



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE DIRECTRICES PARA LA RECARGA GESTIONADA DE
ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Andrea María Barrera Leiva

Asesorada por el Ph. D. Wener Armando Ochoa Orozco

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE DIRECTRICES PARA LA RECARGA GESTIONADA DE
ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANDREA MARÍA BARRERA LEIVA

ASESORADA POR EL PH. D. WENER ARMANDO OCHOA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE DIRECTRICES PARA LA RECARGA
GESTIONADA DE ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 28 de febrero de 2022.



Andrea María Barrera Leiva



EEPF-PP-0603-2022

Guatemala, 28 de febrero de 2023

Director
Gilberto Morales Baiza
Escuela De Ingenieria Mecanica
Presente.

Estimado Ing. Morales

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DIRECTRICES PARA LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Extracción sostenible de agua subterránea.**, presentado por la estudiante **Andrea María Barrera Leiva** carné número **201612548**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en CIENCIAS en Gestion De Recursos Hidrogeologicos.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

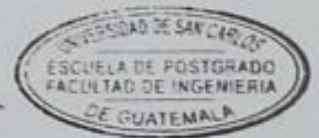
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Agr. MSc. Wener Ochoa
Colegiado 3,868

Mtro. Wener-Armando Ochoa Orózco
Asesor(a)

Mtro. Julio Roberto Luna Aroche
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIM-0603-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DIRECTRICES PARA LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Andrea María Barrera Leiva**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Gilberto Morales Baiza
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica

Guatemala, febrero de 2023



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.405.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación en el área de: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE DIRECTRICES PARA LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **Andrea María Barrera Leiva**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por acompañarme y guiarme en la vida.
Mis padres	María Luisa Leiva y Carlos Alberto Barrera García. Por su amor y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Luisa Fernanda, Carlos Sebastián y Santiago Alberto Barrera Leiva. Por acompañarme en los momentos difíciles.
Mis abuelas	Olivia Leiva y Dora García. Por permitirme aprender más de la vida a su lado.
Mis amigos	Por su cariño y por siempre estar.

AGRADECIMIENTOS:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme formar parte de tan importante casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por darme el espacio para poder desarrollarme en un ambiente académico enriquecedor y motivador.
Escuela de Ingeniería Mecánica	Por darme la oportunidad de adquirir conocimientos y habilidades valiosas como profesional.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por darme los conocimientos para llevar a cabo el presente trabajo de graduación.
Ph. D. Wener Armando Ochoa Orozco	Por su asesoría, paciencia y apoyo en la elaboración del presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	8
3.3. Formulación del problema	9
3.4. Delimitación del problema	10
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Ciclo hidrológico	17

7.2.	Acuíferos	20
7.2.1.	Acuíferos confinados	21
7.2.2.	Acuíferos no confinados	21
7.3.	Agua subterránea.....	22
7.4.	Cambio climático	22
7.4.1.	Impacto del cambio climático en los recursos hídricos.....	23
7.4.2.	Adaptaciones al cambio climático	24
7.5.	Recarga de acuíferos gestionada	25
7.5.1.	Beneficios de la recarga gestionada de acuíferos...	26
7.6.	Criterios primarios de implementación de sistemas de recarga de acuíferos gestionada	27
7.6.1.	Capacidad del suelo para infiltrar el agua	27
7.6.2.	Disponibilidad del agua basada en el clima.....	27
7.6.3.	Tipo de fuente de agua	28
7.6.4.	Necesidades o desafíos de la calidad del agua	29
7.7.	Elementos clave en el proceso de recarga gestionada de acuíferos	29
7.7.1.	Fuente de agua de recarga	30
7.7.2.	Tratamiento de agua	30
7.7.3.	Método de recarga	30
7.7.4.	Sitio de recarga	31
7.7.5.	Recuperación de agua	31
7.7.6.	Usos finales del agua recuperada	32
7.8.	Tipos de recarga de acuíferos gestionada	32
7.8.1.	Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA).....	33
7.8.2.	Almacenamiento, transporte y recuperación de acuíferos (ATRA).....	34

7.8.3.	Pozos de zona vadosa	34
7.8.4.	Estanques de infiltración.....	34
7.8.5.	Tanques de percolación	35
7.8.6.	Cosecha de agua de lluvia.....	35
7.8.7.	Galerías de infiltración	35
7.8.8.	Liberaciones de recarga	36
7.9.	Directrices de recarga de acuíferos gestionada	36
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	39
9.	METODOLOGÍA.....	43
9.1.	Características del estudio	43
9.2.	Unidad de análisis	44
9.3.	Variables.....	44
9.4.	Fases de la investigación	47
9.4.1.	Fase 1.....	47
9.4.2.	Fase 2.....	48
9.4.3.	Fase 3.....	49
9.4.4.	Fase 4.....	51
9.4.5.	Fase 5.....	52
9.5.	Resultados esperados.....	53
9.5.1.	Fase 1.....	53
9.5.2.	Fase 2.....	54
9.5.3.	Fase 3.....	54
9.5.4.	Fase 4.....	55
9.5.5.	Fase 5.....	55
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	57
10.1.	Fase 1.....	57

10.2.	Fase 2	57
10.3.	Fase 3	59
10.4.	Fase 4	60
10.5.	Fase 5	61
11.	CRONOGRAMA	63
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	65
12.1.	Recursos	65
12.1.1.	Consideraciones.....	66
13.	REFERENCIAS	69
14.	APÉNDICES	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema del ciclo hidrológico.....	19
2.	Beneficios de la recarga gestionada de acuíferos.....	26
3.	Tipos de recarga de acuíferos gestionada	33

TABLAS

I.	Clasificación de las variables de estudio.....	44
II.	Descripción de las variables de estudio	45
III.	Datos de temperatura y precipitación.....	49
IV.	Datos de prueba de infiltración.....	51
V.	Recolección de muestras de agua pluvial	52
VI.	Análisis de perfiles estratigráficos y/o litográficos	59
VII.	Comparación entre los resultados de análisis y la normativa	60
VIII.	Límites máximos permisibles (LMP) según la normativa	60
IX.	Cronograma	63
X.	Recursos	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
cm	Centímetro
gal	Galones
°C	Grados Celsius
h	Horas
L	Litros
m	Metro
mg/l	Miligramos por litro
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
min	Minutos
pH	Potencial de hidrógeno
s	Segundos
S/cm	Siemens por centímetro
T	Tiempo
UFC/ml	Unidades formadoras de colonias por milímetro
UNT	Unidad nefelométrica de turbidez

GLOSARIO

Acuífero	Formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua de forma que pueda ser aprovechada como recurso.
Aguas subterráneas	Agua que se almacena en las unidades geológicas conocidas como acuíferos.
Cambio climático	Variación global del clima de la Tierra.
Ciclo hidrológico	Modelo conceptual que explica y describe el movimiento del agua en la Tierra.
COT	Carbono orgánico total.
DBO	Demanda biológica de oxígeno.
Directriz	Instrucción o guía que se da para orientar la acción o el comportamiento en una determinada situación.
DQO	Demanda bioquímica de oxígeno.
Estanque	Masa de agua natural o artificial que se encuentra generalmente en un lugar poco profundo y que se utiliza para almacenar agua u otros fines utilitarios o decorativos.

Geología	Ciencia que estudia la estructura, composición, origen y evolución de la Tierra y sus procesos geológicos.
Hidrogeología	Rama de la geología que se ocupa del estudio integral de las aguas subterráneas.
Hidroquímica	Rama de la hidrogeología que estudia la composición química de las aguas subterráneas y superficiales y su relación con el medio ambiente.
Infiltración	Proceso de penetración del agua en el suelo y/o las rocas subyacentes.
LMP	Límite máximo permisible.
Percolación	Proceso de filtración o movimiento del agua a través del suelo y/o de los acuíferos.
Pozo	Obra de captación vertical que permite la exploración y/o explotación del agua freática.
Precipitación	Caída del agua que se contiene en la atmósfera en la superficie terrestre.
RAG	Recarga de acuíferos gestionada.
TSS	Total de sólidos en suspensión.

RESUMEN

Ampliamente se sabe que en el presente los mantos acuíferos están en declive de su caudal hídrico en centros urbanos. En Guatemala, país en el que no hay orden ni límites en el manejo y explotación de las aguas subterráneas, el problema ya es evidente. Según monitoreos de la Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (FUNCAGUA) en algunas áreas de la Región Metropolitana de Guatemala, los niveles de agua han experimentado descensos anuales de entre 1 y 65 metros (FUNCAGUA, 2018).

Además de los problemas derivados de la sobreexplotación de acuíferos, los recursos hídricos también se enfrentan a los retos impuesto por el cambio climático, entre los que destacan fenómenos como inundaciones intensas y sequías severas. Cabe destacar que a nivel general los escenarios de cambio climático para Guatemala proyectan un aumento de temperatura de entre tres y seis grados para finales de siglo y se prevé una disminución de entre el 10 al 30 % de la precipitación a nivel nacional (Rivera *et al.*, 2019).

De acuerdo con Van-Engelenburg *et al.* (2020), la recarga de acuíferos gestionada (RAG) es una estrategia para abordar la disminución de la disponibilidad de agua que se utiliza para recargar los sistemas de agua subterránea sometidos a estrés con fines de recuperación o adaptación. Aunque la recarga gestionada de acuíferos es una de las medidas con más éxito para mitigar los efectos de la sobreexplotación de acuíferos y de adaptación al cambio climático, en la gran mayoría de países se encuentra en estado inicial o experimental, como es el caso de Guatemala.

El presente diseño de investigación busca establecer las directrices de recarga de acuíferos gestionada para la adaptación al cambio climático para el área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A partir de datos climáticos, del suelo, hidrogeológicos e hidroquímicos que sean obtenidos mediante la revisión de datos históricos y mediante trabajo de campo serán determinadas las técnicas y métodos de recarga de acuíferos gestionada, lo que permitirá establecer las directrices para el caso específico de la USAC.

1. INTRODUCCIÓN

Los niveles de aguas subterráneas en el área del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala se ven afectados por la sobreexplotación de acuíferos y por la alteración de los patrones de lluvia. Las consecuencias pueden ser varias e incluyen el compartimento de acuíferos, la compactación del terreno, la degradación de la calidad del agua, la desecación de los sistemas fluviales, el descenso de los niveles piezométricos de agua en los pozos, entre otras. Esto ocasiona al mismo tiempo la reducción de la capacidad de los acuíferos, el hundimiento del suelo, el abandono de pozos, el secado de las zonas húmedas y la reducción del agua disponible para la población.

Se propone por medio de esta investigación establecer las directrices de recarga de acuíferos gestionada para la adaptación al cambio climático para el caso de la USAC, Guatemala. Con la solución propuesta se espera contribuir con la extracción sostenible de aguas subterráneas en el área de estudio. Los resultados servirán como base para el establecimiento de futuros proyectos de recarga de acuíferos gestionados en zonas que compartan características hidrogeológicas, hidrogeoquímicas e hidrometeorológicas con el área de estudio. A nivel general, los resultados permitirán plantear un modelo en Guatemala que permita hacerle frente a la problemática del descenso de los niveles de aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Guatemala.

El informe final de la investigación contendrá, además de las secciones iniciales como índices, lista de símbolos, glosario, planteamiento del problema, objetivos, resumen e introducción, el marco teórico en el que se desarrollarán

temas relacionados a la investigación como lo es el del ciclo hidrológico, acuíferos, aguas subterráneas, cambio climático, recarga gestionada de acuíferos, criterios para la implementación, elementos claves, tipo de recarga y directrices de recarga gestionada de acuíferos. Posteriormente se presentará el desarrollo de la investigación con el análisis de los criterios seleccionados y los resultados y directrices de recarga gestionada de acuíferos para el área de interés. Finalmente se presentarán conclusiones, recomendaciones, y un listado de referencias bibliográficas y anexos.

2. ANTECEDENTES

La recarga hídrica gestionada es una de las medidas de gestión hídrica más exitosas para combatir los efectos de la sobreexplotación de acuíferos y del cambio climático. En el artículo científico *Inventario de esquemas de recarga de acuíferos gestionada en América Latina y el Caribe* de Bonilla *et al.* (2018), se reporta que esta tecnología se utiliza actualmente en 10 países de América y el Caribe. Según Bonilla *et al.* (2018) son únicamente 3 los países en la región que tienen regulaciones para los proyectos de recarga gestionada de acuíferos (Colombia, Chile y México).

En el estudio *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos*, de el Ministerio de Obras Públicas (2014) se desarrolla una guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile. La guía incluye la revisión de casos de recarga gestionada de acuíferos en América y el Caribe y alrededor del mundo. Además, según Bonilla *et al.* (2018) un estudio detallado de las posibilidades técnicas de recarga gestionada de acuíferos en 18 cuencas hidrográficas en el norte y centro de Chile es presentado por Cabrera (2014), donde la legalidad y aspectos también son discutidos.

En México, el estudio *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* de Escolero *et al.* (2017) describe los proyectos nacionales e internacionales y las mejores prácticas de recarga acuífera gestionada. A diferencia de muchos otros países, México se encuentra entre los pocos que cuenta con normativa para el desarrollo e implementación de proyectos de recarga de acuíferos gestionada. Dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM) NOM-

014-CONAGUA-2007 y NOM-015-CONAGUA-2007 hacen referencia a los requisitos para recarga artificial de acuíferos y a la infiltración artificial de agua en acuíferos con recolección de agua de lluvia, respectivamente (Bonilla *et al.*, 2018).

Varios casos de estudio y proyectos piloto de recarga de acuíferos gestionada han sido presentados en Colombia. La *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos* del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014), tiene como propósito principal establecer los criterios técnicos, procedimientos y metodologías, que orienten a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible y de los grandes centros poblados, en el proceso de formulación e implementación de los planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA). En esta guía se contempla, dentro de los proyectos especiales para la gestión de acuíferos, la recarga artificial de acuíferos y los criterios que la misma debe de cumplir.

En el estudio *Evaluación de la recarga de acuíferos gestionada para superar la escasez de agua durante la temporada seca en Costa Rica* de Valverde (2018), con el fin de determinar si las técnicas de recarga de acuíferos gestionada son adecuadas para Costa Rica y ayudarán a superar los desafíos temporales de escasez de agua, se investigan algunos temas a diferentes escalas: la búsqueda de áreas adecuadas para técnicas específicas de recarga gestionada de acuíferos a una escala de país, a un nivel de cuenca y a una escala de laboratorio. A partir de dicho estudio se determina que las técnicas de recarga de acuíferos gestionada son adecuadas para las condiciones ambientales de Costa Rica, además de ser una solución para superar los problemas de escasez de agua.

El estudio *Caracterización de procesos de recarga artificial de acuíferos como medios para conservar el balance hídrico en el abanico de Punata* realizado en Bolivia, hace una caracterización de los aspectos técnicos del abanico de Punata para el planteamiento de una propuesta de recarga artificial de acuíferos. A partir de la caracterización de las condiciones locales del abanico y comparando con un caso de estudio de recarga artificial de acuíferos se propone un medio de recarga artificial de acuíferos para el abanico de Punata mediante pozos secos con agua recolectada de techos (Villarroel, 2021).

En Perú se desarrolla el trabajo de investigación denominado *Recarga artificial de acuíferos en función de las características geohidráulicas para incremento de la disponibilidad hídrica en el manantial Collana-Cabanilla* de Mamani (2017), para contribuir al incremento del caudal del manantial polisurgente, mediante la evaluación del sistema de recarga artificial de acuíferos en función de las características geohidráulicas para el incremento de la disponibilidad hídrica, la determinación de las especificaciones técnicas para el diseño de zanjas de infiltración de acuíferos, y finalmente el dimensionamiento y diseño de la zanja de infiltración para el aumento de la disponibilidad hídrica en el Collana-Cabanilla.

En el estudio *La recarga artificial como herramienta de gestión de los recursos hídricos, aplicación a los acuíferos de alta montaña*, que también se desarrolla en Perú, se evalúan la recarga natural y el funcionamiento hidráulico, hidroquímico e hidrodinámico de los acuíferos de alta montaña. Todo ello se integra a escala de microcuenca con atención a la explotación, el drenaje minero y sus problemáticas asociadas (Idme, 2018).

En Brasil, un país que al igual que la mayoría se encuentra en la etapa temprana de iniciativas de recarga gestionada de acuíferos, el estudio *Una visión*

general de la recarga de acuíferos gestionada en Brasil de Shubo *et al.* (2020), a partir de una revisión sistemática recopila y analiza iniciativas populares, legislación vigente, líneas y programas de investigación relacionados a la recarga de acuíferos gestionada.

Fuera de América Latina y El Caribe, en Estados Unidos, se han realizado diversos estudios en torno a la recarga gestionada de acuíferos. El estudio *Modelado de procesos de recarga de acuíferos gestionados en un sistema acuífero semiconfinado y muy heterogéneo*, simula procesos de infiltración y recarga a través de un dominio que incluye una representación de alta resolución de la heterogénea arquitectura geológica aluvial en el área, los resultados muestran que el potencial de recarga depende en gran medida de la arquitectura geológica del subsuelo (Maples *et al.*, 2019).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales retos a los que se enfrentan las sociedades contemporáneas, hablando concretamente de los recursos hídricos, es asegurar la disponibilidad de los mismos en un contexto de incremento de demanda por el crecimiento mayor y acelerado desarrollo. En el presente, los mantos acuíferos están en declive de su caudal hídrico en centros urbanos como la Ciudad de Guatemala. Según FUNCAGUA (2018) en los últimos 40 años los mantos acuíferos han disminuido un promedio de 400 metros en el Valle de Guatemala. Las causas son múltiples e incluyen la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la reducción de las zonas de recarga hídrica, entre otros.

Además de la demanda de agua, los recursos hídricos también se enfrentan a los retos impuesto por el cambio climático, mismo que es responsable de fenómenos que son cada vez más comunes como las sequías e inundaciones por la alteración de los patrones de lluvia. La recarga hídrica gestionada constituye una de las medidas de gestión hídrica más exitosas para combatir los efectos de la sobreexplotación de acuíferos y del cambio climático. En países como Guatemala, no existen directrices o lineamientos técnicos para la implementación de proyectos de recarga de acuíferos gestionada.

3.1. Contexto general

La Universidad San Carlos de Guatemala, fundada en 1676, es la universidad más antigua y grande de Guatemala. El campus central cuenta con 9 facultades y 7 escuelas facultativas. Para proveer a los estudiantes y trabajadores con los servicios básicos este campus dispone de edificios,

instalaciones deportivas, cafeterías, parqueos, entre otros. El campus central también cuenta con dos centros de desarrollo experimental.

Con una población estudiantil que está en constante crecimiento, la extracción de agua subterránea es cada vez mayor. El acuífero del área también se ve afectado por la disminución de zonas de recarga hídrica dentro del campus debido a la construcción de nuevas obras, así como por los numerosos proyectos de viviendas verticales que se construyen alrededor de la zona. Por otro lado, los efectos del cambio climático también tienen un impacto negativo en el área. La planificación, diseño, manejo, control e investigación del recurso hídrico en el campus central es un tema al que no se le ha dado la suficiente importancia. El campus central no cuenta con un plan de gestión integral del recurso hídrico para la adaptación al cambio climático.

3.2. Descripción del problema

La recarga de acuíferos gestionada (RAG) actualmente es utilizada en todo el mundo como una herramienta para superar distintos desafíos de gestión del agua. Según Bonilla *et al.* (2018) la recarga de acuíferos gestionada ha sido implementada exitosamente en al menos 10 países de Latinoamérica. La mayoría de estos casos de implementación (<60 %) se han dado en Brasil, México y Chile. Aunque en Guatemala GREMIA-FUNAGUA implementaron el proyecto Manejo Gestionado del Recurso Hídrico en el Valle de Guatemala, que procura estudiar diversas técnicas para realizar recarga gestionada de acuíferos en el Valle de la Ciudad de Guatemala, aún no existen directrices que permitan la adecuada realización de proyectos de recarga de acuíferos gestionada para hacerle frente a los efectos de la sobreexplotación de acuíferos y el cambio climático en Guatemala.

3.3. Formulación del problema

En Guatemala, así como en la gran mayoría de países, los proyectos de recarga de acuíferos gestionada que permitan hacerle frente a la problemática del descenso de los niveles de aguas subterráneas debido a la sobreexplotación de acuíferos, así como a las problemáticas que son consecuencia de la alteración de los patrones de lluvia se encuentran en estado incipiente o experimental. Como consecuencia, en Guatemala no existen directrices para la recarga de acuíferos gestionada para la adaptación al cambio climático.

Se parte de lo anteriormente expuesto y se toma el caso de estudio de la USAC para plantear la pregunta central y preguntas auxiliares del problema de investigación: ¿Cuáles son las directrices para la recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático en la Universidad de San Carlos de Guatemala en base al comportamiento de la precipitación, características del suelo, geología e hidroquímica del agua de lluvia en el área de estudio? Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el comportamiento de la precipitación para el área de estudio?
- ¿Cuáles son las características del suelo y características hidrogeológicas del área de estudio?
- ¿Cuáles son las características hidroquímicas del agua de lluvia del área de estudio?
- ¿Cuáles son las directrices de recarga gestionada de acuíferos para el área de estudio?

3.4. Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación pretende dar con las directrices de recarga de acuíferos gestionada para el caso de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se busca para esto conocer las características del suelo, hidrogeología, hidroquímica y comportamiento de la precipitación del área de la zona de estudio. A partir de esta información se definirán los métodos y técnicas de recarga gestionada de acuíferos para el área de estudio. El campus central se encuentra ubicado en la zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Se estudiarán datos generados entre 1971 y el 2020, y se generarán datos del año en curso.

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de extracción sostenible de aguas subterráneas de la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos. Con esta investigación se pretende establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático para el caso del campus central Universidad de San Carlos de Guatemala. Las mismas directrices constituyen un factor clave para la extracción sostenible de aguas subterráneas en el área de estudio.

Los resultados obtenidos serán de utilidad para instituciones públicas y privadas que busquen implementar proyectos de recarga gestionada de acuíferos en la zona, puesto que brindarán para la realización de dichos proyectos lineamientos técnicos que tomen en cuenta las características del suelo, geología, hidroquímica y condiciones climáticas del área.

La presente investigación también será de beneficio para la población guatemalteca en general, al permitir plantear un modelo que permita hacerles frente a los efectos adversos de la sobreexplotación de acuíferos y del cambio climático, principalmente al del descenso de los niveles de agua subterránea en el Valle de Guatemala, mediante técnicas que permitan la recuperación de los mantos acuíferos.

En Guatemala no existen proyectos concluidos que identifiquen y establezcan directrices para la recarga gestionada de acuíferos, por lo que la presente investigación sentará las bases para el establecimiento de lineamientos técnicos y legales de recarga de acuíferos gestionada en otras áreas con

condiciones climáticas, de suelo, hidrogeológicas e hidroquímicas del área de estudio. De la misma manera, la investigación contribuirá con la validación de proyectos futuros o en desarrollo orientados a la recarga gestionada de acuíferos en Guatemala.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático en la Universidad de San Carlos de Guatemala en base al comportamiento de la precipitación, características del suelo, geología e hidroquímica del agua de lluvia en el área de estudio.

5.2. Específicos

- Modelar el comportamiento de la precipitación para el área de estudio.
- Definir las características del suelo y las características geológicas para el área de estudio.
- Caracterizar la hidroquímica del agua de lluvia en el área de estudio.
- Determinar las directrices de recarga gestionada de acuíferos para el caso de estudio.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La gran diversidad geográfica, social, económica y ambiental que presenta América Latina y el Caribe la hacen particularmente sensible al cambio climático, lo que hace evidente la necesidad de encarar medidas de adaptación al mismo. Entre las medidas para combatir los efectos climáticos, destaca la recarga de acuíferos gestionada, técnica para la que no existen directrices ni regulaciones para el caso de Guatemala (Andersen y Verner, 2010).

A partir del siguiente estudio se establecerán las directrices de recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático, para el caso del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La investigación permitirá definir las directrices de recarga de acuíferos gestionada a partir de la evaluación del comportamiento de la precipitación en el área de estudio, de la definición de las características del suelo y características geológicas del área y de la caracterización de la hidroquímica del agua de lluvia del área de estudio.

El establecer las directrices para la recarga gestionada de acuíferos para el área de estudio tendrá un impacto directo en la prevención y mitigación de problemáticas como la tendencia al descenso en los niveles de aguas subterráneas y el incremento de inundaciones como consecuencia de la alteración de los patrones de lluvia. Atender estos problemas contribuirá de manera directa a la gestión integral de los recursos hídricos en el área.

Además, el presente estudio aportará la información necesaria para que las personas o instituciones que deseen implementar proyectos de recarga de acuíferos gestionada en Guatemala puedan, mediante el ejemplo de un caso de

estudio específico, tener referencias a nivel local en la implementación de este tipo de proyectos. De manera general, la implementación de directrices de recarga de acuíferos gestionada contribuirá a la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales, así como a la protección del medio ambiente.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Ciclo hidrológico

Para poder hablar de aguas subterráneas es necesario entender primero el ciclo hidrológico, la relación entre sus componentes y otros conceptos importantes. Gavilán (2019) afirma que el ciclo hidrológico es un modelo de circulación general que explica el complejo sistema de movimientos y transformaciones del agua dentro de una región.

Por otro lado, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) define el ciclo hidrológico como sigue:

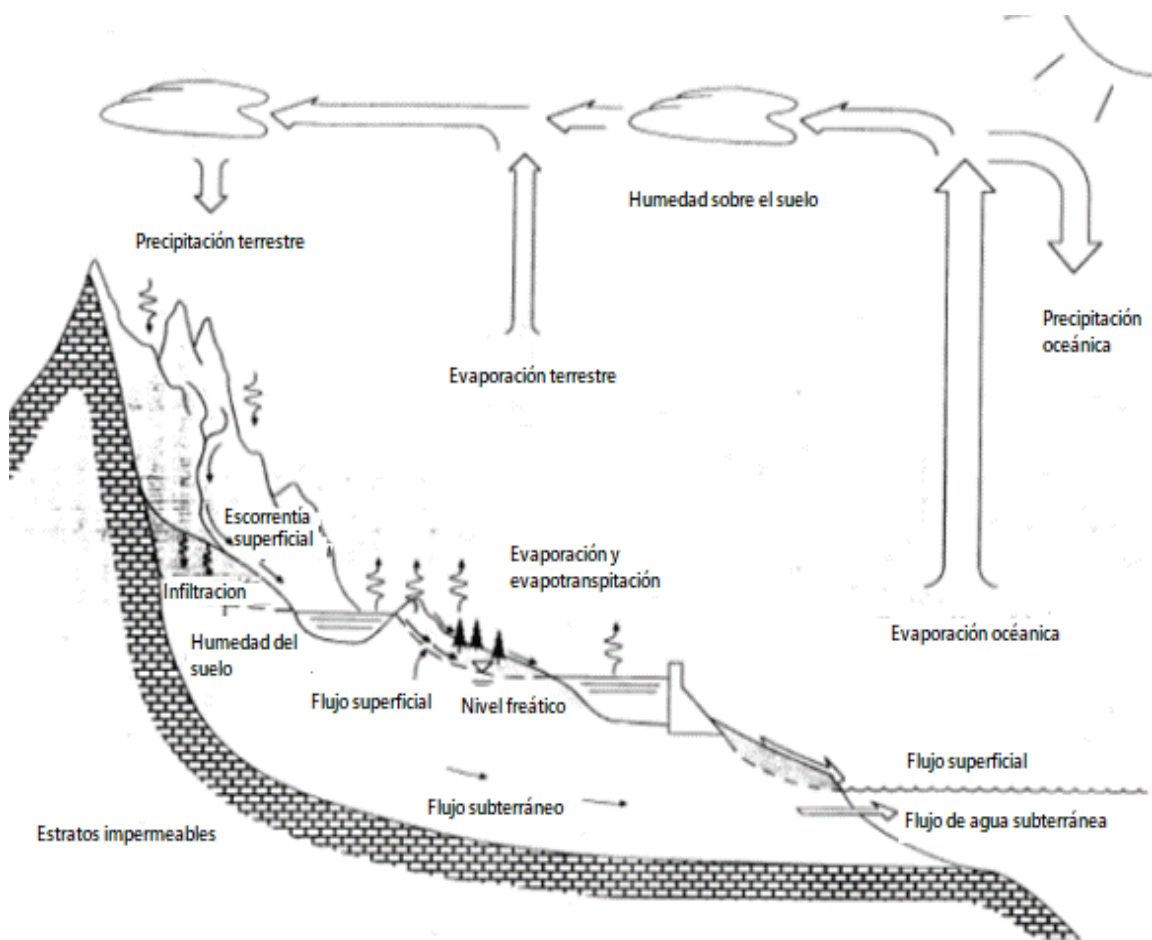
Ciclo en virtud del cual el agua se evapora de los océanos y de la superficie de la tierra, es transportada sobre la Tierra por la circulación atmosférica en forma de vapor de agua, se condensa para formar nubes, se precipita en forma de lluvia o nieve sobre el océano y la tierra, donde puede ser interceptada por los árboles y la vegetación, genera escorrentía en la superficie terrestre, se infiltra en los suelos, recarga las aguas subterráneas, afluye a las corrientes fluviales y, en la etapa final, desemboca en los océanos, en los que se evapora nuevamente. (p. 188)

De manera más general, se conoce el ciclo hidrológico como un modelo conceptual que explica y describe el movimiento del agua en la Tierra. La figura 1 muestra un esquema general del ciclo hidrológico y sus componentes. Los componentes principales del ciclo hidrológico son los siguientes:

- Infiltración: proceso por el cual se produce la entrada en el suelo del agua.
- Escorrentía: proceso que se da cuando la velocidad del agua que cae supera la velocidad de infiltración, produciendo una lámina de agua que circula sobre la superficie.
- Evaporación: proceso a través del cual el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso.
- Transpiración: es la evaporación que se realiza a través del sistema circulatorio de las plantas.
- Evapotranspiración: se refiere a la combinación de dos procesos, la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración de las plantas, que da como resultado la pérdida de humedad o agua en la superficie de la Tierra, al evaporarse para luego liberarse a la atmósfera en forma de vapor de agua.
- Condensación: proceso a través del cual el vapor de agua pasa del estado gaseoso al estado líquido.
- Precipitación: se refiere al proceso por medio del cual el vapor de agua que se contiene en la atmósfera se transforma en agua líquida o sólida y cae a la superficie terrestre.
- Aguas superficiales: el término de aguas superficiales se refiere al agua que se encuentra en contacto con la atmósfera y que circula sobre la superficie terrestre.

- Aguas subterráneas: el término de agua subterránea se refiere al agua que se encuentra debajo de la superficie terrestre, en horizontes de suelos y formaciones geológicas que están totalmente saturadas (Africa Groundwater Network *et al.*, 2015).

Figura 1. **Esquema general del ciclo hidrológico**



Fuente: Chow *et al.* (1994) *Hidrología aplicada*.

7.2. Acuíferos

Se le conoce como acuífero a toda aquella formación geológica que sea capaz de almacenar y transmitir agua de forma que pueda ser aprovechada como recurso (Martínez y Reyes, 2009).

Desde el punto de vista de la hidrogeología, para hablar de esta formación geológica como acuífero, es necesario que esté almacenamiento y transmisión de agua se den forma significativa. Según Fetter (2014) un acuífero es formado de forma natural cuando el agua de la precipitación es absorbida por la superficie terrestre. Una vez absorbida el agua, la misma se infiltra y se acumula en poros, fracturas y juntas de formaciones geológicas con materiales permeables y/o porosos que permiten su almacenamiento y transmisión, dando lugar a los acuíferos.

Las formaciones geológicas con textura uniforme o bien dispuesta tienen una alta capacidad de retención de agua, es decir, porosidad, pero menos capacidad de transmisión o movilidad, es decir, permeabilidad. Por otro lado, según Salako y Adepelumi (2018), aquellas con mayor porosidad y permeabilidad tienen suficiente para producir cantidades significativas de agua subterránea. En este sentido, se puede decir que la capacidad de las formaciones geológicas para almacenar y transmitir agua es una función de su disposición textual.

Los acuíferos pueden ser clasificados de numerosas formas, algunas de ellas son la clasificación de acuíferos según su comportamiento hidrodinámico, según su comportamiento hidrostático, según su comportamiento hidráulico, y según su litología. De manera más general, los acuíferos se clasifican en dos tipos principales, acuíferos confinados y acuíferos no confinados.

7.2.1. Acuíferos confinados

Aquellos acuíferos en los que el agua se encuentra en medio de dos formaciones geológicas impermeables.

Según Salako y Adepelumi (2018) los acuíferos confinados comprenden aquellos cuerpos de agua que se encuentran acumulándose en una roca permeable y están encerrados por dos capas de roca impermeable o cuerpos rocosos. Estos se encuentran cubiertos por una capa de roca confinada, a menudo compuestos de arcilla que podría ofrecer alguna forma de protección contra la contaminación de la superficie. Las barreras geológicas que no son permeables y que existen entre el acuífero hacen que el agua dentro de él esté bajo una presión que es comparativamente mayor que la presión atmosférica.

A los acuíferos confinados también se les conoce como acuíferos artesianos.

7.2.2. Acuíferos no confinados

Aquellos en los que el agua se encuentra en medio de una formación geológica permeable y una impermeable.

De acuerdo con Salako y Adepelumi (2018) a diferencia de los acuíferos confinados, los acuíferos no confinados comúnmente se encuentran ubicados cerca de la superficie terrestre y no tienen capas de arcilla u otro material geológico impermeable por encima del nivel freático, aunque se encuentran relativamente por encima de capas impermeables de roca arcillosa. El agua subterránea en un acuífero no confinado es más vulnerable a la contaminación de la superficie en comparación con la de los acuíferos confinados, esto debido

a la fácil infiltración del agua subterránea por contaminantes terrestres (Salako y Adepelumi, 2018).

El límite superior del agua subterránea dentro del acuífero no confinado es el nivel freático, por lo que a los acuíferos no confinados también se les conoce como acuíferos freáticos o libres.

7.3. Agua subterránea

De manera general, se le conoce como agua subterránea al agua que se almacena en las unidades geológicas conocidas como acuíferos. Salako y Adepelumi (2018) definen el agua subterránea como el agua dulce, procedente de la lluvia, el derretimiento del hielo y la nieve, que penetra en el suelo y se almacena entre los espacios porosos, las fracturas y las juntas que se encuentran dentro de las rocas y otras formaciones geológicas. Las aguas subterráneas constituyen una parte importante del ciclo hidrológico.

Bricker *et al.* (2017) indican que el agua subterránea es conocida como el recurso de agua dulce líquida más grande de la Tierra y almacena casi el 90 % del total de agua dulce no congelada en todo el mundo. En muchas partes del mundo, la principal fuente de agua para uso diario es el agua subterránea. Esta fuente primaria de agua abastece a más de 2 mil millones de personas, aproximadamente un tercio de la población mundial (Viaroli *et al.*, 2022).

7.4. Cambio climático

Son diversas las definiciones que existen del cambio climático, siendo una de las primeras en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Naciones Unidas (1992), define al cambio climático como el cambio de

clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. De manera más general, se define al cambio climático como la variación global del clima de la Tierra.

Durante las últimas décadas los científicos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático han predicho los diferentes impactos del cambio climático, indican Boyd *et al.* (2021). De acuerdo con Mertz *et al.* (2009) estos impactos pueden ser directos (por ejemplo, cambios en el potencial agrícola causados por cambios en las precipitaciones o inundaciones de ciudades e infraestructura debido al aumento del nivel del mar y una mayor carga de enfermedades) o indirectos (por ejemplo, a través de los efectos del cambio climático en los precios del mercado mundial de productos agrícolas y pesqueros).

7.4.1. Impacto del cambio climático en los recursos hídricos

En los últimos años la disponibilidad de los recursos hídricos se ha visto amenazada por diversos factores, siendo uno de los principales un crecimiento rápido y sin precedente alguno en la demanda de agua. Según Serrano *et al.* (2014) además del incremento de la demanda de agua, la generación de recursos hídricos se enfrenta a los retos impuestos por (1) los cambios en los usos del uso del suelo y (2) el cambio climático.

De acuerdo con Kumar (2016) el cambio climático puede tener efectos profundos en el ciclo hidrológico a través de la precipitación, la evapotranspiración y la humedad del suelo con el aumento de la temperatura. El hidrológico ciclo se intensificará con más evaporación y más precipitación, pero

está será distribuida desigualmente en las diferentes partes del mundo, por lo que en algunos lugares se verán reducciones significativas en las precipitaciones o alteraciones importantes en los patrones de lluvia durante las estaciones húmedas y secas, con una mayor probabilidad de inundaciones y más sequías (Kumar, 2016).

Según Africa Groundwater Network *et al.* (2015), las áreas clave donde el cambio climático afecta a las aguas subterráneas es a través de la descarga, el almacenamiento y principalmente la recarga, específicamente en la magnitud y momento de la misma. La recarga de aguas subterráneas es un proceso de mucha complejidad, esta depende de parámetros como la distribución, cantidad y momento de la precipitación, pérdidas por evapotranspiración, características del suelo y geología del área, uso del suelo y otros parámetros. Debido a que el cambio climático tiene impactos directos en los parámetros anteriormente mencionados, existe la posibilidad de fluctuación en la recarga de aguas subterráneas.

7.4.2. Adaptaciones al cambio climático

La gestión del recurso hídrico necesita cada vez más tomar en cuenta los efectos del cambio climático global para predecir las necesidades futuras con precisión, indica Kumar (2016). Entre estas necesidades futuras, la necesidad de adaptación al cambio climático, es decir la necesidad de establecer medidas que busquen reducir la vulnerabilidad de los diferentes sistemas a los efectos del cambio climático.

Africa Groundwater Network *et al.* (2015) afirman lo siguiente:

La creación de capacidad de adaptación es un tema transversal crucial y se aplica, al menos parcialmente, a múltiples temas. Las opciones de creación de capacidad adaptativa generalmente se ocupan de proporcionar las condiciones necesarias para que se implementen otras formas de adaptación con éxito, en lugar de gestionar o evitar directamente los riesgos climáticos o hidrológicos. (p. 13).

Las medidas de adaptación al cambio climático cubren una gama amplia, desde intervenciones directas como la construcción de diques para evitar inundaciones, la reubicación a gran escala de agricultores, la selección de nuevos cultivos y la construcción de presas para ampliar el riego, hasta el desarrollo de capacidades en la administración pública, la sociedad civil y la investigación (Mertz *et al.*, 2009).

En relación con las aguas subterráneas las opciones de adaptación al cambio climático son diversas, estas van desde la gestión integral de los recursos hídricos superficiales y subterráneos o el cambio del uso del suelo, hasta la aplicación de métodos como la recarga de acuíferos gestionada (RAG o MAR, por sus siglas en inglés), para mejorar intencionalmente la recarga de acuíferos.

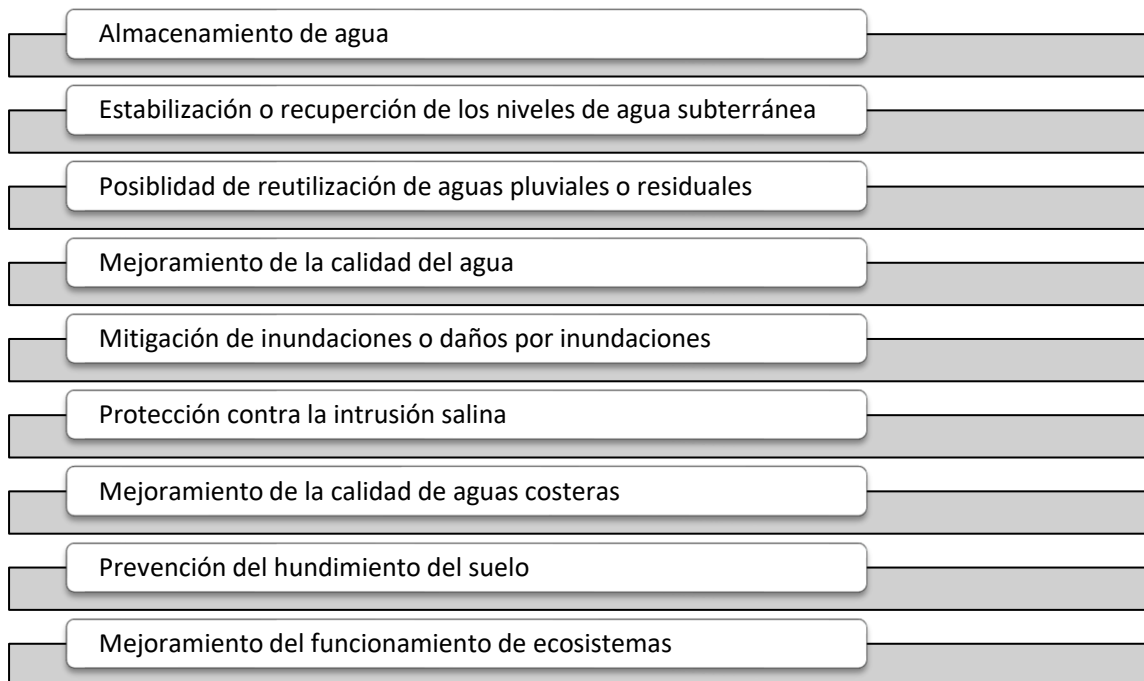
7.5. Recarga de acuíferos gestionada

La recarga de acuíferos gestionada (RAG o MAR, por sus siglas en inglés) es la recarga intencionada de agua a los acuíferos, ya sea para su posterior recuperación o para beneficio ambiental (Dillon *et al.*, 2009).

7.5.1. Beneficios de la recarga gestionada de acuíferos

Los potenciales beneficios de la recarga gestionada de acuíferos son múltiples, entre ellos destacan el almacenamiento de agua, la estabilización o recuperación de los niveles de agua subterránea, la posibilidad de reutilización de aguas pluviales o residuales, mejoramiento de la calidad del agua, mejoramiento de la calidad del agua, mitigación de inundaciones o daños por inundaciones, protección contra la intrusión salina, mejoramiento de la calidad de aguas costeras, prevención del hundimiento del suelo, el mejoramiento del funcionamiento de ecosistemas, entre otros.

Figura 2. **Beneficios potenciales de la recarga gestionada de acuíferos**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

7.6. Criterios primarios de implementación de sistemas de recarga de acuíferos gestionada

Según Alam *et al.* (2021), la selección del tipo de RAG en un sitio depende de cuatro criterios primarios, siendo estos: (1) la capacidad del suelo para infiltrar el agua, (2) tipo de fuente de agua (3) disponibilidad del agua basada en el clima y (4) necesidades o desafíos de la calidad del agua.

7.6.1. Capacidad del suelo para infiltrar el agua

La capacidad del suelo de almacenar o transmitir agua hacia zonas más profundas depende de sus diferentes características. Se entiende por capacidad de infiltración al flujo resultante cuando el agua a presión atmosférica se mueve libre verticalmente desde la superficie del suelo, un término muy relacionado con el anterior es el de tasa de infiltración el cual se diferencia en que el primero depende también de la presión a la cual el agua es suministrada al suelo, la cual puede ser mayor o menor a la atmosférica (Karlin *et al.*, 2019).

Algunas de las características vinculadas a los términos anteriores y que determinan la capacidad del suelo para almacenar o transmitir agua hacia zonas más profundas son la densidad, la porosidad y la textura del suelo en todos sus estratos.

7.6.2. Disponibilidad del agua basada en el clima

El clima local puede influir en la disponibilidad de agua y los tipos de recarga gestionada de acuíferos. Según Alam *et al.* (2021) aunque los proyectos de recarga gestionada de acuíferos están implementados tanto en áreas

húmedas como secas, el objetivo de implementación es sensible al clima del área específica.

En áreas donde la demanda de agua es alta pero la disponibilidad es baja, así como en áreas donde se espera que los patrones de lluvia cambien o se vean alterados en el futuro, es necesario seleccionar adecuadamente la fuente de agua a utilizarse para la recarga gestionada de acuíferos, así como el método de recarga.

Resultados de un análisis de la tendencia significativa a largo plazo en el almacenamiento llevados a cabo por Alam *et al.* (2021) sugieren que el sitio de recarga gestionada de acuíferos debe seleccionarse en lugares donde la cantidad de agua necesaria es máxima, y donde el agua está disponible estacionalmente para infiltrarse y almacenar en el acuífero.

7.6.3. Tipo de fuente de agua

Según Alam *et al.* (2021) las principales fuentes de agua utilizadas para la recarga gestionada de acuíferos son: aguas superficiales (ríos y lagos), aguas pluviales, aguas residuales y aguas subterráneas. Según análisis realizados en todas las regiones climáticas las aguas superficiales, las aguas pluviales y las aguas recicladas son las primeras, segundas y terceras fuentes de agua más comunes para la recarga gestionada de acuíferos, respectivamente.

Los tipos de fuentes de agua son una elección crítica para el tipo específico de recarga gestionada de acuíferos, por lo que es importante identificar tipos específicos de recarga gestionada de acuíferos basados en el tipo de fuente de agua disponible en el área de interés.

7.6.4. Necesidades o desafíos de la calidad del agua

La calidad del agua de la fuente de agua y la capacidad del método específico de recarga gestionada de acuíferos para mejorar la calidad del agua determina si un proyecto de recarga gestionada de acuíferos puede ser implementado en un sitio (Alam *et al.*, 2021).

Alam *et al.* (2020) hablan de la aplicación de recarga gestionada de acuíferos en regiones donde la eliminación de aguas pluviales y residuales a las aguas superficiales crea preocupaciones ambientales como un ejemplo. En casos como el anterior, la recarga de acuíferos gestionada puede ser una alternativa segura para la disposición y tratamiento adecuado de las aguas pluviales o residuales, según sea el caso.

La capacidad de un método de recarga gestionada de acuífero para eliminar contaminantes específicos puede variar ampliamente según el método, lo que hace necesario prestar atención a las necesidades o desafíos de la calidad del agua en el área en dónde se busca implementar la recarga de acuíferos gestionada, así como a los diferentes métodos que existen y su capacidad para eliminar contaminantes.

7.7. Elementos clave en el proceso de recarga gestionada de acuíferos

Los seis elementos clave en la recarga de acuíferos gestionada son: la fuente de agua de recarga, el tratamiento de agua, el método de recarga, el sitio de recarga, la recuperación de agua y los usos finales del agua recuperada. Para agua regenerada incluyen las fuentes de agua de recarga, tratamiento de agua, recarga.

Según Yuan *et al.* (2016) estos elementos se basan en los definidos por la Agencia de Protección de los Estados Unidos en el 2012 en su guía *Directrices para la reutilización de agua*, además del elemento de tratamiento de agua que se añadió debido a su importancia en el proceso.

7.7.1. Fuente de agua de recarga

Como se mencionó anteriormente las principales fuentes de agua de recarga son aguas superficiales (ríos y lagos), aguas pluviales, aguas residuales y aguas subterráneas. Una consideración importante es la calidad del agua de la fuente de agua, esta deberá ser comparada a estándares de calidad de agua para definir el tratamiento y, en caso sea necesario, postratamiento del agua.

7.7.2. Tratamiento de agua

Según Yuan *et al.* (2016). refiere a procesos de purificación artificial para el agua de recarga, para lograr la calidad del agua requerida, diferentes tecnologías de ingeniería se combinan para pretratar el agua de recarga o postratar el agua recuperada para eliminar contaminantes específicos. Además, el diseño apropiado de agua para el tratamiento puede aliviar el potencial de acumulación de contaminantes en los acuíferos.

7.7.3. Método de recarga

Como se menciona anteriormente, seleccionar un método de recarga depende de diferentes criterios en los que destacan 4 principales según Alam *et al.* (2021), siendo estos la capacidad del suelo para infiltrar el agua, el tipo de fuente de agua, la disponibilidad del agua basada en el clima y las necesidades

o desafíos de la calidad del agua. Los diferentes métodos o tipos de recarga gestionada de acuíferos se describen en la siguiente sección.

7.7.4. Sitio de recarga

Se refiere al área donde se desea o requiere implementar el proyecto de recarga gestionada de acuíferos. Según Yuan *et al.* (2016) el sitio de recarga tendrá un gran impacto sobre el desempeño de un sistema de recarga gestionada de acuíferos, ya que este elemento tiene una estrecha relación con los métodos utilizados para la recarga y recuperación de agua.

Yuan *et al.* (2016) indican que la selección de los sitios de recarga es un proceso complejo de toma de decisiones e incluye diferentes niveles de factores, entre ellos las características geológicas e hidrogeológicas, políticas sociales y económicas, conservación natural y los impactos ambientales en el área en cuestión, indican. Una vez que la ubicación de recarga se elige, las características del subsuelo se identifican de modo que la capacidad de transmisión y almacenamiento puedan ser determinadas.

7.7.5. Recuperación de agua

Según Yuan *et al.* (2016) la recuperación de agua se refiere específicamente a los procesos naturales de depuración del agua de recarga. Se considera que la depuración natural subterránea elimina algunos contaminantes microbianos y químicos, principalmente por adsorción o biodegradación. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos administrar el tiempo de viaje del agua de recarga ha sido la consideración operativa clave para asegurar la recuperación del agua (Yuan *et al.*, 2016).

7.7.6. Usos finales del agua recuperada

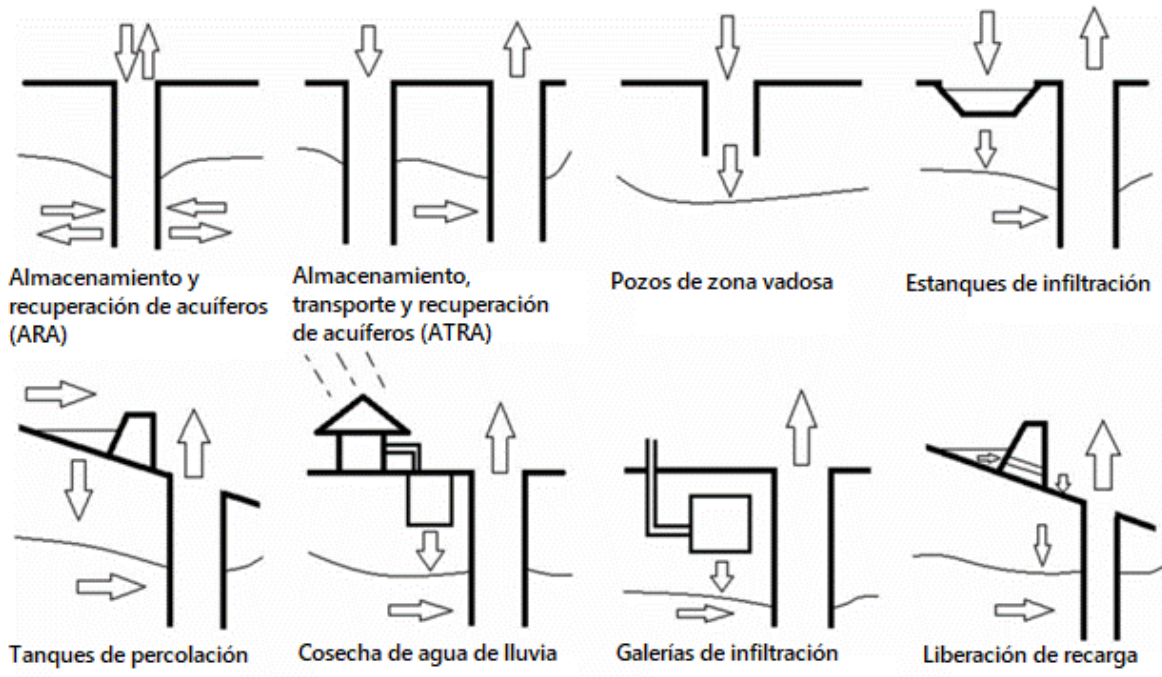
Son distintos los usos finales del agua recuperada a través de recarga gestionada de acuíferos. De acuerdo con Yuan *et al.* (2016) normalmente, el agua del acuífero se utiliza para fines tales como beber, agricultura, industria y medio ambiente. Otros usos incluyen barreras contra la salinización de los acuíferos, la mitigación de inundaciones y la mejora de la calidad del agua costera a través de la reducción del vertido urbano (Dillon *et al.* 2009).

7.8. Tipos de recarga de acuíferos gestionada

Existen diferentes tipos de recarga de acuíferos gestionada. De acuerdo con Yuan *et al.* (2016) en términos generales son 8 los tipos de recarga de acuíferos gestionada: almacenamiento y recuperación de acuíferos, almacenamiento, transporte y recuperación de acuíferos, pozos de zona vadosa, estanques de infiltración, tanques de percolación, cosecha de agua de lluvia galerías de infiltración y liberación de recarga.

Además de los anteriores, las directrices australianas para la reutilización de agua para recarga de acuíferos gestionada también incluyen otros tipos que pueden incluirse dentro de los 8 tipos mencionados anteriormente, siendo algunos de estos: represas de arena, represas subterráneas, filtración de duna, filtración de banco y tratamiento de suelo-acuífero (Yuan *et al.*, 2016).

Figura 3. Tipos de recarga de acuíferos gestionada



Fuente: Yuan *et al.* (2016). *Water reuse through managed aquifer recharge (MAR): assessment of regulations/guidelines and case studies.*

7.8.1. Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA)

Se refiere a la inyección de agua en un pozo para almacenamiento y recuperación del mismo pozo, este tipo de recarga es útil en acuíferos salobres, donde el almacenamiento es el objetivo principal y el tratamiento del agua es una consideración menor (Dillon *et al.*, 2009).

7.8.2. Almacenamiento, transporte y recuperación de acuíferos (ATRA)

Se le considera a este método una versión mejorada del ARA. Este tipo de recarga consiste en inyectar agua en un pozo para almacenamiento y recuperación de un pozo diferente, se utiliza para lograr un tratamiento de agua adicional en el acuífero extendiendo el tiempo de residencia en el acuífero más allá del de un solo pozo (Dillon *et al.*, 2009).

7.8.3. Pozos de zona vadosa

También son llamados pozos secos. De acuerdo con Dillon *et al.* (2009) se refiere a pozos poco profundos donde las capas freáticas son muy profundas, lo que permite la infiltración de agua de muy alta calidad al acuífero no confinado en profundidad. Se usan comúnmente para la infiltración y eliminación de la escorrentía de tormentas donde la lluvia es baja y no hay alcantarillado pluvial o alcantarillado combinado disponibles (Yuan *et al.*, 2016).

7.8.4. Estanques de infiltración

Un estanque de infiltración es una estructura diseñada para la recarga de acuíferos gestionada mediante infiltración de agua de lluvia o de aguas superficiales, desviando las últimas hacia cuencas y canales fuera de la corriente que permiten que el agua penetre a través de una zona no saturada hasta el acuífero no confinado subyacente (Dillon *et al.*, 2009).

Según Yuan *et al.* (2016) esto se hace por medio de grandes estanques de agua abierta que son excavados o ubicados en un área rodeada de un banco. Esta práctica tiene buenas eficiencias de eliminación de contaminantes y se

considera un medio eficaz para recargar el agua subterránea y aumentar el flujo base al sistema de corriente.

7.8.5. Tanques de percolación

Se refiere a represas construidas en arroyos efímeros o corrientes transitorias, que retienen agua, generalmente de origen pluvial, que se infiltra a través del lecho para mejorar el almacenamiento en acuíferos no confinados y se extrae valle abajo (Dillon *et al.*, 2009).

7.8.6. Cosecha de agua de lluvia

De acuerdo con Dillon *et al.* (2009) se refiere a la escorrentía de un techo desviada a un pozo, sumidero o cajón lleno de arena o grava y dejada filtrar a la capa freática donde es recogida por bombeo de un pozo. Este proceso es eficiente para aumentar la filtración natural del agua de lluvia para formaciones subterráneas, y es beneficioso para restaurar el ciclo hidrológico en áreas urbanas.

7.8.7. Galerías de infiltración

Se refiere a zanjas enterradas (que contienen celdas de polietileno o tuberías ranuradas) en suelos permeables que permiten la infiltración a través de la zona no saturada a un acuífero no confinado, indican Dillon *et al.* (2009). Las galerías de infiltración se encuentran entre las formas más antiguas conocidas de cosecha limpia agua (Yuan *et al.*, 2016).

7.8.8. Liberaciones de recarga

Se refiere a presas en arroyos efímeros que se utilizan para detener el agua de inundaciones, los usos pueden incluir la liberación lenta de agua en el cauce río abajo para igualar la capacidad de infiltración en los acuíferos subyacentes, lo que mejora significativamente la recarga en el área (Dillon *et al.*, 2009).

7.9. Directrices de recarga de acuíferos gestionada

Una serie de directrices y reglamentos de reutilización de agua se han desarrollado por países/regiones específicas u organizaciones internacionales (Yuan *et al.*, 2016). A nivel general, la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha producido varias ediciones de directrices para el reuso del agua; en Estados Unidos los encargados han sido la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Salud Pública de California.

En el artículo científico *Inventario de esquemas de recarga de acuíferos gestionada en América Latina y el Caribe*, por Bonilla *et al.* (2018) se reporta que a pesar de que esta tecnología se utiliza actualmente en 10 países de América y el Caribe, son únicamente 3 los países en la región que tienen regulaciones para los proyectos de recarga gestionada de acuíferos (Colombia, Chile y México).

En Colombia, la *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), tiene como propósito principal establecer los metodologías, criterios técnicos y procedimientos, que orienten en el proceso de formulación e implementación de los planes de manejo ambiental de acuíferos.

En el estudio *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos* por el Ministerio de Obras Públicas (2014), se desarrolla una guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile.

México se encuentra entre los pocos que cuenta con normativa para el desarrollo e implementación de proyectos de recarga de acuíferos gestionada esto mediante dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM) NOM-014-CONAGUA-2007 y NOM-015-CONAGUA-2007f que hacen referencia a los requisitos para recarga artificial de acuíferos y a la infiltración artificial de agua en acuíferos con recolección de agua de lluvia, respectivamente (Bonilla *et al.*, 2018).

Es importante mencionar que los reglamentos o directrices existentes contienen principalmente consideraciones regulatorias del MAR a partir de los siguientes aspectos: (1) requisitos de calidad del agua de recarga, (2) diseño de recarga gestionada de acuíferos, operación y mantenimiento, y (3) usos finales del agua recuperada (Yuan *et al.*, 2016).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Ciclo hidrológico

1.2. Acuíferos

1.3. Aguas subterráneas

1.3.1. Acuíferos confinados

1.3.2. Acuíferos no confinados

1.4. Cambio climático

1.4.1. Impacto del cambio climático en los recursos hídricos

1.4.2. Adaptaciones al cambio climático

1.5. Recarga gestionada de acuíferos

1.5.1. Beneficios de la recarga gestionada de acuíferos

1.6. Criterios primarios de implementación de sistemas de recarga de acuíferos gestionada

1.6.1. Capacidad del suelo para infiltrar el agua

1.6.2. Disponibilidad del agua basada en el clima

- 1.6.3. Tipos de fuente de agua
- 1.6.4. Necesidades o desafíos de la calidad del agua
- 1.7. Elementos clave en el proceso de recarga gestionada de acuíferos
 - 1.7.1. Fuente de agua de recarga
 - 1.7.2. Tratamiento de agua
 - 1.7.3. Método de recarga
 - 1.7.4. Sitio de recarga
 - 1.7.5. Recuperación de agua
 - 1.7.6. Usos finales del agua recuperada
- 1.8. Tipos de recarga de acuíferos gestionada
 - 1.8.1. Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA)
 - 1.8.2. Almacenamiento, transporte y recuperación de acuíferos (ATRA)
 - 1.8.3. Pozos de zona vadosa
 - 1.8.4. Estanques de infiltración
 - 1.8.5. Tanques de percolación
 - 1.8.6. Cosecha de agua de lluvia
 - 1.8.7. Galerías de infiltración
 - 1.8.8. Liberaciones de recarga
- 1.9. Directrices de recarga de acuíferos gestionada

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Evaluación del criterio 1: cantidad o disponibilidad del agua basada en el clima
- 2.2. Evaluación del criterio 2: capacidad del suelo para infiltrar el agua
- 2.3. Evaluación del criterio 3: desafíos de la calidad del agua
- 2.4. Evaluación del criterio adicional: Escasez o necesidad del agua
- 2.5. Análisis multicriterio

3. RESULTADOS

- 3.1. Cantidad o disponibilidad del agua basada en el clima
- 3.2. Capacidad del suelo para infiltrar el agua
- 3.3. Desafíos de la calidad del agua
- 3.4. Escasez o necesidad del agua
- 3.5. Directrices para la recarga gestionada de acuíferos

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

La investigación será estructurada, y cada una de las fases seguirá una secuencia lógica. El método es deductivo, pues se busca llegar de lo general a una conclusión específica. La literatura cumplirá un papel fundamental para la definición de la teoría e hipótesis. La observación será científica.

9.1. Características del estudio

La investigación es de enfoque cuantitativo. En ella se recolectarán y analizarán datos numéricos que permitan establecer directrices para la recarga gestionada de acuíferos para el caso específico del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El alcance del estudio es correlacional. Para la comprobación de la hipótesis de investigación se buscará establecer el grado de correlación mutua entre las variables, por lo que la hipótesis es del tipo correlacional.

El tipo de diseño es no experimental, pues no se manipularán deliberadamente las variables de estudio. Se observarán los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural.

Para el establecimiento de las directrices de recarga gestionada de acuíferos se buscará relacionar la información obtenida de las pruebas y análisis realizados en las diferentes fases del estudio con criterios internacionales de implementación de directrices de recarga gestionada de acuíferos.

9.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis del estudio es el área del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. De las mismas se extraerán muestras que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Variables

Las variables de estudio tendrán un papel fundamental en el análisis y comprensión de los resultados de los estudios climáticos, del suelo, hidrogeológicos e hidroquímicos que sean obtenidos mediante la revisión de datos históricos y mediante trabajo de campo. Las variables de estudio se clasifican en la tabla I. Las variables de estudio, incluyendo su definición teórica y operacional, se describen en la tabla II.

Tabla I. **Clasificación de las variables de estudio**

Variable	Categoría		Numérica				Nivel de medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua	Manipulable	Observable	
Precipitación				X		X	Razón
Temperatura						X	Intervalo
Capacidad del suelo de almacenar el agua	X					X	Ordinal
Capacidad del suelo de transmitir el agua	X					X	Ordinal
Tasa de infiltración				X		X	Razón
pH				X		X	Intervalo
Conductividad				X		X	Razón
Turbidez				X		X	Razón

Continuación tabla I.

Total, de sólidos en suspensión	X	X	Razón
Demanda biológica de oxígeno	X	X	Razón
Demanda química de oxígeno	X	X	Razón
Carbono orgánico total	X	X	Razón
Fósforo total	X	X	Razón
Nitrógeno total	X	X	Razón
Metales pesados	X	X	Razón
Dureza total	X	X	Razón
<i>E. coli</i>	X	X	Razón
Coliformes totales	X	X	Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla II. **Descripción de las variables de estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operacional
Precipitación	Cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie terrestre.	Se utilizarán datos de registros históricos de precipitación. La unidad de medida a utilizarse es milímetros.
Temperatura	Magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, objeto o del medio ambiente.	Se utilizarán datos de registros históricos de temperatura. La unidad de medida a utilizarse es grados centígrados.
Capacidad del suelo de almacenar el agua	Es la capacidad de retención de agua en los diferentes tipos de suelo.	Se realizará un análisis del perfil estratigráfico y/o litográfico del área de estudio. Se concluirá para cada estrato si la capacidad es alta, baja o media.
Capacidad del suelo de transmitir el agua	Es la capacidad de transmisión de agua en los diferentes tipos de suelo.	Se realizará un análisis del perfil estratigráfico y/o litográfico del área de estudio. Se concluirá para cada estrato si la capacidad es alta, baja o media.
Tasa de infiltración	Se refiere a la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de la superficie.	La tasa de infiltración se medirá mediante pruebas de infiltración, específicamente el método Porchet. La unidad de medida a utilizarse es milímetros por hora.

Continuación tabla II.

pH	Medida de acidez o alcalinidad de una sustancia.	Para la medición <i>in situ</i> se utilizará un medidor multiparamétrico. La medición posterior será realizada en el análisis fisicoquímico de laboratorio.
Conductividad	Capacidad de una sustancia para conducir una corriente eléctrica.	Se medirá <i>in situ</i> con un medidor multiparamétrico. La unidad de medida será siemens por centímetro.
Turbidez	Medida del grado en el cual una sustancia incolora pierde su transparencia debido a partículas en suspensión.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. Se utilizarán unidades nefelométricas de turbidez.
Total de sólidos en suspensión	Medida del peso en seco de los sólidos no disueltos por una sustancia.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Demanda biológica de oxígeno	Cantidad de oxígeno consumido por microorganismos mientras descomponen la materia orgánica en condiciones aeróbicas y a una temperatura específica.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Demanda química de oxígeno	Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Carbono orgánico total	Es una medida de la cantidad de carbono unido a un compuesto en una sustancia.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Fósforo total	Es una medida de la cantidad total de fósforo en la sustancia analizada.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Nitrógeno total	Es una medida de la cantidad total de nitrógeno en la sustancia analizada.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Metales pesados	Grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta.	Se medirán mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.
Dureza total	Suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresados como carbonato de calcio.	Se medirá mediante el análisis fisicoquímico de laboratorio. La unidad de medida a utilizarse es miligramos por litros.

Continuación tabla II.

<i>E. coli</i>	Bacteria miembro de la familia de las enterobacterias y forma parte de la microbiota del tracto gastrointestinal de animales homeotermos. Indicador específico de contaminación fecal, animal o de aguas residuales sin tratar.	Se medirá mediante el análisis microbiológico de laboratorio. Se utilizarán unidades formadoras de colonias por milímetros.
Coliformes totales	Se consideran coliformes totales aquellos que pueden fermentar la lactosa a 35-37 °C produciendo gas, ácido y aldehído. Indicador de contaminación microbiana.	Se medirá mediante el análisis microbiológico de laboratorio. Se utilizarán unidades formadoras de colonias por milímetros.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

9.4. Fases de la investigación

La investigación se desarrollará en cinco fases distintas, cada una de las cuales será crucial para establecer las directrices de recarga de acuíferos gestionada para el área del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala al brindarnos información importante sobre los cuatro criterios principales en el establecimiento de directrices de recarga de acuíferos gestionada. Las cinco fases de investigación se describen a continuación.

9.4.1. Fase 1

En la primera fase se realizará una revisión documental a través de la lectura de informes, revistas, libros, artículos científicos, tesis de estudio y otros documentos de carácter científico. Se identificarán investigaciones realizadas en torno al tema de estudio en años recientes. Se examinarán las investigaciones más relevantes con el fin de seleccionar y recopilar la información más importante para el desarrollo del estudio.

La información será revisada con un orden lógico y la recopilación se hará de forma ordenada. Se utilizarán procesos múltiples como el análisis y la síntesis de los diferentes documentos. Se harán relaciones entre investigaciones relevantes, se observarán las diferentes metodologías de abordaje y se establecerán semejanzas entre investigaciones previas y las ideas del investigador. Se plasmará la información más importante sobre la situación actual del conocimiento sobre el tema de estudio.

9.4.2. Fase 2

Se buscará correlacionar la precipitación y la temperatura con el fin de establecer la relación o dependencia que existe entre las dos variables. A partir de los resultados se verificará la hipótesis de estudio, es decir, si existe una variación significativa en los patrones de lluvia en función de la temperatura en el área el área de estudio, lo cual hace necesario e imperativo plantear medidas de adaptación a los efectos del cambio climático, como lo son las directrices de recarga gestionada para el acuífero en mención. De manera adicional se evaluarán de forma individual las series de datos de precipitación y temperatura, con el objetivo de determinar las tendencias climáticas a lo largo del tiempo, independientemente de la asociación que exista o no entre las variables.

Esta fase además de buscar probar la hipótesis de investigación tendrá un papel importante en el establecimiento de las directrices de recarga de acuíferos gestionada para el área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, al brindarnos información importante sobre uno de los cuatro criterios principales en el establecimiento de estas directrices: la cantidad o disponibilidad de agua basada en el clima en el área en cuestión.

Siguiendo las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se utilizarán series de datos que tengan intervalos temporales de 30 años como mínimo, con el fin de que el periodo de registro permita identificar cambios climáticos seculares. Las series utilizadas para precipitación corresponderán al periodo de 1971-2021. De igual forma, las series utilizadas para temperatura corresponderán al periodo de 1971-2021. Los datos serán obtenidos de bases de datos públicas y privadas. De presentarse datos faltantes en cualquiera de las series serán utilizados métodos matemáticos de interpolación para rellenar las series.

Tabla III. **Datos de temperatura y precipitación**

Variable	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación
Año				

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

9.4.3. Fase 3

La capacidad del suelo de almacenar o transmitir agua hacia zonas más profundas depende de sus diferentes características, por lo que en esta fase se buscará caracterizar los diferentes estratos del suelo del área del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En esta fase se realizará un análisis de perfiles estratigráficos o litográficos y pruebas de infiltración que nos proporcionarán información importante acerca de las características del suelo.

Se iniciará con el análisis de perfiles estratigráficos o litográficos del área de estudio. De estos perfiles se obtendrá una representación gráfica de la disposición de los estratos del suelo, su ubicación y principalmente, sus características. El análisis de las características de la zona permitirá concluir acerca de la capacidad del área de almacenar agua. Este análisis también permitirá concluir acerca de la capacidad del área de transmitir agua hacia zonas más profundas.

Posteriormente se realizarán pruebas de infiltración en el área de estudio. Se utilizará el método de ensayo Porchet, también conocido como ensayo de nivel constante. Este ensayo permite evaluar la cantidad de agua que penetra en el suelo en un determinado intervalo de tiempo. En esta prueba se realizará una excavación de dimensiones conocidas, en dicha excavación se inyectará un volumen específico de agua que nos dará una altura inicial de agua en el agujero. Se medirá en varios registros el tiempo de disminución del nivel de agua desde la altura inicial hasta una altura final. Una vez se alcance la saturación se tendrá una tasa de decaimiento estable.

A partir de los datos obtenidos se graficará la curva de infiltración con el fin de obtener información que permita caracterizar el suelo. La prueba se realizará en 4 puntos en el área de estudio. Se realizará una prueba de infiltración en época seca y otra prueba en época lluviosa. Durante el trabajo de campo los datos se registrarán como sigue:

Tabla IV. **Datos de pruebas de infiltración**

Número de registro	Hora inicial	Hora final	Lectura inicial	Lectura final	Diferencia
--------------------	--------------	------------	-----------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

9.4.4. Fase 4

Esta fase buscará analizar la hidroquímica del agua de lluvia del área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el fin de determinar si es necesario o no aplicar un tratamiento al agua de lluvia que se desea utilizar para la recarga gestionada de acuíferos, además de establecer el tipo de tratamiento o tecnología a utilizar para eliminar contaminantes específicos. Los resultados del análisis hidroquímico serán comparados con una normativa que será seleccionada después de la revisión de estándares internacionales para la utilización de agua de lluvia para la recarga gestionada de acuíferos. La caracterización hidroquímica se dividirá en análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua pluvial.

Se iniciará con la recolección de muestras para el análisis fisicoquímico del agua pluvial con el fin de determinar las características fisicoquímicas de la misma. Los parámetros que se analizarán son los siguientes: pH, turbidez, total de sólidos en suspensión (TSS), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), fósforo total, nitrógeno total, metales pesados, y dureza total. Posteriormente se recolectarán las muestras para el análisis microbiológico del agua pluvial, en el que se analizará: *E. coli* y coliformes totales.

Las muestras de agua pluvial serán recolectadas mediante trabajo de campo en el área de estudio. Se realizará un muestreo en época seca y otro en época lluviosa. Se utilizará la siguiente tabla para la recolección de las muestras durante el trabajo de campo:

Tabla V. **Recolección de muestras de agua pluvial**

Número de la muestra	Código de la muestra	pH de la muestra <i>in situ</i>	Temperatura de la muestra <i>in situ</i>	Conductividad de la muestra <i>in situ</i>	Coordenadas	Hora	Comentario

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

9.4.5. Fase 5

Esta fase busca establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para el caso del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. De los cuatro criterios para el establecimiento de directrices se priorizarán los evaluados en fases previas: disponibilidad del agua basada en el clima, la capacidad del suelo para infiltrar el agua y desafíos de la calidad del agua. Cabe mencionar que no se hará un análisis del criterio de tipos de fuente de agua al estar ya definida el tipo de fuente de agua a considerarse para el establecimiento de las directrices en el área de interés.

Esta fase también incluirá un análisis sobre la necesidad del agua en el área de estudio, el campus central de la Universidad de San Carlos de

Guatemala, que constituirá un criterio adicional para la implementación de las directrices de recarga gestionada de acuíferos en el área de estudio.

Para el establecimiento de las directrices de recarga gestionada de acuíferos se buscará relacionar la información obtenida de las pruebas y análisis realizados en la segunda, tercera, cuarta y quinta fases del estudio, con criterios internacionales de implementación de directrices de recarga gestionada de acuíferos, que serán estudiados en la primera fase, la revisión documental a través de la lectura de informes, revistas, libros, artículos científicos, tesis de estudio y otros documentos de carácter científico.

9.5. Resultados esperados

Se describe de manera clara y detallada lo que se espera lograr en cada una de las 5 fases de investigación, con el objetivo de permitir una posterior evaluación de cada una de las fases. Los resultados esperados según cada una de las 5 fases de investigación son los siguientes.

9.5.1. Fase 1

Se espera que la revisión documental a través de la lectura de informes, revistas, libros, artículos científicos, tesis de estudio y otros documentos de carácter científico permita plasmar la información más importante sobre la situación actual del conocimiento sobre el tema de estudio, mediante la selección y recopilación ordenada de información clave, el análisis y síntesis de los diferentes documentos, la revisión de diferentes metodologías de abordaje y el establecimiento de semejanzas entre las investigaciones previas y las ideas del investigador.

9.5.2. Fase 2

Se espera que los resultados de esta fase permitan correlacionar la precipitación y la temperatura con el fin de establecer la relación o dependencia que existe entre las dos variables, a partir de lo cual se verificará si existe una variación significativa en los patrones de lluvia en función del cambio en la temperatura. De manera similar se espera que los resultados del análisis individual de las series de datos de precipitación y temperatura permitan determinar tendencias climáticas a lo largo del tiempo, independientemente de la asociación que exista o no entre las variables.

No menos importante, se espera que los resultados de esta fase brinden información relevante sobre uno de los cuatro criterios principales para la implementación de proyectos de recarga gestionada de acuíferos gestionada: la cantidad o disponibilidad de agua basada en el clima en el área en cuestión, lo que permitirá establecer las directrices para el área de interés, el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Finalmente, y de manera más general, se espera que los resultados de esta fase sirvan como base para la elaboración de futuras propuestas de adaptación más acordes con la realidad local y con una planeación adecuada en el mediano y largo plazo.

9.5.3. Fase 3

De los resultados del análisis de perfiles estratigráficos o litográficos del área de estudio, se espera comprender mejor acerca de la disposición de los estratos del suelo, su ubicación y sus características, a partir de lo cual se podrá concluir de acerca de la capacidad del área de estudio de almacenar agua. De

manera similar, de este análisis también se espera concluir acerca de la capacidad del área de estudio de transmitir agua hacia zonas más profundas.

De las pruebas de infiltración en el área de estudio mediante el método de ensayo Porchet se espera conocer más acerca de la tasa de infiltración o cantidad de agua que penetra en el suelo en un determinado intervalo de tiempo en el área de interés, de los resultados obtenidos en esta prueba se espera graficar la curva de infiltración con el fin de obtener información que permita caracterizar el suelo.

9.5.4. Fase 4

De esta fase se espera caracterizar la hidroquímica del agua de lluvia del área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el fin de determinar si es necesario o no aplicar un tratamiento al agua de lluvia que se desea utilizar para la recarga gestionada de acuíferos, además de establecer el tipo de tratamiento o tecnología a utilizar para eliminar contaminantes específicos, todo lo anterior basado en estándares internacionales para la utilización de agua de lluvia para la recarga gestionada de acuíferos.

9.5.5. Fase 5

De esta fase se espera establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para el caso del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Además de los análisis de los criterios examinados en las fases previas, se espera de esta fase el análisis de un criterio adicional, la necesidad del agua en el área de estudio. Se espera que los resultados de los tres criterios principales analizados y el criterio adicional para el área de estudio, al ser comparados con criterios internacionales de implementación de proyectos de

recarga gestionada de acuíferos, permitan establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para el caso de estudio.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Las técnicas de análisis a utilizarse variarán según cada una de las 5 fases de la investigación. Las mismas proporcionarán una base sólida para el análisis, interpretación y presentación de sus resultados. A continuación, una descripción de las de las técnicas de análisis a utilizarse en cada fase.

10.1. Fase 1

Las técnicas de análisis de la revisión documental se encuentran en la descripción de la fase 1.

10.2. Fase 2

En la fase 2 serán aplicadas técnicas de análisis estadístico. Se partirá de la partirá de la descripción forma numérica y gráfica el comportamiento de las series de datos de precipitación y temperatura. Aquí se obtendrán:

- Medidas de tendencia central: media, mediana moda y cuartiles de las series de datos.
- Medidas de variabilidad: rango o amplitud, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y gráfico de dispersión de las series de datos.
- Medidas de forma: coeficiente de asimetría, coeficiente de curtosis y diagrama de caja y bigotes de las series de datos.

Posteriormente se realizarán 3 análisis de regresión con el fin de cuantificar la asociación entre las variables:

- El primer análisis de regresión determinará la relación entre una variable dependiente, la precipitación, y una variable independiente, la temperatura.
- El segundo análisis de regresión determinará la relación entre la precipitación como variable dependiente y el tiempo como variable independiente.
- El tercer análisis de regresión determinará la relación entre la temperatura como variable dependiente y el tiempo como variable independiente.

De cada análisis de regresión se obtendrá: covarianza o tipo de relación, coeficiente de correlación de Pearson, recta de regresión, diagrama de dispersión, contraste de la regresión o análisis de varianza y coeficiente de determinación con su respectivo coeficiente ajustado.

Se verificarán los supuestos que se consideren necesarios entre los siguientes para darle validez a los datos: linealidad, normalidad, independencia, homocedasticidad o homogeneidad. Para la verificación de los supuestos se realizarán pruebas formales y gráficas. Si los datos no presentan una distribución normal se aplicará una transformación matemática que permita normalizar las series de datos.

10.3. Fase 3

En base a la revisión de perfiles estratigráficos y/o litográficos del área de estudio se concluirá acerca de la capacidad de cada estrato para almacenar y transmitir agua a zonas más profundas. Para el análisis se presentará la siguiente tabla:

Tabla VI. **Análisis de perfiles estratigráficos y/o litográficos**

Número de estrato	Estrato	Características del estrato según revisión documental	Conclusión sobre capacidad de almacenamiento	Conclusión sobre capacidad de transmisión	Comentarios
-------------------	---------	---	--	---	-------------

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Los resultados de la prueba de infiltración se analizarán mediante técnicas estadísticas. A partir de los datos obtenidos durante cada una de las pruebas de infiltración se calculará la tasa de infiltración para cada registro mediante la utilización de fórmulas matemáticas para el cálculo de la tasa de infiltración. Posteriormente se tomará el tiempo como variable independiente y la tasa de infiltración como variable dependiente y se graficarán los resultados con el fin de obtener la curva de infiltración. Del análisis de la curva de infiltración se podrá concluir acerca de la capacidad del suelo en el área de estudio para infiltrar el agua.

10.4. Fase 4

El análisis de los resultados de la fase 4 inicia con la revisión de estándares internacionales sobre la utilización de agua de lluvia para la recarga gestionada de acuíferos con el objetivo de definir la norma a utilizarse y con ello los límites máximos permisibles (LMP) de las variables analizadas. Los LMP se presentarán en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Límites máximos permisibles (LMP) según la normativa**

Variable	Límite máximo permisible (LMP)
-----------------	---------------------------------------

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Posteriormente se hará un análisis comparativo de los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de cada una de las variables versus los límites máximos permisibles (LMP) para cada variable según la norma a utilizarse.

Tabla VIII. **Comparación entre los resultados de los análisis y la normativa**

Variable	Límite máximo permisible (LMP) según la norma	Resultado del análisis en época sea	¿Está dentro del LMP según la norma?	Resultado del análisis en época lluviosa	¿Está dentro del LMP según la norma?	Comentarios
-----------------	--	--	---	---	---	--------------------

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En base a los resultados obtenidos del análisis comparativo se definirá el tipo de tratamiento o tecnología a utilizarse dependiendo de los contaminantes específicos y según lo encontrado en la revisión documental.

10.5. Fase 5

Se realizará un análisis estadístico que permita hacer una proyección del crecimiento poblacional en el área de estudio, el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se partirá de la descripción de forma numérica y gráfica del comportamiento de las series de datos poblacionales. Aquí se obtendrán:

- Medidas de tendencia central: media, mediana moda y cuartiles de las series de datos.
- Medidas de variabilidad: rango o amplitud, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y gráfico de dispersión de las series de datos.
- Medidas de forma: coeficiente de asimetría, coeficiente de curtosis y diagrama de caja y bigotes de las series de datos.

Posteriormente se realizará una estimación de poblaciones futuras mediante el método aritmético. En base a los resultados de la estimación de poblaciones futuras será calculada la demanda de agua futura para el área del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para el establecimiento de las directrices serán comparados los resultados de los cuatro criterios analizados para el área de estudio con criterios

internacionales de implementación de proyectos de recarga gestionada de acuíferos.

11. CRONOGRAMA

Tabla IX. Cronograma

Actividad	Inicio	Fin	Duración (en semanas)	Calendrierización																				
				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre
				Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	
1 Revisión documental	04.04	17.04	2																					
2 Recopilación de series de precipitación y temperatura	18.04	24.04	1																					
3 Análisis estadístico de las series de precipitación y temperatura	25.04	01.05	2																					
Interpretación de resultados: variabilidad en los patrones de lluvia en función de la temperatura y tendencias climáticas	02.05	08.05	1																					
4 Interpretación de resultados: disponibilidad del agua en el área basada en el clima	02.05	08.05	1																					
5 Recopilación de perfiles estratigráficos y/o litográficos de la zona	09.05	15.05	1																					
6 Análisis de las características de la zona	16.05	29.05	2																					
7 Interpretación de resultados: conclusión sobre la capacidad de la zona de almacenar y transmitir agua	30.05	12.06	2																					
8 Prueba de infiltración época seca	04.04	17.04	1																					
9 Prueba de infiltración época lluviosa	13.06	19.06	1																					
10 Análisis estadístico de las pruebas de infiltración	20.06	26.06	1																					
11 Interpretación de resultados: pruebas de infiltración	20.06	26.06	1																					
12 Toma de muestras para análisis hidroquímico en época seca	04.04	17.04	1																					
13 Interpretación de resultados: análisis hidroquímico en época seca	04.04	17.04	1																					
14 Toma de muestras para análisis hidroquímico en época lluviosa	04.04	04.04	1																					
15 Interpretación de resultados: análisis hidroquímico en época lluviosa	04.07	10.07	1																					
16 Análisis hidroquímico en época lluviosa	04.07	10.07	1																					
17 Interpretación de resultados: análisis hidroquímicos	11.07	24.07	2																					
18 Recopilación de datos poblacionales en el área de estudio	25.07	31.07	1																					
19 Estimación de la demanda de agua futura en el área de estudio	01.08	07.08	1																					
20 Interpretación de resultados: necesidad del agua en el área de estudio	08.08	14.08	1																					
21 Análisis de los resultados de los criterios evaluados	15.08	28.08	2																					
22 Establecimiento de directrices para la recarga gestionada de acuíferos en el área de estudio	29.08	25.09	4																					

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

12.1. Recursos

Con el fin de garantizar su disponibilidad y utilización adecuada, los recursos a utilizarse son identificados en la tabla X, incluyendo el tipo de recurso, la fuente de financiamiento y costo total estimado.

Tabla X. **Recursos**

Tipo de recurso	Recurso	Fuente de financiamiento	Costo total estimado
Humano	Tesista	No aplica	Q. 0.00
	Asesor	No aplica	Q. 0.00
Equipo	Computadora portátil	Tesista	Q. 5,000.00
	Espectrofotómetro VW-R Uva 1600PC para la detección y caracterización de metales pesados	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 28,800.00
	Medidor multiparamétrico HI9829 para las mediciones <i>in situ</i>	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 34,944.00
Material	Reactivos y otros productos químicos	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 5,000.00
	Material de laboratorio	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 5,000.00

Continuación tabla X.

	Material de oficina	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 1,500.00
Tecnológico	Paquete de Office 365	Facultad de Ingeniería	Q. 459.00
	<i>Software</i> libre InfoStat	No aplica	Q. 0.00
	<i>Software</i> libre QGIS	No aplica	Q. 0.00
Infraestructura	Oficina	Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica	Q. 18,000.00
Financiero	(2) Análisis fisicoquímico	Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)	Q. 1050.00
	(2) Análisis microbiológico	Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)	Q. 440.00
Total, estimado			Q. 95,189.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

12.1.1. Consideraciones

Se hará la solicitud de financiamiento para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de laboratorio a través del proyecto de la red ERANet-LAC ERANet17/ICT2-0196 - Digital-enabled green infrastructure for sustainable water resources management (DIGIRIS), financiado en Guatemala por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) bajo el nombre de FINDECYT / InterCTI 02-2021 - Digitalización de infraestructura verde para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

En caso de que la solicitud se rechazada el financiamiento será solicitado al Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la Escuela de Postgrados de la Facultad de Ingeniería.

13. REFERENCIAS

1. Africa Groundwater Network, African Network of Basin Organisations, Federal institute for geosciences and natural resources, Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, Global Water Partnership, International Groundwater Resources Assessment Centre, Improved Management of Agricultural Water in Eastern and Southern Africa y International Water Management Insitute (2015). *Integration of Groundwater Management into Transboundary Basin Organizations in Africa*. Estados Unidos: Autor. Recuperado de: https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/77070/00_Training_Manual_Intro_en.pdf?sequence=1.
2. Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., y Mohanty, S. K. (mayo, 2021). Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. *Science of The Total Environment*, 768, 144992. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721000589?via%3Dihub>.
3. Andersen, L. y Verner B. (2010). *Reducing Poverty, Protecting Livelihoods, and Building Assets in a Changing Climate: Social Implications of Climate Change in Latin America and the Caribbean*. Estados Unidos: World Bank Publications.
4. Bonilla, J. P., Stefan, C., Palma, A., Bernardo, E., y Pivaral, H. L. (febrero, 2018). Inventory of managed aquifer recharge schemes in

Latin America and the Caribbean. *Sustainable Water Resources Management*, 4(2), 163–178. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-018-0231-y>.

5. Boyd, E., Chaffin, B. C., Dorkenoo, K., Jackson, G., Harrington, L., N'Guetta, A., Johansson, E. L., Nordlander, L., De Rosa, S. P., Raju, E., Scown, M., Soo, J., y Stuart-Smith, R. (octubre, 2021). Loss and damage from climate change: a new climate justice agenda. *One Earth*, 4(10), 1365–1370. Recuperado de: [https://www.cell.com/one-earth/pdf/S2590-3322\(21\)00537-6.pdf](https://www.cell.com/one-earth/pdf/S2590-3322(21)00537-6.pdf).
6. Bricker, S. H., Banks, V. J., Galik, G., Tapete, D., y Jones, R. (septiembre, 2017). Accounting for groundwater in future city visions. *Land Use Policy*, 69, 618-630. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717303563/pdf?isDTMRedir=true&download=true>.
7. Cabrera, F. G. (marzo, 2014). Análisis desde Arica hasta el Maule: ¿Dónde hay Condiciones para la Recarga Artificial de Acuíferos en Chile? *Rev AIDIDS Chile*, 47, 32–39.
8. Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1996). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill. Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/1847>.
9. Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H. y Ward, J. (2009). *Managed Aquifer Recharge: An Introduction. Waterlines Report Series No. 13*. Turner, Australia: National Water Commission. Recuperado de:

https://recharge.iah.org/files/2016/11/MAR_Intro-Waterlines-2009.pdf.

10. Escolero, O., Gutiérrez, C., y Mendoza, C. E. Y. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica*. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de: <https://www.geologia.unam.mx/igl/docs/libros/manejo-recarga-acuiferos2.pdf>.
11. Fetter, C. W. (2014). *Applied hydrogeology*. New Jersey, Estados Unidos: Pearson Education.
12. Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (2018). *Manejo gestionado de la recarga hídrica en el Valle de Guatemala y municipios vecinos*. Guatemala: Autor. Recuperado de: <https://funcagua.org.gt/programa-de-recarga-hidrica/>.
13. Gavilán, S. (2019). *Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/74374>.
14. Idme, D. A. (2018). *La recarga artificial como herramienta de gestión de los recursos hídricos, aplicación a los acuíferos de alta montaña* (Tesis de doctorado). Universidad de Almería, Perú. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=222011>.

15. Intergovernmental Panel on Climate Change (1992). *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Reino Unido: Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-1992-the-supplementary-report-to-the-ipcc-scientific-assessment/>.
16. Karlin, S., Bernasconi, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., y Accietto, R. (diciembre, 2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del suelo*, 37(2). Recuperado de: <http://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/435>.
17. Kumar, C. P. (octubre, 2012). Climate change and its impact on groundwater resources. *International Journal of Engineering and Science*, 1(5), 43-60. Recuperado de: <https://www.researchinventy.com/papers/v1i5/F015043060.pdf>.
18. Mamani, E. (2017). *Recarga artificial de acuíferos en función de las características geohidráulicas para incremento de la disponibilidad hídrica en el manantial Collana–Cabanilla* (Tesis de grado). Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Recuperado de: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_9c42460bb0c27fd6a2d133d9944c01f5.
19. Maples, S. R., Fogg, G. E., y Maxwell, R. M. (marzo, 2019). Modeling managed aquifer recharge processes in a highly heterogeneous, semi-confined aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 27(8), 2869-2888. Recuperado de: <https://escholarship.org/uc/item/1mg4v02b>.

20. Martínez, R., y Reyes, J. É. (2009). *Evaluación de los riesgos de contaminación de los acuíferos pertenecientes al municipio de Mesitas del Colegio* (Trabajo de licenciatura). Universidad de La Salle, Colombia. Recuperado de: https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/ir-ing_civil-1289.
21. Mertz, O., Halsnæs, K., Olesen, J. E., y Rasmussen, K. (enero, 2009). Adaptation to climate change in developing countries. *Environmental management*, 43(5), 743-752. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-008-9259-3>.
22. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*. Bogotá, Colombia: Autor.
23. Ministerio de Obras Públicas (2014). *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos*. Santiago de Chile, Chile: Autor.
24. Naciones Unidas (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Río de Janeiro, Brasil: Autor.
25. Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Lobo Ferreira, J. P. y Sauter, M. (mayo, 2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99, 61–75. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712000047>.

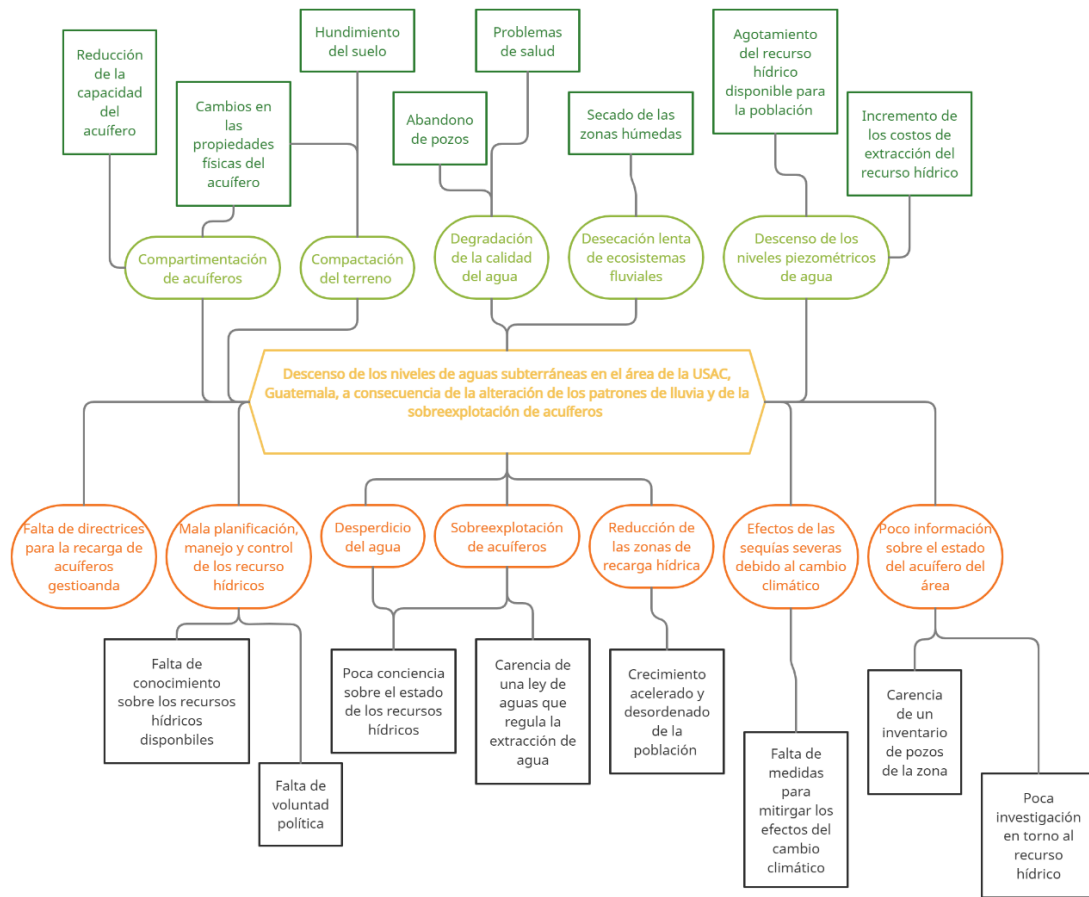
26. Rivera, P. F., Bardales, W. A., y Ochoa, W. (2019). *Escenarios futuros de cambio climático para Guatemala*. Guatemala: Editorial Universitaria UVG.
27. Salako, A. O., y Adepelumi, A. A. (agosto, 2018). Aquifer, classification and characterization. *Aquifers-Matrix and Ffluids*, 11-31. Recuperado de: <https://www.intechopen.com/chapters/58862>.
28. Serrano, S. M. V., Moreno, J. I. L., y Portugués, S. B. (marzo, 2014). Hidrología ambiental: el papel de la gestión humana del territorio en el ciclo hidrológico continental y en los recursos hídricos. *In Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*. 143-172. Instituto Pirenaico de Ecología. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4854016>.
29. Shubo, T., Fernandes, L., y Montenegro, S. G. (abril, 2020). An overview of managed aquifer recharge in Brazil. *Water*, 12(4), 1072. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/1072>.
30. Van-Engelenburg, J., Jonge, M., Rijpkema, S., Van, E., y Bense, V. (abril, 2020). Hydrogeological evaluation of managed aquifer recharge in a glacial moraine complex using long-term groundwater data analysis. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1787-1807. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-020-02145-7>.
31. Valverde, J. P. B. (2018). *Managed Aquifer Recharge Assessment to Overcome Water Scarcity During the Dry Season in Costa Rica*. (Tesis de doctorado). Universidad Técnica de Dresde, Alemania.

Recuperado de: [https://tud.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf\[id\]=https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A31144%2Fmets](https://tud.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A31144%2Fmets).

32. Viaroli, S., Lancia, M., y Re, V. (junio, 2022). Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. *Science of the Total Environment*, 824, 153851. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722009433>.
33. Villarroel, E. (2021). *Caracterización de Procesos de Recarga Artificial de Acuíferos como medios para Conservar el Balance Hídrico en el Abanico de Punata* (Tesis de doctorado). Universidad Mayor de San Simón, Bolivia. Recuperado de: <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/handle/123456789/25057>.
34. Yuan, J., Van Dyke, M. I., y Huck, P. M. (septiembre, 2016). Water reuse through managed aquifer recharge (MAR): Assessment of regulations/guidelines and case studies. *Water Quality Research Journal of Canada*. 51(4). Recuperado de: <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2016.022>.

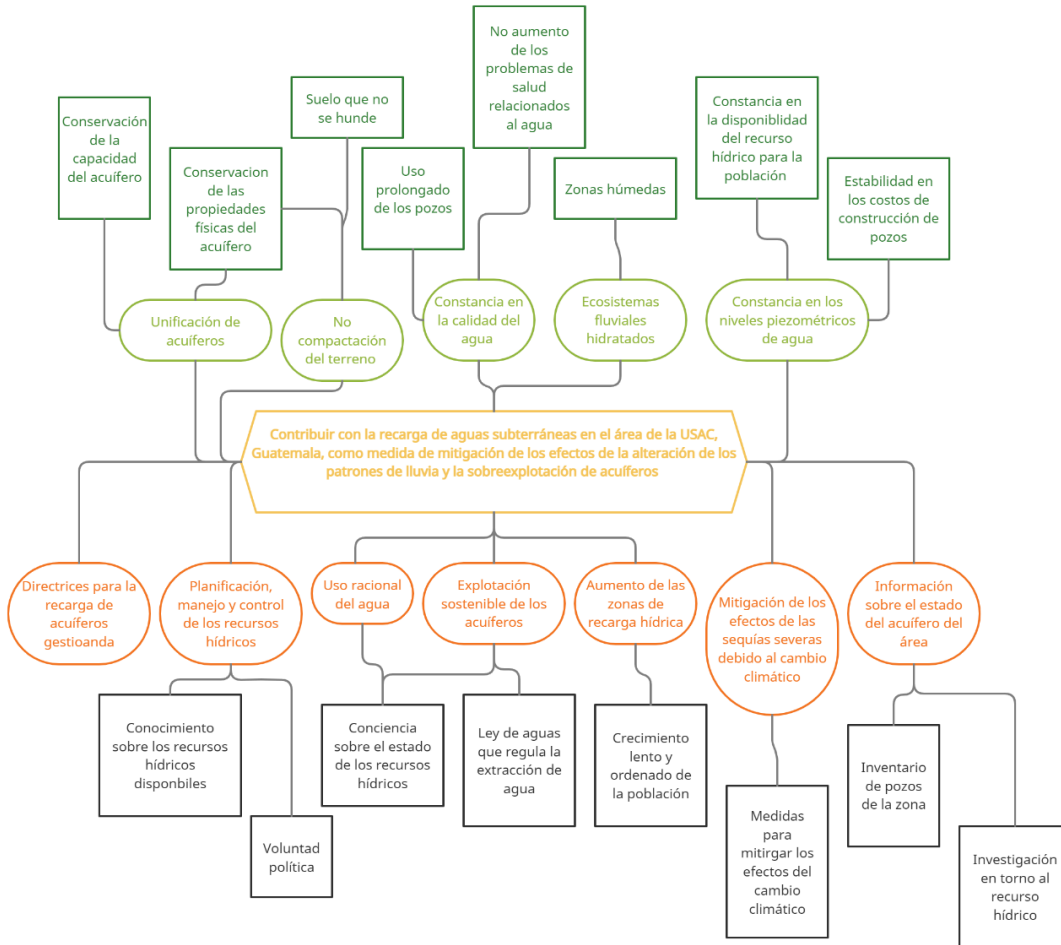
14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol del problema



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 2. Árbol de objetivos



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 3. Matriz de coherencia

Matriz de coherencia			
Título de la investigación	Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos
		Principal	General
Directrices para la recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático en la Universidad de San Carlos de Guatemala.	Existe una variación significativa en los patrones de lluvia en función de la temperatura en el área el área del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.	¿Cuáles son las directrices para la recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático en la Universidad de San Carlos de Guatemala que consideren el comportamiento del clima, características del suelo, características geológicas e hidroquímica del agua en el área de estudio?	Establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos para la adaptación al cambio climático en la Universidad de San Carlos de Guatemala en base al comportamiento de la precipitación, características del suelo, características geológicas e hidroquímica del agua en el área de estudio.
		Auxiliares	Específicos
		¿Cómo es el comportamiento de la precipitación en el área de estudio?	Modelar el comportamiento de la precipitación en el área de estudio.

Continuación apéndice 3.

¿Cuáles son las características del suelo y características hidrogeológicas en el área de estudio?	Definir las características del suelo y características hidrogeológicas en el área de estudio.
¿Qué características hidroquímicas del agua de lluvia en el área de estudio?	Caracterizar la hidroquímica del agua de lluvia en el área de estudio.
¿Cuáles son las directrices de recarga gestionada de acuíferos en el área de estudio?	Establecer las directrices de recarga gestionada de acuíferos en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.