un estrato superior arcilloso.	2020
Identificación de áreas críticas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Turbala, parte alta de la cuenca del río Naranjo.	Concyt, Senacyt y Fonacyt, USAC. FINDECYT/FODECYT 044-2017. Humberto Ismael Maldonado Cáceres. Guatemala.	Las variables que condicionaron en mayor medida el potencial de recarga hídrica para este estudio fueron: la cobertura vegetal, pendiente, uso del suelo y la geología.	2018
Análisis piezométrico de pozos de agua para los municipios de la Mancomunidad Gran ciudad del sur.	FUNCAGUA. Guatemala	Promover la habilitación de zonas de recarga hídrica dentro de los municipios para mejorar la cantidad de agua en los mantos acuíferos es una medida importante que debe tomarse en cuenta ya que de acuerdo a este estudio existen zonas dentro de la región que sufren cierto impacto positivo tras la época lluviosa del año en términos de mejoras en condiciones o ascenso de niveles piezométricos.	2019
Aprovechamiento del agua subterránea y manejo sostenible de los recursos hidráulicos, en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.	Adhemar Enrique Argueta López. Guatemala.	El acuífero existente en el campus central está siendo explotado desde hace varios años y no solo por los pozos del campus central sino de toda la ciudad y por los factores que intervienen en el almacenamiento provoca que sus niveles hayan bajado considerablemente.	2009

NIVEL INTERNACIONAL			
Evaluación de la recarga artificial de acuíferos como tratamiento terciario en depuración de aguas residuales y comparación frente a otros tratamientos terciarios.	Ineyser Alisia Morillo Santana. Barcelona	Tiene un cosot elevado y la percepción social ya que se piensa que MAR los farmacos no se eliminan.	2020
An Overview of Managed Aquifer Recharge in Brazil.	Tatsuo Shubo, Lucila Fernandes and Suzana Gico Montenegro. Brasil.	Brasil aún se encuentra en una etapa temprana en las iniciativas de MAR y necesita superar los desafíos técnicos, legales y socioculturales para adoptar MAR. La adopción de MAR debe considerarse una estrategia para afrontar futuras sequías en un escenario de cambio climático.	2020
Hydrogeological evaluation of managed aquifer recharge in a glacial moraine complex using long-term groundwater data analysis.	Jolijn van Engelenburg, Martin de Jonge, Sjoerd Rijpkema, Erik van Slobbe and Victor Bense. Países bajos	Para diseñar sistemas MAR eficaces, es esencial un conocimiento profundo de la hidrología e hidroquímica de las aguas subterráneas, así como del sistema de aguas superficiales que se utiliza como recurso hídrico para la infiltración.	2020
Guía Metodológica. Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos.	Ministerio de Agricultura de Chile.	Las aguas lluvias se almacenan temporalmente hasta que se inlftran a través del fondo y los lados. Generalmente son poco profundas y aprovechan la existencia de depresiones naturales en suelos permeables o excavados en el terreno.	2020
Modeling managed aquifer recharge processes in a highly heterogeneous, semi-confined aquifer system.	Stephen R. Mapless, Graham E. Fogg, and Reed M. Maxwell. Valle central en California, USA.	Estos hallazgos destacan la gran variabilidad del potencial de MAR en el paisaje y demuestran la importancia de las facies de textura fina para acomodar MAR en sistemas acuíferos aluviales.	2019
La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático.	Enrique Fernández Escalante, Jon San Sebastián Sauto, Maria Villanueva Lago, Rodrigo Calero Gil. Madrid, España.	En definitiva, la gestión plurianual del agua y de las reservas subterráneas mejoradas presenta ventajas interesantes con respecto a esquemas de gestión hídrica carentes de celdas de almacenamiento subterráneo y de retorno de agua a los acuíferos.	2018
Recarga artificial de acuíferos en función de las características geohidráulicas para incremento de la disponibilidad hídrica en el manantial collana – cabanilla.	Esther Mamani Quispe. Perú.	La precipitación en la zona propuesta para la recarga varía entre 663.43 mm y 938.70 mm. La intensidad con una duración de 60 minutos para 500 años es de 141.36 mm/hr y el coeficiente de escorrentía que es de 0.60 para la zona de estudio, Interpretando y reemplazando valores se obtuvo el siguiente resultado, el volumen de aportación a la zona impluvio es de 1.14 m ³ .	2017
Potencial recarga gestionada en la cuenca de los ríos Teno y Lontué, VII región, Chile:	Ignacio Arturo Maturana Cabezas. Chile	En la cuenca de los ríos Teno y Lontué existen 6 zonas favorables para la recarga gestionada, considerando como parámetros de elección profundidades	2016

determinación de sectores favorables y propuesta de alternativas.		del nivel estático de mínimo 20 m y permeabilidades mayores a 20 m/día.	
Recarga gestionada de acuíferos: multifuncionalidad en la zona regable de Santiuste.	Fernández Escalante, E., González Herrarte, F.B. y San Sebastián Sauto, J. Valencia, España.	Muestra las múltiples capacidades de un sistema originalmente ideado para regadío y valora sus funciones y efectos técnicos, ambientales, económicos y sociales.	2015
Las acequias de careo, un dispositivo pionero de recarga artificial de acuíferos en sierra nevada, España. Caracterización e inventario.	A. Enrique Fernández Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroya Gil. Granada, España.	Las acequias de careo o careos constituyen un sistema de recarga artificial de acuíferos específico. Su trazado es estudiado minuciosamente, y bien tienden a conducir el agua de cursos fluviales a simas y sumideros o bien serpentean por formaciones detríticas permeables con terrenos de labor, o por zonas de cabecera de un sistema de abastecimiento urbano.	2006

Fuente: Ochoa, W, 2021.

5. MARCO TEÓRICO

Recarga gestionada de acuíferos

La recarga gestionada de los acuíferos, también llamada recarga artificial, o simplemente, MAR por sus siglas en inglés (Managed Aquifer Recharge), consiste en la introducción intencionada de agua en los acuíferos, para que ejerzan su papel de almacén natural, para su posterior recuperación y uso cuando sean necesarios estos recursos (Fernández Escalante & San Sebastián Sauto, 2018).

El Managed Aquifer Recharge (MAR) es un proceso de almacenamiento de agua en acuíferos subterráneos para su uso posterior. Se trata de una técnica de gestión de recursos hídricos que permite la recarga controlada de los acuíferos a través de diferentes métodos, como la infiltración directa, la recarga indirecta o la inyección de agua tratada.

Según la American Society of Civil Engineers (ASCE), la recarga gestionada de acuíferos se define como "un proceso planificado y deliberado de introducir agua en un acuífero para lograr objetivos específicos, como aumentar el almacenamiento de agua, mejorar la calidad del agua o mitigar los efectos de la sobreexplotación" (ASCE, 2020)¹.

Escorrentía

Definición de escorrentía:

Es el agua que proviene de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. (Aparicio, 1992)

La escorrentía es el agua que proviene de la precipitación que llega a la superficie terrestre. Se divide en tres clases: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escorrentía subterránea.

Proceso de escorrentía superficial:

Cuando la precipitación alcanza la superficie, procede a infiltrarse hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, comienza a llenar las depresiones del terreno y al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre la superficie, a este proceso se le llama flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos.

El agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Al llegar a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento de corrientes. El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma la escorrentía superficial.

Proceso de escorrentía subsuperficial:

Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escorrentía subsuperficial; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escorrentía subterránea.

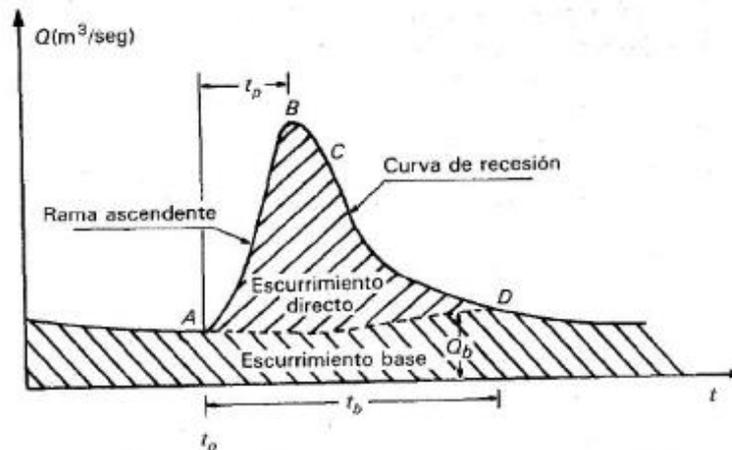
Proceso de escorrentía subterránea:

De los tres tipos de escorrentía, la superficial es el que llega más rápido a la salida de la cuenca. Por ello, se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo.

La escorrentía subterránea, llega de manera lenta a la salida de la cuenca. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso dice que forma el escurrimiento base.

Figura 1

Hidrograma aislado



Fuente: Aparicio, 1992. Página 29.

Agua pluvial

Definición:

Es el agua procedente de la precipitación y del deshielo que no es absorbida por el suelo, sino que fluye por la superficie de edificios, calles y otras superficies. Si no son correctamente canalizadas y tratadas, pueden provocar inundaciones y alteraciones en el proceso de saneamiento de aguas residuales de origen doméstico.

Recuperación de agua pluvial:

Es de vital importancia la captación, almacenamiento y utilización del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano, para las poblaciones que no tienen acceso a este vital líquido.

La recuperación de agua pluvial consiste en filtrar el agua de lluvia captada en una superficie determinada, generalmente el tejado o azotea, y almacenarla en un depósito.

Captación de agua pluvial:

Todas las aguas pluviales que son recogidas por una superficie impermeable se deben incorporar a un sistema de red de saneamiento. Por lo tanto, su destino final es la depuración.

Es importante la separación de aguas domésticas y las captadas por alcantarillado, por lo tanto, estando juntas, generan un problema al desperdiciar el agua pluvial.

Aprovechamiento de agua pluvial: El aprovechamiento de aguas pluviales es diverso, desde riego a limpieza del hogar. Un proceso de saneamiento adecuado en las aguas pluviales genera mayor capacidad de utilidad para este producto.

Suelos

Los suelos son la capa superficial de la tierra compuesta por materiales minerales y orgánicos, agua, aire y organismos vivos, que interactúan entre sí y con el entorno para formar un ecosistema complejo y dinámico. (Arshad, M. A., & Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.)

Guatemala, tiene una diversa gama de tipos de suelo, esto debido a su variada topografía y condiciones climáticas. Entre los principales tipos de suelo se encuentran:

- Andosoles: estos suelos se forman a partir de cenizas volcánicas y se encuentran en áreas con actividad volcánica, como las tierras altas que rodean los volcanes en Guatemala. Este tipo de suelo son generalmente fértiles y bien drenados, lo que los hace aptos para la agricultura.
- Luvisoles: Los luvisoles son suelos ricos en arcilla que se encuentran en áreas con precipitaciones moderadas a altas. Se caracterizan por distintas acumulaciones de arcilla en el subsuelo conocidas como “iluviación de arcilla”. Estos suelos son utilizados para las plantaciones de café y banano en Guatemala.
- Vertisoles: Los vertisoles son suelos arcillosos que tienen un alto contenido de minerales arcillosos expansivos. Estos suelos exhiben una contracción e hinchazón significativas con los cambios en el contenido de humedad. Los vertisoles se encuentran en regiones con una estación seca y húmeda pronunciada, como partes de la región de Petén en Guatemala.
- Regosoles: Los regosoles son suelos jóvenes, subdesarrollados que carecen de horizontes o capas bien definidos. Por lo general, se encuentran en áreas con actividad volcánica reciente o en laderas empinadas donde el desarrollo del suelo es limitado. Los regosoles suelen ser menos fértiles y aptos para la agricultura sin una gestión adecuada.

- Solonchaks: Los Solonchaks son suelos salinos que contienen altos niveles de sales, que a menudo se encuentran en regiones áridas o semiáridas. Estos suelos suelen tener un drenaje deficiente y no son adecuados para la mayoría de los cultivos agrícolas. Se encuentran en ciertas áreas bajas de Guatemala, particularmente en las regiones costeras.
- Cambisoles: Los Cambisoles son suelos con desarrollo moderado a lento, caracterizados por un horizonte definido donde se acumula material meteorizado. Son comunes en las zonas montañosas y montañosas de Guatemala y se utilizan para diversos fines agrícolas.
- Fluvisoles: Los fluvisoles son suelos aluviales que se forman en las llanuras aluviales y deltas de los ríos. Por lo general, son fértiles y están bien drenados, lo que los hace aptos para la agricultura. Los fluvisoles se pueden encontrar a lo largo de los principales ríos de Guatemala, como el río Motagua y el río Usumacinta.

Es importante tener en cuenta que estos tipos de suelo pueden variar dentro de las diferentes regiones de Guatemala, y la idoneidad para cultivos específicos también puede depender de otros factores como el clima, la elevación y las prácticas de manejo de la tierra.

Infiltración

Definición de infiltración:

Es el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producto por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. (Aparicio, 1992)

Descripción del proceso de infiltración:

Al suponerse un suelo seco, antes del inicio de una tormenta. La cantidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo (es decir, capacidad de infiltración) es mayor que la intensidad de la lluvia en esos primeros instantes. Suponiendo las condiciones anteriores, se infiltraría toda la lluvia, según:

$$\text{Si } i < fp \qquad f = i$$

Donde:

F = infiltración, expresada como lámina por unidad de tiempo (mm/h)

Fp = Capacidad de infiltración (mm/h)

I = intensidad de la lluvia.

Si la lluvia es muy intensa se produce una saturación en la superficie del suelo, generando charcos y depresiones en el terreno. A este tiempo se le llama tiempo de encharcamiento y se define con fp .

Después del tiempo de encharcamiento, si la lluvia sigue intensa, se pierda la capilaridad en el suelo frente a la disminución de fuerzas gravitatorias. Bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia. Al ser mayor que la capacidad de transmisión del suelo, de manera que:

$$\text{Si } i > fp, t > tp, f=fp$$

Entonces, al saturarse demasiado el suelo, las fuerzas capilares pierden su capacidad paulatinamente hasta que llegan un momento teórico en $t=\infty$. Al estar el suelo saturado por completo, el movimiento del agua se produce solo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se hace constante.

Las condiciones anteriores, aplican únicamente cuando el nivel freático este muy profundo. Si después del tiempo de encharcamiento la tormenta disminuye, bajando su intensidad, el tirante de agua que se infiltra disminuye, y el agua contenida en los charcos también se infiltra, hasta llegar a la evaporación.

Factores que afectan la capacidad de infiltración:

La infiltración de agua en Guatemala está influenciada por la diversidad de la topografía, el clima y las prácticas de uso de la tierra del país. Estos son algunos puntos clave con respecto a la infiltración de agua en Guatemala:

- a) Topografía: Guatemala tiene una topografía variada que incluye montañas, valles, mesetas y planicies costeras. La pendiente y la elevación del terreno pueden afectar las tasas de infiltración del agua. Las pendientes pronunciadas pueden provocar una escorrentía rápida y una infiltración limitada, mientras que las áreas más planas pueden permitir una mayor infiltración y recarga de aguas subterráneas.
- b) Clima: Guatemala tiene un clima tropical con distintas estaciones húmedas y secas. La distribución e intensidad de las lluvias influyen en la infiltración del agua. Durante la temporada de lluvias, que generalmente ocurre de mayo a octubre, las fuertes precipitaciones pueden saturar el suelo y mejorar la infiltración del agua. Sin embargo, los eventos de lluvia intensa también pueden resultar en escorrentía superficial y erosión, lo que reduce las tasas de infiltración.
- c) Tipos de suelo: La composición y estructura del suelo afectan la capacidad de infiltración del agua. Guatemala tiene varios tipos de suelos, incluyendo Andosoles (formados a partir de ceniza volcánica), Luvisoles, Vertisoles y Cambisoles, cada uno con diferentes características de infiltración. Los andosoles generalmente tienen buenas tasas de infiltración de agua, mientras que los vertisoles pueden tener tasas más bajas debido a su alto contenido de arcilla y sus propiedades de expansión y contracción.
- d) Prácticas de uso de la tierra: Los cambios en el uso de la tierra y la cobertura de la tierra impactan la infiltración del agua. La deforestación, las prácticas agrícolas (como el arado y el monocultivo), la urbanización y el desarrollo de infraestructura pueden alterar las tasas de infiltración natural. La compactación

del suelo por las actividades humanas puede disminuir la infiltración, lo que lleva a un aumento de la escorrentía y una disminución de la recarga de agua subterránea.

- e) Características hidrológicas: Guatemala tiene numerosos ríos, lagos y humedales, que pueden influir en la infiltración del agua. Los ríos y arroyos pueden promover la infiltración cuando el agua fluye sobre superficies permeables, mientras que los lagos y los humedales pueden actuar como reservorios naturales y permitir la infiltración del agua en el suelo circundante.
- f) Los esfuerzos para mejorar la infiltración de agua y la recarga de aguas subterráneas en Guatemala incluyen la promoción de prácticas sostenibles de manejo de la tierra, la reforestación, la protección de cuencas y la construcción de estructuras de recarga artificial, como estanques y estanques de infiltración.
- g) Es importante tener en cuenta que las tasas de infiltración de agua pueden variar entre diferentes regiones dentro de Guatemala debido a la combinación específica de clima, topografía, tipos de suelo y prácticas de uso de la tierra en cada área. Los estudios y evaluaciones localizados son valiosos para comprender la dinámica específica de la infiltración de agua en lugares particulares.

Entre otros factores:

- a) Textura del suelo.
- b) Contenido de humedad inicial.
- c) Contenido de humedad de saturación.
- d) Cobertura vegetal.
- e) Aire atrapado.
- f) Lavado de material fino.
- g) Compactación.
- h) Textura, sus cambios y diferencias.

Ejemplos de recarga de acuíferos gestionada en Latinoamérica

- 1) Proyecto Puyango-Tumbes (Ecuador-Perú): Este proyecto binacional se enfoca en la recarga gestionada del acuífero compartido entre Ecuador y Perú, que es una fuente importante de agua para la agricultura y el consumo humano. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de almacenamiento y conducción de agua para la recarga, así como medidas para la gestión integrada del agua.

El Proyecto Puyango-Tumbes es un proyecto binacional entre Ecuador y Perú que tiene como objetivo la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Puyango-Tumbes. Esta cuenca es una de las más importantes de la región, ya que abastece de agua a más de 500,000 personas y es fundamental para la agricultura y la pesca.

Una de las principales estrategias del proyecto es la recarga hidráulica gestionada, que consiste en la infiltración de agua de superficie en el acuífero subterráneo para

aumentar su nivel y mejorar su calidad. Para ello, se han construido varias estructuras de recarga en diferentes puntos de la cuenca, como pozos y zanjas de infiltración.

El proyecto también incluye la implementación de sistemas de monitoreo y gestión del agua, así como programas de educación y capacitación para la población local. Además, se están llevando a cabo acciones para reducir la contaminación y mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura y otras actividades humanas.

El Proyecto Puyango-Tumbes es un ejemplo de cómo la recarga hidráulica gestionada puede ser una herramienta efectiva para la gestión sostenible de los recursos hídricos en regiones donde el agua es escasa o está mal distribuida. Además, demuestra la importancia de la cooperación entre países y comunidades para enfrentar los desafíos relacionados con el agua y el cambio climático.

- 2) Proyecto GEF-SUELO (Argentina): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la cuenca del río Salado, una de las regiones más productivas de Argentina. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la erosión del suelo y mejorar la calidad del agua.

El Proyecto GEF-SUELO tiene una relación indirecta con la recarga hídrica, ya que la gestión sostenible de los suelos puede contribuir a mejorar la calidad y cantidad de agua disponible en las zonas rurales donde se implementa el proyecto. Esto se debe a que la mejora de la calidad del suelo puede aumentar la capacidad de retención de agua, reducir la erosión y mejorar la infiltración del agua en el suelo, lo que a su vez puede contribuir a la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para uso humano y agrícola. Sin embargo, es importante destacar que el proyecto no se enfoca específicamente en la recarga hídrica, sino en la gestión sostenible de los suelos como un componente clave para la adaptación al cambio climático y la reducción de la pobreza en zonas rurales.

- 3) Proyecto Subterráneo (México): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en el Valle de México, una de las regiones más pobladas del país. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para reducir la extracción de agua subterránea.

El Proyecto Subterráneo es una iniciativa que busca promover la recarga hídrica gestionada en México a través de la construcción de infraestructura subterránea para almacenar y filtrar agua de lluvia. Esta infraestructura consiste en la construcción de pozos de infiltración y sistemas de captación de agua de lluvia en áreas urbanas y rurales.

La recarga hídrica gestionada es un proceso que consiste en la captación, almacenamiento y filtración del agua de lluvia en el suelo para recargar los acuíferos subterráneos. El Proyecto Subterráneo busca implementar esta técnica para mejorar la disponibilidad de agua en zonas urbanas y rurales, reducir la dependencia de fuentes de agua superficiales y mejorar la calidad del agua.

La infraestructura subterránea construida por el Proyecto Subterráneo permite la infiltración del agua de lluvia en el suelo, lo que contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos. Además, al almacenar el agua de lluvia en el subsuelo, se reduce el riesgo de inundaciones en las áreas urbanas y rurales.

En resumen, el Proyecto Subterráneo tiene una relación directa con la recarga hídrica gestionada, ya que su objetivo principal es la construcción de infraestructura subterránea para almacenar y filtrar agua de lluvia y contribuir a la recarga de los acuíferos subterráneos.

- 4) Proyecto Agua para el Futuro (Perú): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la cuenca del río Chillón, una de las regiones más secas de Perú. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la promoción de la participación de las comunidades locales en la gestión del agua.

El Proyecto Agua para el Futuro es una iniciativa que busca promover la gestión sostenible del agua en el Perú, a través de la implementación de prácticas de conservación y uso eficiente del recurso hídrico. Esta iniciativa se enfoca en la promoción de la agricultura sostenible, la gestión integrada de los recursos hídricos y el fortalecimiento de capacidades para la gestión del agua.

En relación con la recarga hídrica gestionada, el Proyecto Agua para el Futuro promueve prácticas de conservación del agua en la agricultura, como la implementación de sistemas de riego eficientes y la gestión integrada de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas. Estas prácticas contribuyen a la recarga de los acuíferos subterráneos, ya que se reduce la extracción de agua subterránea y se promueve la infiltración del agua de lluvia en el suelo.

Además, el Proyecto Agua para el Futuro también promueve la gestión integrada de los recursos hídricos, lo que implica una planificación y gestión coordinada de las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Esto permite una gestión más eficiente del agua y contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos.

- 5) Proyecto Recarga Sanitaria (Brasil): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la región metropolitana de São Paulo, una de las áreas urbanas más grandes de Brasil. El proyecto incluye la construcción de sistemas de

tratamiento de aguas residuales para la recarga del acuífero y la promoción de la gestión integrada del agua.

El Proyecto Recarga Sanitaria es una iniciativa en Brasil que busca mejorar la calidad del agua subterránea a través de la recarga hídrica gestionada. La iniciativa se enfoca en la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales y su posterior infiltración en el subsuelo para recargar los acuíferos subterráneos.

El proyecto promueve la gestión integrada de los recursos hídricos, ya que involucra a diferentes sectores y actores en la planificación y ejecución de las acciones. Además, se promueve la participación comunitaria en el monitoreo y mantenimiento de los sistemas de recarga hídrica.

En relación con la recarga hídrica gestionada, el Proyecto Recarga Sanitaria contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos mediante la infiltración de aguas tratadas en el subsuelo. Esto permite una gestión sostenible del agua subterránea y mejora su calidad, lo que beneficia a las comunidades que dependen de este recurso para su abastecimiento.

- 6) Proyecto Río Verde (Chile): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la cuenca del río Maipo, una de las regiones más productivas de Chile. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para reducir la extracción de agua subterránea.
- 7) Proyecto Huascacocha (Perú): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la cuenca del río Chillón, una de las regiones más secas de Perú. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para mejorar la gestión del agua en la agricultura y la minería.
- 8) Proyecto Catarina (México): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la región de Guanajuato, una de las áreas más productivas de México. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.
- 9) Proyecto ACUVERDE (Guatemala): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la cuenca del río Motagua, una de las regiones más productivas de Guatemala. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.

El Proyecto ACUVERDE en Guatemala también tiene una relación directa con la recarga hídrica gestionada. El objetivo principal de este proyecto es mejorar la

gestión y el acceso al agua potable y saneamiento en las comunidades rurales de la cuenca del río Motagua.

Para lograr esto, el proyecto contempla la construcción de infraestructuras para la captación, tratamiento y distribución de agua, así como la implementación de sistemas de recarga hídrica gestionada. Estos sistemas permiten la infiltración de agua tratada en el subsuelo para recargar los acuíferos subterráneos y mejorar la disponibilidad y calidad del agua en la zona.

Además, el Proyecto ACUAVERDE promueve la gestión integrada de los recursos hídricos y la participación comunitaria en la planificación y ejecución de las acciones. De esta manera, se busca garantizar una gestión sostenible del agua y mejorar la calidad de vida de las comunidades que dependen de este recurso.

- 10) Proyecto Recarga de Acuíferos en Áreas Urbanas (Honduras): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en áreas urbanas de Honduras, donde la extracción excesiva de agua subterránea ha provocado la disminución del nivel de los acuíferos y la intrusión de agua salada. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para la gestión integrada del agua.
- 11) Proyecto de Recarga Artificial de Acuíferos en la Región Metropolitana (Costa Rica): Este proyecto se enfoca en la recarga artificial de acuíferos en la Región Metropolitana de San José, Costa Rica, que ha experimentado una disminución en la disponibilidad de agua debido a la extracción excesiva de agua subterránea. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para reducir la contaminación del agua.
- 12) Proyecto de Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle de Sula (Honduras): Este proyecto se enfoca en la recarga artificial de acuíferos en el Valle de Sula, una de las regiones más productivas de Honduras. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.
- 13) Proyecto de Recarga Artificial de Acuíferos en la Cuenca del Lago de Yojoa (Honduras): Este proyecto se enfoca en la recarga artificial de acuíferos en la Cuenca del Lago de Yojoa, una de las áreas más importantes para la producción agrícola y la conservación de la biodiversidad en Honduras. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para reducir la contaminación del agua.
- 14) Proyecto Recarga del Acuífero Sabana Yegua (República Dominicana): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la región de Sabana Yegua, una de las áreas más productivas de la República Dominicana. El proyecto

incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.

- 15) Proyecto Aguas Claras (Colombia): Este proyecto se enfoca en la recarga gestionada de acuíferos en la región de Bucaramanga, una de las áreas urbanas más grandes de Colombia. El proyecto incluye la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la recarga del acuífero y la promoción de la gestión integrada del agua.
- 16) Proyecto Manejo Integrado del Agua (Argentina): Este proyecto se enfoca en la gestión integrada del agua en la región de la Pampa, una de las áreas más productivas de Argentina. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.
- 17) Proyecto Agua para la Vida (Haití): Este proyecto se enfoca en la gestión del agua en la región de Petit-Goâve, una de las áreas más secas de Haití. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la implementación de medidas para mejorar la gestión del agua en la agricultura y la reforestación.
- 18) Proyecto Oasis (México): Este proyecto se enfoca en la gestión del agua en la región de los oasis de Baja California Sur, una de las áreas más áridas de México. El proyecto incluye la construcción de infraestructura de recarga y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para reducir la extracción de agua subterránea.

Satélites

Los satélites pueden ser utilizados en la gestión de la recarga hidráulica para monitorear el nivel de agua en los acuíferos y para identificar áreas donde se puede realizar la recarga. La tecnología de teledetección, que utiliza imágenes satelitales para analizar la superficie terrestre, puede ser muy útil para identificar áreas donde se pueden construir estructuras de recarga, como presas o pozos. Además, los datos obtenidos por los satélites también pueden ser utilizados para modelar el flujo de agua subterránea y predecir el impacto de la recarga en el acuífero. En resumen, los satélites pueden ser una herramienta valiosa para la gestión de la recarga hidráulica, proporcionando información precisa y actualizada sobre el estado del agua subterránea y ayudando a tomar decisiones informadas sobre cómo utilizar mejor los recursos hídricos disponibles.

Software en recarga de acuíferos gestionada

Un ejemplo de software que se puede utilizar para la localización de sistemas de recarga gestionada de acuíferos es el SIG (Sistema de Información Geográfica). Un Sistema de Información Geográfica (SIG), también conocido como GIS por sus siglas en inglés (Geographical Information System), es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento,

manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial. Los SIG son herramientas de análisis que ofrecen la posibilidad de identificar las relaciones espaciales de los fenómenos que se estudian.

Este software permite la visualización de datos geográficos y la creación de mapas temáticos que pueden ser utilizados para identificar áreas adecuadas para la recarga de acuíferos. También hay software específico para el diseño y gestión de sistemas de recarga de acuíferos, como el software *AquiferTest*, que se utiliza para la simulación y análisis de pruebas de bombeo en acuíferos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el software por sí solo no es suficiente para implementar un sistema de recarga gestionada de acuíferos, ya que se requiere un enfoque integral que incluya la evaluación hidrológica, la selección del sitio, el diseño y la construcción del sistema, así como la monitorización y gestión continua.

Metodología para realizar recarga hídrica gestionada

La metodología para realizar recarga gestionada incluye los siguientes pasos:

- Identificación de áreas adecuadas para la recarga: Se deben identificar áreas donde el agua de superficie o de lluvia pueda ser infiltrada en el acuífero subterráneo. Se pueden utilizar técnicas de teledetección y modelado hidrológico para identificar estas áreas.
- Selección de estructuras de recarga: Se deben seleccionar las estructuras de recarga adecuadas, como pozos, presas o zanjas de infiltración, dependiendo de las características del terreno y del acuífero.
- Diseño de la estructura de recarga: Se debe diseñar la estructura de recarga de acuerdo con las condiciones hidrológicas locales y las necesidades de la comunidad.
- Construcción de la estructura de recarga: Se debe construir la estructura de recarga según el diseño y las especificaciones técnicas.
- Monitoreo del nivel de agua subterránea: Se debe monitorear regularmente el nivel de agua subterránea para evaluar el impacto de la recarga en el acuífero.
- Evaluación del éxito de la recarga: Se debe evaluar el éxito de la recarga mediante la medición del aumento del nivel de agua subterránea y la mejora en la calidad del agua.
- Mantenimiento y gestión continua: Se debe mantener y gestionar continuamente la estructura de recarga para asegurar su funcionamiento óptimo y evitar problemas de contaminación o erosión.

6. MANUAL DE RECARGA GESTIONADA DE ACUIFEROS

Premisa

Este manual es un documento que proporciona instrucciones o información general pero a la vez con algo de detalle sobre cómo implementar la recarga gestionada de acuíferos en Guatemala. Tiene como propósito central, ayudar al usuario a comprender y utilizar la técnica de RGA, pretendiendo ser una herramienta de manera efectiva y eficiente.

Introducción

Existen diferentes manuales y guías sobre la recarga gestionada de acuíferos disponibles en línea. Algunos a mencionar son:

- i. *La guía técnica para el diseño y construcción de proyectos de recarga de acuíferos*, elaborada por la Comisión Nacional del Agua de México.
- ii. *El manual práctico de Recarga de acuíferos*, elaborado por la Universidad Politécnica de Valencia y
- iii. *El manual de diseño y construcción de proyectos de recarga de acuíferos*, elaborado por la Sociedad Internacional de Recarga de Acuíferos.

Es importante tener en cuenta que estas guías tienen enfoques y recomendaciones específicas para la región en la que se elaboraron. Es por ello que para Guatemala, hemos considerado algunos lineamientos generales y otros específicos pero dependerá mucho de la región en la que se quiera implementar dicha técnica RGA.

Contexto del agua en el mundo y en Guatemala

- Balance
- Usos
- Distribución
- Cambio climático
- Insostenibilidad
- Crecimiento poblacional
- Impermeabilización del suelo
- Uso de la tierra

¿Qué es un acuífero?

Según la última versión de la International Hydrogeological Map of Europe (IHME), publicada por la UNESCO en 2019, se define un acuífero como "una formación geológica o un grupo de formaciones geológicas permeables, que tienen capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades significativas" (International Hydrogeological Map of Europe, 2019, p. 9).

¿Qué es la recarga de acuíferos gestionada?

Según la American Society of Civil Engineers (ASCE), la recarga gestionada de acuíferos se define como "un proceso planificado y deliberado de introducir agua en un acuífero para lograr objetivos específicos, como aumentar el almacenamiento de agua, mejorar la calidad del agua o mitigar los efectos de la sobreexplotación" (ASCE, 2020).

Formas de recarga de un acuífero

- No intencional: entiéndase la infiltración profunda del agua de riego o las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua potable y del drenaje.
- No gestionada: entiéndase los pozos utilizados para el drenaje del agua de las tormentas, las filtraciones de los tanques sépticos, generalmente utilizados para la disposición de agua no requerida y generalmente sin tratamiento previo.
- Gestionada: Como estrategia a través de estructuras diseñadas expreso para recargar acuíferos como pozos de inyección, embalses de infiltración y galerías que permiten introducir agua a los acuíferos proveniente de la lluvia, tormentas, agua residual tratada, ríos, o agua de otros acuíferos, agua que posteriormente es recuperada para todo tipo de usos.

Objetivos de la recarga de acuíferos gestionada

- Aumentar la disponibilidad de agua subterránea.
- Incrementar el volumen de agua en los acuíferos para asegurar su disponibilidad a largo plazo.
- Restablecer el equilibrio entre la recarga y la extracción, lo que garantiza la sostenibilidad del recurso.
- Controlar la calidad del agua, al permitir filtrar el agua de lluvia o la proveniente de otras fuentes a través del suelo antes de que alcance el acuífero, mejorando así su calidad y reduciendo los niveles de contaminación.
- Mitigar la intrusión salina en zonas costeras.
- Reducir el riesgo de inundaciones, al almacenar temporalmente el exceso de agua durante las épocas de lluvia o en zonas con elevado riesgo de inundación.
- Fomentar la cooperación y sinergismo entre actores, al involucrar a diferentes actores, como autoridades, agricultores, comunidades locales, entre otros,

Fuentes de agua a recargar

- Ríos
- Arroyos
- Presas
- Agua potable
- Agua residual tratada
- Agua de lluvia

Algunas directrices generales

- Análisis meteorológico y climatológico
- Explorar modelos hidrogeológicos conceptuales comprensibles
- Conocer el acuífero y estimar la disponibilidad
- Determinar el balance hídrico y sus componentes
- Analizar y evaluar la calidad del agua a recargar
- Explorar modelos numéricos para el monitoreo, evaluación y seguimiento de los proyectos de recarga

Información hidrogeológica a considerar

- Tipo de acuífero
- Capacidad de infiltración (m/día)
- Conductividad hidráulica del suelo (m/día)
- Porosidad y porosidad efectiva del suelo
- Profundidad al nivel freático o superficie piezométrica
- La calidad del agua (subterránea y de recarga)
- Disponibilidad de terreno
- Espesor saturado del acuífero
- El volumen de agua disponible para la recarga

Información de calidad del agua a considerar para recarga

- Presencia de contaminantes fuera de las normativas actuales (residuos farmacéuticos, hormonas, emergentes, etc.)
- Elementos y reacciones químicas adversas (As, F, Fe, Mn).
- Dilución
- Remoción de sólidos en suspensión y metales pesados
- Agente patógenos
- Compuesto orgánicos, nitratos, etc.
- Solutos

Algunas limitantes a considerar

- Manejo de la colmatación
- Operación y mantenimiento del sistema
- Monitoreo y evaluación de las áreas de infiltración
- Desconocimiento preciso de la Hidrología, Geología, Meteorología, Climatología, etc., que conlleva a diseños inadecuados.
- Agua de baja calidad en el acuífero
- Aceptabilidad socioeconómica y política
- Falta de personal capacitado

Recarga por medio de pozos

Se conocen dos tipos principales de recarga gestionada de acuíferos:

- Pozos de recarga someros:
 - En este caso, los pozos abiertos y de bombeo son utilizados para recargar acuíferos con niveles freáticos someros, con capas superficiales de baja permeabilidad.
 - Luego tenemos los pozos secos, los cuales son resultado de la disminución de los mantos acuíferos a causa de la sobre explotación.
 - A pesar de su utilidad, presenta la limitante de que puede introducirse compuestos orgánicos y bacterias contaminantes directamente al acuífero sino se considera como mitigarlos. Sin embargo, es importante mencionar que en términos económicos es una ventaja las estructuras existentes, porque los costos son mínimos.
 - A una profundidad de 5 a 20 metros aproximadamente, es muy útil considerar la combinación de pozos de recarga y zanjas de infiltración.
 - Pozos de recarga profunda:
 - ✓ Estos son utilizados al tener estratos gruesos de baja permeabilidad, encima del acuífero.
 - ✓ Se utilizan básicamente dos tipos de aplicaciones.
 - Pozos de almacenamiento y recuperación (ASR). Se utilizan para la inyección y la extracción del agua. Es una de las técnicas de recarga de pozos profundos más utilizados hoy en día.
 - Pozos de almacenamiento, transferencia y recuperación (ASTR). Se utiliza para inyectar agua a un pozo, y luego extraerla en otro pozo ubicado a una distancia adecuada con el propósito de incrementar el tiempo de viaje del agua en el acuífero y asimismo obtener el beneficio de la capacidad de depuración del agua en el acuífero.

Algunas características generales de los pozos de recarga

- La colmatación del sistema hay que monitorearla y evaluarla constantemente, porque debido al diseño de los pozos de recarga que incluye la perforación y rellenado con un filtro compuesto de material granulado para restringir la entrada de sólidos en suspensión, contribuye con ello.
- Si el terreno es limitado, los pozos de recarga son una estrategia adecuada.
- La calidad del agua a recargar debe ser analizada según normas COGUANOR.
- Al utilizar pozos de almacenamiento y recuperación, en materia económica es una ventaja ya que los costos no son muy altos y la colmatación es removida durante el periodo de recuperación.
- Se debe considerar la evaluación de impacto ambiental de estos proyectos.

Técnicas de recarga básicas en Guatemala

- Inundación controlada o gestionada
- Zanjas
- Surcos y drenajes de riego
- Riego
- Estanques
- Balsas de infiltración

7. DIGITAL-ENABLED GREEN INFRASTRUCTURE FOR SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGER

Traducido al español de: <https://digires.inowas.com/about/>

Antecedentes

A pesar de la abundancia de recursos hídricos naturales, las áreas urbanas de América Latina y el Caribe (ALC) enfrentan importantes deficiencias en la prestación de servicios básicos como el abastecimiento de agua potable. La causa es múltiple e incluye la heterogeneidad espacial y temporal de los recursos hídricos, el balance hídrico negativo causado por la sobreexplotación y las insuficientes capacidades humanas y de gobernanza. Las soluciones convencionales basadas en infraestructura “gris” construida no cubren las necesidades básicas de la población, por lo que necesitamos urgentemente opciones técnicas apropiadas y aceptadas localmente. En este proyecto se propone la recarga de acuíferos gestionados (MAR) para mejorar la infraestructura hídrica tradicional con soluciones más ecológicas inspiradas en la naturaleza que permitan un abastecimiento de agua más equitativo.

Objetivo

El objetivo general es el desarrollo y la utilización de herramientas basadas en TIC, junto con observaciones de ciencia ciudadana para el diseño e implementación de MAR como componente inspirado en la naturaleza de la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región de ALC. La eficiencia de las soluciones propuestas se demostrará a través de casos de éxito, mediante el diseño y la implementación de esquemas SAM demostrativos a pequeña escala con la participación de las partes interesadas y el desarrollo de capacidades para el desarrollo urbano sostenible.

Metodología

Para la implementación de sus objetivos, el proyecto hará uso de un enfoque de investigación holístico mediante la combinación de análisis de contenido, simulaciones por computadora, investigaciones empíricas, investigación participativa, investigación de estudios de casos y desarrollo de capacidades. La metodología propuesta incluye:

- Identificación, análisis y promoción de mejores prácticas de gestión sostenible de aguas subterráneas en la región de ALC (análisis de contenido e investigación de estudios de casos);
- Análisis de predicción de la eficiencia de MAR a través de simulaciones por computadora utilizando una plataforma gratuita de modelado de aguas subterráneas basada en la web;
- Investigaciones empíricas para el diseño y optimización de esquemas MAR a escala piloto y su implementación como proyectos insignia en los países socios;

- Participación de diferentes grupos de partes interesadas, a través de talleres de partes interesadas y proyectos de ciencia ciudadana, para dar forma a las soluciones óptimas para la gestión sostenible del agua (investigación participativa);

¿Qué es INOWAS?

Traducido al español de: <https://inowas.com/about/>

INOWAS es la abreviatura de Innovative Groundwater Solutions, una plataforma de modelado de aguas subterráneas basada en la web que tiene como objetivo hacer que las herramientas de modelado de aguas subterráneas sean fácilmente accesibles a través de Internet. Todas nuestras herramientas se pueden utilizar de forma gratuita directamente desde el navegador web, sin necesidad de instalar ningún software adicional, complementos, etc. La implementación basada en la web también facilita el intercambio de datos y modelos, lo que permite una fácil colaboración entre los usuarios. Todas las herramientas implementadas se basan en el código fuente abierto existente o se desarrollaron a partir de ecuaciones de flujo de agua subterránea bien conocidas. El enfoque principal de las herramientas está en los procesos de transporte de agua que ocurren en la zona de suelo saturado que se describen mediante ecuaciones analíticas o numéricas.

Además, la plataforma incluye varias herramientas simples derivadas de la minería de datos y las correlaciones empíricas. Aunque el software generalmente se adapta a la planificación de aplicaciones de recarga de acuíferos administrados (MAR), la mayoría de las herramientas se pueden usar para simulaciones generales de flujo de agua subterránea. La herramienta más relevante es una nueva interfaz gráfica basada en la web para MODFLOW, el modelo hidrológico modular de diferencias finitas del USGS considerado como estándar internacional para la simulación de las condiciones de las aguas subterráneas y las interacciones entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Para obtener más información sobre nuestro software basado en MODFLOW, lea nuestra documentación en línea y vea una selección de modelos MODFLOW creados y compartidos por nuestros usuarios.

8. RECOMENDACIONES

La gestión adecuada de los acuíferos es esencial para garantizar un suministro de agua sostenible y de calidad para las comunidades. A continuación, se presentan una serie de recomendaciones para mejorar la gestión y recarga de acuíferos en distintas instancias:

1. A nivel local, es fundamental que las municipalidades, municipios y corporaciones municipales realicen una recarga gestionada de los acuíferos. Esto implica llevar a cabo un estudio hidrográfico exhaustivo que permita conocer la situación actual de los recursos hídricos en la zona. Además, se deben contabilizar los pozos privados y estatales, así como instalar medidores de flujo para monitorear y controlar el uso del agua. Realizar un balance hídrico por zona y región resulta crucial para determinar la disponibilidad de agua y establecer medidas de gestión adecuadas.
2. A nivel gubernamental, los gobiernos centrales deben desarrollar políticas y programas específicos para la recarga gestionada de acuíferos. Estas iniciativas deben incluir medidas para el mantenimiento y conservación de ecosistemas, reservas forestales y cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos. Es importante reconocer que la recarga de los acuíferos no solo depende de la gestión humana, sino también de la protección de los sistemas naturales que los alimentan.
3. Es fundamental evitar prácticas de recarga de acuíferos inadecuadas que puedan conducir a la contaminación del agua. Se deben implementar medidas para prevenir la introducción de materia orgánica, inorgánica y elementos tóxicos en los acuíferos. Asimismo, se debe fomentar el uso de buenas prácticas de gestión que incluyan el acompañamiento técnico, ambiental y de ingeniería para garantizar la eficacia de las intervenciones.
4. La realización de un balance hídrico completo y actualizado es esencial para comprender cómo las condiciones climáticas, la cobertura forestal y la infraestructura verde y gris afectan la recarga natural de los acuíferos. Este análisis permitirá identificar los factores que influyen en la disponibilidad de agua y orientar las decisiones de gestión.
5. Es recomendable mapear las zonas de recarga natural de los acuíferos y tomar medidas para conservar los ecosistemas saludables presentes en esas áreas. Además, se deben implementar estrategias de recuperación de ecosistemas que promuevan la recarga natural de los acuíferos, como la restauración de áreas degradadas o la creación de corredores verdes.
6. Para mejorar la gestión de la recarga de acuíferos, es importante utilizar herramientas digitales y software disponibles que faciliten el estudio y análisis de los mejores lugares y técnicas para llevar a cabo esta actividad. Estas herramientas pueden ayudar a evaluar la viabilidad de proyectos de recarga y optimizar los recursos disponibles.
7. Una excelente manera de obtener información práctica y conocimientos sobre la recarga gestionada de acuíferos es visitar el sitios pilotos de recarga de acuíferos gestionada, por ello se recomienda visitar el sitio piloto de la Facultad de

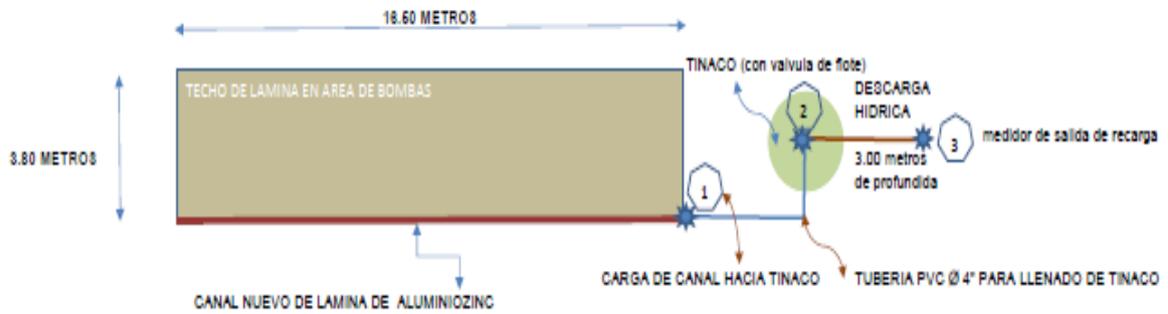
Ingeniería en el campus ERIS, ubicado en la zona 13 de la ciudad de Guatemala.
Allí se podrán observar las técnicas y sistemas utilizados en la recarga gestionada.

9. REFERENCIAS

1. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (s.f.). *Emergencia I. Estudio de factibilidad de desarrollo de las aguas subterráneas en el Valle de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: 86 p.
2. American Society of Civil Engineers (ASCE). (2020). *Standard Guideline for the Implementation of Managed Aquifer Recharge for Water Resources Development*. ASCE/EWRI 67-20. Reston, Virginia.
3. Aparicio, Francisco (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. 1a ed. México: Limusa, S. A., 1989. 303 p.
4. Asano T. (1985). *Artificial Recharge of Groundwater*. Butterworth Publishers. Stoneham, USA.
5. Central Groundwater Board. (2000). *Guide on artificial recharge to groundwater*. Ministry of water resources, New Delhi, India.
6. Chuo, K. (2000). *Proyecto de desarrollo del agua subterránea del Valle de la Ciudad de Guatemala*. Emergencia I. Guatemala: Cheo Kaihatsu Corporation, Ingenieros Consultores. 145 p.
7. Dillon P.J. (2002). *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th international symposium on artificial recharge of groundwater, ISAR -4. Adelaide, South Australia. Swets & Zeitlinger B.V.
8. Dirección de Planificación Urbana de la Municipalidad de Guatemala. (s.f.). *Plan de Ordenamiento Territorial*. Consulta: 9 de marzo de 2021.
9. Fernández Escalante, E., y San Sebastián Sauto, J. (2018). *La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático*. Recuperado de: www.conama2018.org
10. Gale I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. IAH - MAR, UNESCO IHP. Paris, France.
11. Herrera, I. (1995). *Manual de hidrología*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 223 p.
12. Hofkes E.H., Visscher J.T. (1986). *Artificial Groundwater Recharge for water supply of medium-size communities in developing countries*. International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation. The Hague, The Netherlands.

13. Mejía, Dénnys. *¿Nos estamos quedando sin agua en el área metropolitana?* Consulta: 9 de marzo de 2021.
14. Tuinhof A., Heederik J.P. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage: making better use of our largest reservoir*. Netherlands National Committee for the IAH. Utrecht, The Netherlands.
15. U.S. EPA. (1999). *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*. EPA-821-R-99-012. Sections 5 and 6. Washington, DC
16. Weber F., Hoskins M.W. (1983). *Soil Conservation technical sheets*. International Training Division / Office of International Cooperation and Development of the U.S. Department of Agriculture.
17. Wood A. (1990). Natural resource management and rural development in Ethiopia. *In Ethiopia: Rural Development Options*, Pausewang S, Cheru F, Bruene S, Chole E (Eds). Zed Books: London; 187-198.

10. ANEXOS



PLANTA AREA DE BOMBAS ERIS ZONA 13

- 1 CARGA DE CANAL HACIA TINACO CON TUBERIA PVC
- 2 TINACO CON VALVULA DE FLOTE DE LLENADO
- 3 TUBERIA DE DESCARGA CON MEDIDOR DE SALIDA HACIA TERRENO

Figura 1. Esquema de sitio piloto de recarga hídrica en ERIS, USAC, zona 13.

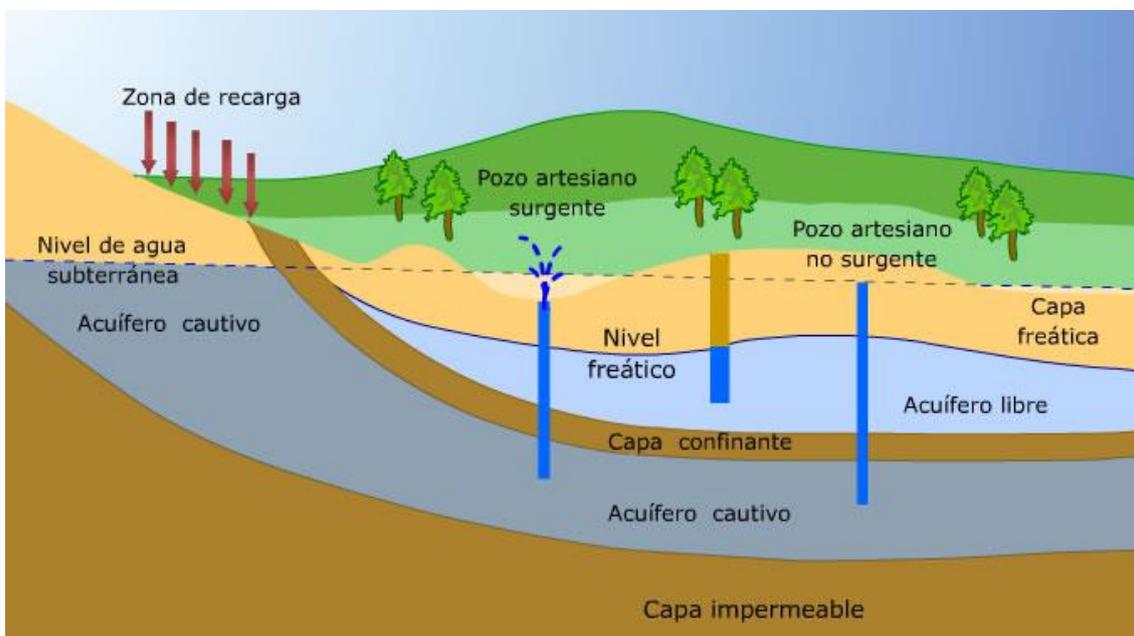


Figura 2. Aguas subterráneas, de Cienciaesfera.

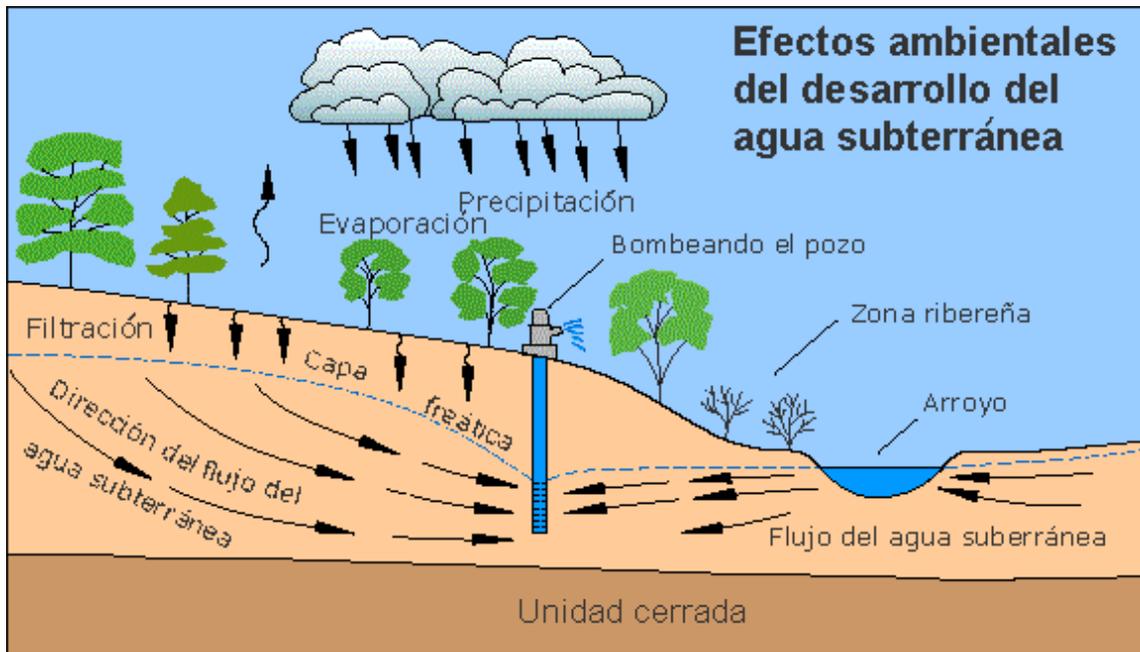


Figura 3. Efectos ambientales del desarrollo del agua subterránea, de USGS.

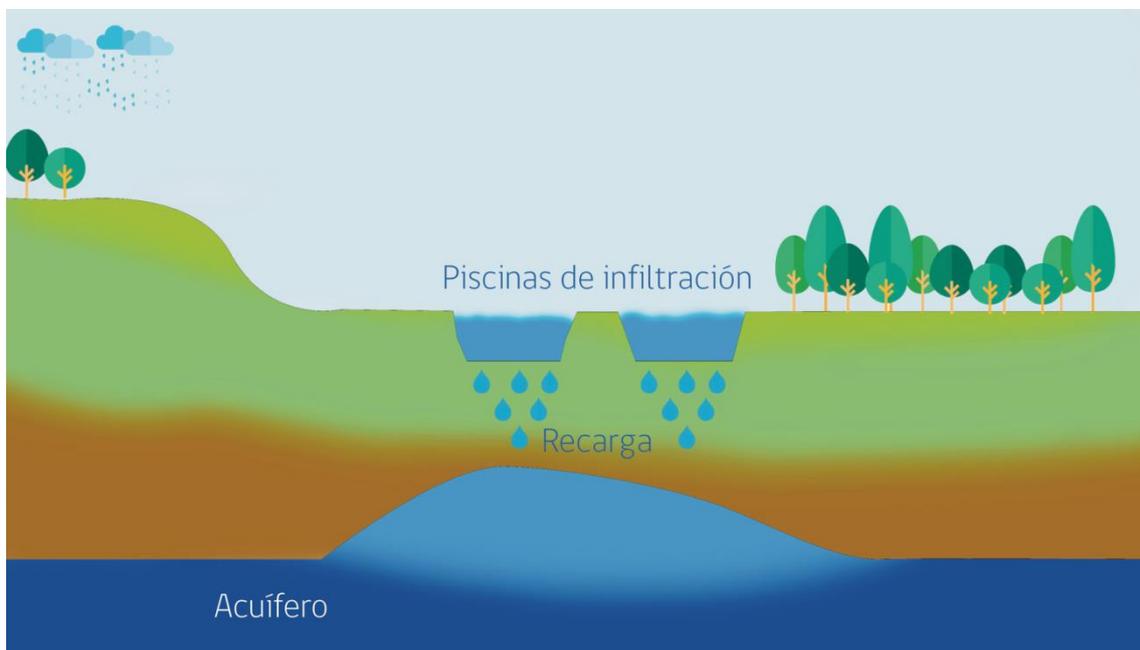


Figura 4. Piscinas de infiltración, Ministerio de Agricultura de Chile.



TALLER INTERNACIONAL

RECARGA GESTIONADA DE ACUIFEROS: " RUMBO A LA SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS"

PRESENTACIÓN DE PROYECTO
PONENCIAS
FORO

Ciudad de Quetzaltenango
Lunes 3 al 5 de octubre
09:00 a 18:00 pm

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

INOWAS **DIGIRES**

GOBIERNO de GUATEMALA
DR. ALEJANDRO GUAMAYAT

SECRETARÍA NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

EIM ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

USAC FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Figura 5. Afiche, taller internacional.

CURSO DE CAPACITACIÓN EN LÍNEA:

IDENTIFICACIÓN, ANÁLISIS Y PROMOCIÓN DE LAS MEJORES PRÁCTICAS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LATINOAMÉRICA

IMPARTIDO POR:
DR. CATALIN STEFAN

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE DRESDEN, FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
DEPARTAMENTO DE HIDROCIENCIAS, GRUPO DE INVESTIGACIÓN INOWAS

COMO PARTE DEL TALLER:
**RECARGA
GESTIONADA DE
ACUÍFEROS: "RUMBO A
LA SOSTENIBILIDAD DE
LOS RECURSOS
HÍDRICOS"**

 **LIVE**

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

4 DE OCTUBRE
9:00-12:00 HORAS



PROYECTO INTERCTI 02-2021: DIGITALIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Figura 6. Afiche, curso de capacitación en línea.



Groundwater Modelling for Managed Aquifer Recharge

Online training course within the ERANET-LAC project DIGIRES

Catalin STEFAN

Technische Universität Dresden, Faculty of Environmental Sciences,
Department of Hydrosociences, Research Group INOWAS

Online course, 22 June 2022

Figura 7. Capacitación virtual.

Sustainability of the water resource through managed aquifer recharge in Guatemala

Jorge I. Cifuentes^{1*}, Wener Ochoa¹, Andrea M. Barrera¹, Migdalia del Cid¹, Osber Carias¹, Karla J. Corzantes¹, Gabriel Estupinian,¹ Catalin Stefan²

¹Faculty of Engineering, University of San Carlos of Guatemala, Guatemala

²Faculty of Environmental Sciences, Technical University of Dresden, Germany

*Corresponding author

Abstract

Water resources are critical for sustaining life, yet they are often undervalued in society, resulting in global concerns about achieving the rational and sustainable use of this vital resource. Groundwater is a critical water source, but it is currently being overexploited, leading to an imbalance in the water balance, with withdrawals exceeding recharges. This has contributed to a decline in groundwater levels, making it crucial to find sustainable solutions to restore groundwater levels and increase water availability. Managed Aquifer Recharge (MAR) is a promising approach to address the challenge of overexploitation and imbalance in the water balance. MAR considers the hydrogeological and ecosystem elements with the strategic objective of increasing the water availability of aquifers. This research aims to establish the basis for designing a pilot site for MAR at the Regional School of Sanitary Engineering and Hydraulic Resources in Guatemala (ERIS), through a thorough understanding of the soil, stratigraphy, and climatology in the area. The research will contribute to the knowledge base of sustainable water resource management and provide practical insights into designing and implementing MAR in similar areas.

Key words: Management, hydrogeological cycle, climatology, sustainability.

Figura 8. Artículo científico Sustainability of the water resource through managed aquifer recharge in Guatemala.

DETECCIÓN DE METALES CONTENIDOS EN AGUA SUBTERRÁNEA POR MEDIO DE ESPECTROFOTOMETRÍA

Jorge I. Cifuentes^{a,b}, José Cortéz^{a,b}, Andrea Barrera^{a,b}

^aFacultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala 11 Avenida, Cdad. de Guatemala 01012

^bLaboratorio de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala 01012

Resumen

El agua, como elemento fundamental para procesos biológicos, industriales y agrícolas exige de una alta demanda, paridad a su calidad, que según sean sus características físicas, químicas y biológicas puedan certificarse como apta para su uso. Este estudio utiliza el método instrumental de espectrofotometría para la cuantificación de metales en agua, los cuales fueron aluminio (Al), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Cada metal estudiado fue sometido a una longitud de onda seleccionada, cada muestra estuvo sujeta a un proceso químico por reactivos específicos para lograr medir la absorbancia de cada metal. Para obtener una ecuación que relacionara la absorbancia con la concentración, se utilizaron curvas de calibración basadas en trabajos previos y coherente con este estudio. Se calcularon concentraciones de 0.012 mg/l; 0.239 mg/l; 0.086 mg/l; 0.017 mg/l para aluminio, cobre, cromo y hierro respectivamente, la concentración de manganeso no pudo ser calculada. Como complemento, se utilizaron tiras indicadoras de color para la cuantificación de arsénico (As) el cual arrojó un resultado de 0 mg/l. Los resultados fueron comparados con las normativas según la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR).

Palabras clave: contaminantes metálicos, análisis de agua, reactivo, espectrofotometría uv-vis, acuíferos.

Figura 9. Artículo científico Detección de metales contenidos en agua subterránea por medio de espectrofotometría.

EFFECTOS DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL SOBRE LA ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA.

Karla Lisbeth Jul Corzantes

Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala 11 Avenida, Cdad. de Guatemala 01012

Resumen

El abastecimiento de agua en la Ciudad de Guatemala depende de la captación de agua superficial y de aguas subterráneas. El ciclo de la naturaleza ha sido afectado por el crecimiento poblacional y por la impermeabilización del suelo. El presente trabajo trata de determinar la disminución de la cubierta vegetal del área de la Ciudad de Guatemala mediante el análisis de imágenes satelitales, y cómo este fenómeno ha provocado el decaimiento de la permeabilidad del suelo y de los niveles de extracción de agua potable. La Ciudad de Guatemala ha ido sustituyendo el terreno natural, que infiltraba la lluvia gradualmente a los acuíferos, por cubiertas de edificaciones, viviendas y calles. Esto ha provocado que el núcleo urbano ósea un suelo impermeable, donde es. El principal efecto negativo de la impermeabilidad en el suelo y que, al sellar las superficies verdes, se pierde la humedad natural, interrumpiendo el ciclo del agua. Utilizando el sistema de información geográfica GIS, se determinó que la zona 6, es la zona más crítica en impermeabilización del suelo con un 91%, siendo una zona casi impermeable y con un alto índice poblacional. Esto ha provocado el colapso del sistema de dotación poblacional de agua domiciliar y diversos socavamientos.

Palabras clave: Impermeabilización, Infiltración, Ciclo, GIS, Población.

Figura 10. Artículo científico Efectos del crecimiento poblacional sobre la escorrentía e infiltración en el norte de la Ciudad de Guatemala.

WATER
ENGINEERING
INGENIERÍA
DEL AGUA

EDICIÓN SOBRE:
RECARGA DE
ACUÍFEROS
GESTIONADA

Volumen 3

2023

ISBN 978-99939-0-927-9

ISBN: 978-99939-0-927-9



9 789993 909279