

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**RECARGA INDUCIDA DE ACUÍFEROS EN FRACCIONAMIENTOS
URBANOS EN LA ZONA PONIENTE DE LA CIUDAD DE
CHIHUAHUA**

POR:

I.C. RAMÓN ALFONSO OLIVAS CHÁVEZ

TESIS, COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

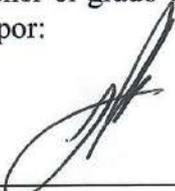
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

ABRIL 2022



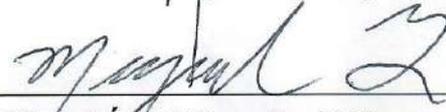
Recarga inducida de acuíferos en fraccionamientos urbanos en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua. Tesis presentada por Ramón Alfonso Olivas Chávez como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:



M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico



Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
Directora de Tesis

Abril 2022

Fecha

COMITÉ
Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
M.I. Juan Fernando Arévalo Ruíz
M.I. David Humberto Sánchez Navarro
M.I. Manuel Rodríguez Varela



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

26 de abril de 2022.

ING. RAMÓN ALFONSO OLIVAS CHÁVEZ
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por la directora **Dra. Carmen Julia Navarro Gómez** para que lo desarrolle como Tesis, con el título: **“RECARGA INDUCIDA DE ACUÍFEROS EN FRACCIONAMIENTOS URBANOS EN LA ZONA PONIENTE DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA”**.

Índice de Contenido

Agradecimientos

Resumen

Abstract

1. Introducción
2. Antecedentes
 - 2.1. Estado del arte
 - 2.2. Idoneidad del sitio de recarga
 - 2.3. Mar en el ámbito urbano
 - 2.4. Planteamiento del problema
 - 2.5. Justificación
3. Hipótesis
 - 3.1. Objetivo general
 - 3.2. Objetivos específicos
4. Metodología
 - 4.1. Selección del sitio de estudio
 - 4.2. Características geohidrológicas del sector
5. Resultados
 - 5.1 Plataforma inowas
 - 5.2 Definición de método de recarga inducida

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 5.3 La necesidad de la recarga artificial
- 5.4 Hidráulica del acuífero
- 6. Conclusiones y recomendaciones
 - 6.1 Conclusiones
 - 6.2 Recomendaciones
- Referencias

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE INGENIERÍA
U.A.CH. EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN



DIRECCIÓN

Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

A mis amados hijos, Ramón Said y Tabatha Aisha, quienes sin saber comprendieron lo que realizaba, por motivarme a seguir adelante, pues todo tiene recompensa, con sus halagos, elogios que me consideran como su héroe, logran que me enorgullezca de mi trabajo como padre, al mismo tiempo me hacen sentir una gran responsabilidad porque siguen mis pasos.

“Las Aguas Que Corren No Pueden Permanecer Impuras” D. Uchtdorf

I. Agradecimientos

A mi tutora y directora de tesis, Dra. Carmen Julia Navarro Gómez, por su conocimiento, apertura y apoyo para desarrollar el tema de investigación, por ser mujer de valioso aporte a la sociedad y que este mundo necesita.

Agradezco a todos los catedráticos que impartieron las clases para adquirir conocimiento y desarrollo profesional a lo largo de la maestría quienes son parte fundamental, así como a la facultad de ingeniería de la UACH.

A CONACYT por promover el desarrollo a la investigación con sus programas y sistemas de becas.

A mi coordinador de la maestría en ingeniería en hidrología quien, con su labor, liderazgo y entusiasmo, hace que cada uno de los que pasemos por aquí sea una grata experiencia.

A mi grupo de master en hidrología, con quienes compartí momentos de estudio, conocimiento, e incluso momentos de angustia, por su apoyo y paciencia, a cada uno les guardo un aprecio especial.

A mi familia quienes siempre están en mi corazón, mis padres y hermanas que siempre me animaron, motivaron e incentivaron.

A mi familia mis hijos, y a mi esposa que hizo lo posible para apoyarme en espacio y tiempo, quien como un cuchillito de palo dándome carrilla para culminar mi tesis.

II. Resumen

La recarga inducida de acuíferos bajo la gestión de la recarga de acuíferos tiene una historia de 60 años de progreso, evolución y desarrollo de tecnologías en el ámbito mundial, con la intención de obtener un balance sobre el agua subterránea y mitigar los efectos de la sobreexplotación de acuíferos.

El propósito de esta tesis fue la de determinar las características particulares de la microcuenca en pos de desarrollo urbano, ubicada en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua, con la finalidad de definir alternativas de técnicas de recarga inducida para su aplicabilidad, siendo como fuente principal de abastecimiento el agua de lluvia, con predominación del clima árido, semiárido en la zona; de los diversos métodos de la recarga gestionada de acuíferos que existen, y dentro de los principales métodos que se refieren a la infiltración de agua, se obtuvieron tres tipos que se clasifican en sistemas de recarga de pozo a pozo, otra técnica de recarga que se refieren a la intercepción del agua y de la cual se obtuvo uno, corresponde a sistemas de modificaciones en el canal, la metodología aplicada que se utilizó fue mediante la configuración de datos para sistemas de información geográfica y herramientas automatizadas de análisis multicriterio, basados en la caracterización de la superficie como lo es su geomorfología y rasgos geohidrológicos, derivado de su análisis se obtuvo la idoneidad del sitio que reflejaron la zona apta para implementación de un sistema de recarga. Puesto que los valores obtenidos son estimados o bien de aproximación, permitieron tener una importancia de orientación selectiva y toma de decisiones sobre métodos disponibles.

Por último, se hace hincapié de la importancia de considerar el mayor número de factores posibles, para evitar que el impacto negativo sea menor o nulo.

III. Abstract

The induced recharge of aquifers under the management of aquifer recharge has a 60 year history of progress, evolution and development of technologies worldwide, with the intention of obtaining a balance on groundwater and mitigating the effects of overexploitation of aquifers.

The purpose of this thesis was to determine the particular characteristics of the micro basin in pursuit of urban development, located in the western area of the city of Chihuahua, in order to define alternatives of induced recharge techniques for its applicability, being as the main source of supply rainwater, with predominance of the arid climate, semi arid in the area; of the various methods of managed recharge of aquifers that exist, and within the main methods that refer to water infiltration, three types were obtained that are classified into well to well recharge systems, another recharge technique that refers to the interception of water and from which one was obtained, corresponds to systems of modifications in the channel, the applied methodology that was used was through the configuration of data for geographic information systems and automated multi-criteria analysis tools, based on the characterization of the surface such as its geomorphology and geohydrological features, derived from its analysis the suitability of the site was obtained that reflected the area suitable for implementation of a recharge system. Since the values obtained are estimated or approximation, they allowed to have an importance of selective orientation and decision making on available methods.

Finally, the importance of considering as many factors as possible is emphasized, to avoid that the negative impact is less or null.



Índice de contenido

I. AGRADECIMIENTOS	VI
II. RESUMEN	VII
III. ABSTRACT	VIII
RECARGA INDUCIDA DE ACUÍFEROS EN FRACCIONAMIENTOS URBANOS EN LA ZONA PONIENTE DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA	14
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ANTECEDENTES	16
2.1. ESTADO DEL ARTE	17
2.2. IDONEIDAD DEL SITIO DE RECARGA	23
2.3. MAR EN EL ÁMBITO URBANO	24
2.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
2.5. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. HIPÓTESIS	26
3.1. OBJETIVO GENERAL	26
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4. METODOLOGÍA	27
4.1. SELECCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	28
4.1.1. <i>Localización</i>	28
4.2. CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL SECTOR	29
4.2.1. <i>Geomorfología</i>	29
4.2.2. <i>Parteaguas</i>	29
4.2.3. <i>Superficie</i>	30
4.2.4. <i>Hidrografía</i>	30
4.2.5. <i>Región hidrológica</i>	30
4.2.5.1. Orden de corriente	30
4.2.5.2. Densidad de drenaje.....	32



4.2.6. Pendiente del cauce principal	33
4.2.7. Pendiente de la cuenca	36
4.2.8. Climatología	38
4.2.8.1. Precipitación promedio de la cuenca	41
4.2.9. Uso de suelo y vegetación.....	41
4.2.10. Bosque de galería	42
4.2.11. Matorral desértico micrófilo	43
4.2.12. Uso de suelo según implan	44
4.2.13. Edafología.....	45
4.2.13.1. Evapotranspiración	47
4.2.14. Escorrentía superficial	47
4.2.15. Caudal.....	49
4.2.15.1. Geología.....	53
4.2.15.2. Conductividad hidráulica.....	55
5. RESULTADOS	57
5.1. PLATAFORMA INOWAS.....	57
5.1.1. Base de datos de reducción de la capacidad de infiltración de la cuenca.....	58
5.1.2. Modelo de selección mar inowas.....	59
5.1.2.1. Selección del método mar inowas	59
5.1.3. Técnica de recarga	60
5.2. DEFINICIÓN DE MÉTODO DE RECARGA INDUCIDA.....	61
5.2.1. Mapa de idoneidad	66
5.3. LA NECESIDAD DE LA RECARGA ARTIFICIAL.....	70
5.3.1. Fuente de agua	71
5.4. HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO.....	72
5.4.1. Calidad del agua.....	72
5.4.2. Elementos del esquema selección de sitios para recarga	73



5.4.2.1. Represas de arena	73
5.4.2.2. Almacenamiento y recuperación de acuíferos ASR	75
5.4.2.3. ASTR	77
5.4.2.4. Infiltración de pozo a pozo	79
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.1. CONCLUSIONES.....	81
6.2. RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS	83



Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de MAR en entornos urbanos Dillon 2005 citado en (Page et al, 2018)	21
Tabla 2 Tipos de MAR en el mundo (Page et al, 2018).....	22
Tabla 3 Clase de rangos de densidad de drenaje según Delgadillo y Páez.....	32
Tabla 4 Cálculo de la densidad de drenaje de la microcuenca poniente.....	32
Tabla 5 Cálculo de la pendiente del cauce principal por método de longitud constante Taylor y Schwarz (Campos Aranda, 2010)	35
Tabla 6 Cálculo de la pendiente por microcuencas por método de Alvord (Villon Béjar, 2002).....	37
Tabla 7 Calculo de la pendiente de la microcuenca por ArcMap Vs 10.5.....	38
Tabla 8 Área por cobertura de suelo y vegetación de cada microcuenca, Serie VI INEGI.....	43
Tabla 9 Cálculo del coeficiente de escurrimiento del uso de suelo por el IMPLAN.....	45
Tabla 10 Cálculo del volumen de escurrimientos por microcuenca	48
Tabla 11 Precipitación máxima por hora y 24 horas, histórico del 1983 al 2019.....	50
Tabla 12 Cálculo de altura de precipitación.....	52
Tabla 13 Cálculo de intensidad de lluvia duración periodo de retorno	52
Tabla 14 Cálculo del caudal máximo de la microcuenca poniente.....	53
Tabla 15 Cálculo de la conductividad hidráulica vertical (Fetter, 2001).....	57
Tabla 16 Técnicas de la recarga artificial gestionada MAR(adaptación de IGRAC,2015).....	60
Tabla 17 Alcances de un sistema MAR tipo represas de arena Demau,2014.....	74
Tabla 18 Alcances de un sistema MAR tipo ASR Demau,2014	76
Tabla 19 Alcances de un sistema MAR tipo ASTR Demau,2014.....	78
Tabla 20 Alcances de un sistema MAR tipo infiltración en pozos a pozos poco profundos Demau,2014	80



Índice de figuras

Figura 1	Objetivos de primarios de MAR en el mundo	17
Figura 2	Uso final del agua por continente	18
Figura 3	Portal MAR de inventario global.....	20
Figura 4	Mapa esquemático de Idoneidad del sitio en Costa Rica con multicriterio de pendiente del terreno y textura del suelo (Bonilla et al, 2016)	23
Figura 5	MAR dentro de la planificación integrada del agua urbana (P.Dillon et al, 2009)	24
Figura 6	Localización de la microcuenca en la zona poniente de la ciudad Fuente INEGI	28
Figura 7	Trazo de Parteaguas con curvas de nivel a cada 5 m. Esc: 1:31,000 Fuente INEGI.....	29
Figura 8	Definición del orden de corriente 3	31
Figura 9	Gráfico de la Pendiente suavizada del cauce principal.....	33
Figura 10	Trazo del Cauce principal.....	34
Figura 11	Configuración e interpolación de la pendiente de la microcuenca fuente ArcMap vr 10.5	37
Figura 12	Gráfico de valores de la pendiente media de la microcuenca ArcMap Vs10.5.....	38
Figura 13	Porcentaje de precipitación mensual histórico	39
Figura 14	Serie de tiempo de la temperatura media Anual.....	40
Figura 15	Serie de tiempo de la precipitación media anual, fuente de datos CONAGUA.....	41
Figura 16	Uso de suelo y vegetación serie VI por fuente de INEGI	42
Figura 17	Uso de suelo por fuente de IMPLAN	44
Figura 18	Edafología de la microcuenca por fuente de INEGI.....	46
Figura 19	Geología del sitio de estudio por fuente de SGM.....	54
Figura 20	Valores de Conductividad hidráulica (Palma et al, 2018) adaptación propia	56
Figura 21	Escenarios de la infiltración de la plataforma INOWAS	58
Figura 22	Clasificación de los sistemas MAR fuente	63
Figura 23	Selección de la técnica MAR por fuente de INOWAS	65
Figura 24	Plataforma bade de documentación para mapeo de idoneidad del sitio INOWAS	67
Figura 26	Criterios de selección para idoneidad del sitio figura 25,26	68
Figura 25	Criterio de selección de cobertura, pendiente suelo y geología	68
Figura 27	Multicriterio de análisis para decisiones GIS	69
Figura 28	Idoneidad del sitio	70
Figura 29	Sistema MAR represas de arena.....	73
Figura 30	Sistema MAR ASR.....	75
Figura 31	Sistema MAR ASTR	77
Figura 32	Proceso de desarrollo esquemático de un sistema ASTR fuente Water Technology	78
Figura 33	Sistema MAR infiltración de pozo a pozo	79



RECARGA INDUCIDA DE ACUÍFEROS EN FRACCIONAMIENTOS URBANOS EN LA ZONA PONIENTE DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA

1. Introducción

Actualmente existe sobreexplotación de los recursos hídricos en el estado de Chihuahua, debido al incremento de las actividades y desarrollo de la sociedad; aunado lo anterior, las estadísticas presentan una tendencia ascendente de la temperatura en los últimos años y una disminución de la precipitación de lluvia, estos factores son de suma importancia ya que influyen en la disponibilidad del agua, así como en la cantidad de volúmenes de agua que se recargan en los acuíferos y la duración del tránsito del ciclo hidrológico local.

Se tiene la expectativa de un crecimiento acelerado de la población a nivel mundial, lo que conlleva implícitamente a todos los sectores una demanda de agua, por tal motivo existen regiones del mundo no exceptuando el país, en los cuales se presentan casos que rebasan los límites de alcance sobre la disponibilidad. (Azizur et al, 2013)

De acuerdo con (Reyes et al, 2009) la disponibilidad del agua en Chihuahua está en crisis por factores antropogénicos y naturales; lo que propicia problemas de la índole socioeconómica en el estado.

La principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Chihuahua son las aguas subterráneas de los acuíferos Chihuahua Sacramento, Tabaloapa Aldama y Sauz Encinillas. (Palma et al, 2018)

El crecimiento urbano de la ciudad de Chihuahua se ha prolongado sobre las áreas periféricas en zonas específicas de crecimiento como al Norte, Sur Oriente y Poniente de la ciudad. (IMPLAN, 2013)



Para fines de este estudio, se ha elegido la zona poniente perteneciente al Acuífero Chihuahua Sacramento; cuya ubicación se encuentran en la zona natural de recarga del acuífero; la cual podría ser afectada por el emplazamiento de cambio de uso de suelo.

La zona poniente de la ciudad, presenta una creciente demanda que corresponde a una zonificación de modo habitacional, recreación, deporte, comercio, servicios, reserva de crecimiento urbano, equipamiento general y preservación ecológica primaria. (IMPLAN, 2013)

Según el Sistema Global de Información del Agua Subterránea por sus siglas en inglés GGIS, que contiene información referente a las técnicas MAR Managed Aquifer Recharge, nombre del lugar, ubicación, año en que se implementó, la fuente de agua de infiltración y el uso final del agua. En este inventario donde se ha implementado la recarga de acuíferos, existen recopilados 1200 estudios de caso de 50 países en todo el mundo.

La infiltración inducida del agua de lluvia de la superficie y a través de pozos, tiene su aplicación desde la antigüedad en el mundo; en México se encuentran proyectos documentados en Guadalajara y en la ciudad de México entre los años 1955 y 1953. (IMTA, 2017)

La recarga inducida de acuíferos en algunas ciudades a nivel nacional se ha llevado a cabo, implementado algunos métodos de recarga del tipo MAR, como lagunas de infiltración en el acuífero del valle de San Luis Rio Colorado, esto impulsado por el Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS) de su localidad. En la ciudad de Torreón Coahuila son proyectos que implementó el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua acerca de la recarga controlada mediante embalses de infiltración sobre el cauce del Rio Nazas. Al Sureste de la ciudad de México se ha propiciado la perforación de pozos de absorción con la finalidad de infiltrar el agua de lluvia captada mediante el programa Cosecha de Agua. (IMTA, 2017)



2. Antecedentes

En una escala global la explotación del agua subterránea ha incrementado con una gran rapidez, lo que hace poner a prueba la capacidad del ser humano para preservar el recurso hídrico, según (Dillon, 2018) desde los años 1960 se ha implementado la recarga gestionada de acuíferos MAR por sus siglas en inglés, por lo que se llevan 60 años de progreso mundial; durante este periodo se han observado el desarrollo de algunas nuevas tecnologías que tienen como fundamento reabastecer por medio de inducción del agua subterránea. MAR se ha presentado con el fin de ser una estrategia de gestión del agua logrando una implementación de mayor importancia, con la finalidad de mantener en equilibrio el agua subterránea, mitigar el impacto de un clima variante, a su vez realizar una mejora y protección de la calidad del agua.

De acuerdo con investigaciones de (F.Escalante et al, 2018) menciona que el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático en el 5° informe demuestran que la temperatura de forma global ascenderá por arriba de 1.5° C en el siglo XXI, lo que resulta una mayor demanda hídrica, por lo cual implementar los sistemas de recarga gestionada de acuíferos MAR es una herramienta de mitigación ante el cambio climático.

En el caso de México, particularmente en el estado de Sonora se han hecho investigaciones para evaluar los sistemas de Recarga MAR, tal es el caso de la cuenca del Río Sonora en donde destaca el mayor uso del agua por tener zonas agrícolas, en la cuales tienen diversas tipos de fuente de agua, utilizando principalmente como una de las opciones, las aguas residuales tratadas, unos de los factores que comparten los estados del norte del país es que presenta un clima semiárido al igual que una mayor demanda de agua cada vez; ya que existen grandes zonas de distritos de riego, por tal motivo el uso del agua es para riego y dotación para el ganado; otro tipo de técnica de recarga implementado fue el de lagunas de infiltración (Palma and Cruickshank, 2014)



2.1. Estado del Arte

En 1956 se fundó la Asociación Internacional de Hidrogeólogos IAH por sus siglas en inglés, con la finalidad de generar conocimiento y transmitirlo para dar un buen uso y protección acerca de los recursos del agua subterránea, en los últimos años se, concedió a MAR un énfasis particular referente a la recarga gestionada de acuíferos estableciendo una comisión IAH-MAR para tales asuntos; en el año 2015 el grupo IAH-MAR recopila y analiza datos para la recopilación del primer inventario global de sistemas MAR. (Stefan and Ansems, 2017), el resumen de objetivos obtenidos en este inventario se muestran en la figura 1

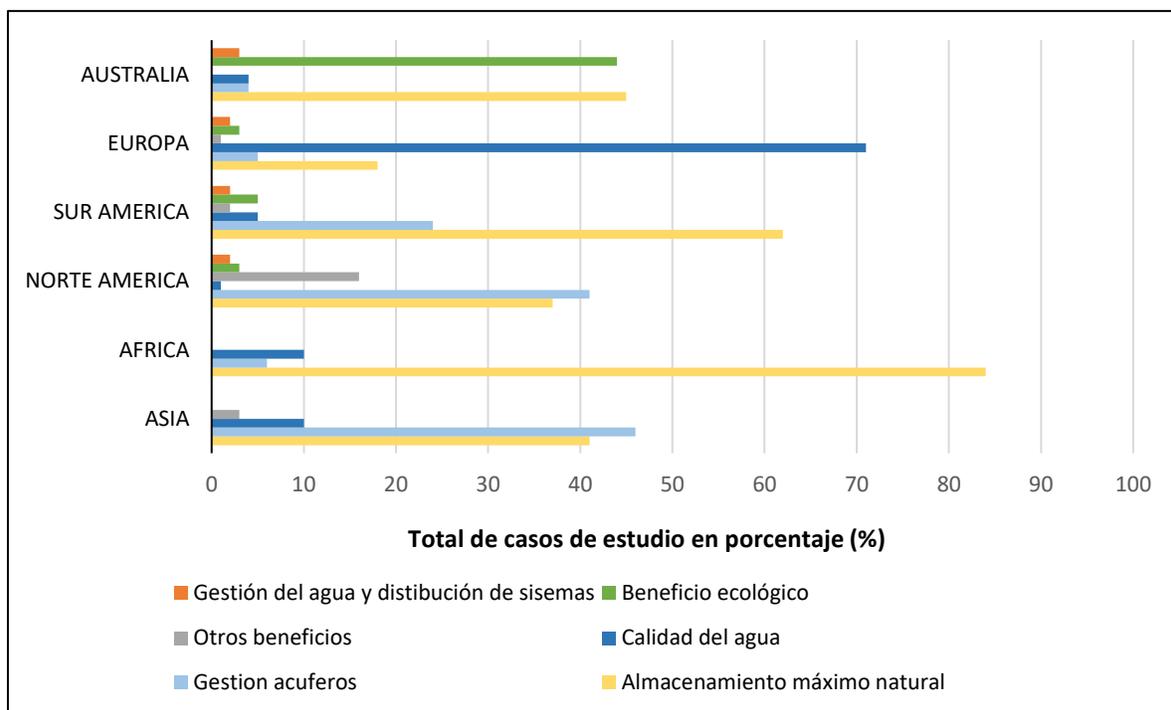


Figura 1 Objetivos de primarios de MAR en el mundo



Del inventario que cuenta con información de 1200 casos de estudio que existen, en la figura 2 se observa de forma global la implementación de los sistemas MAR, con sus respectivos objetivos primarios, que determinan un uso final.

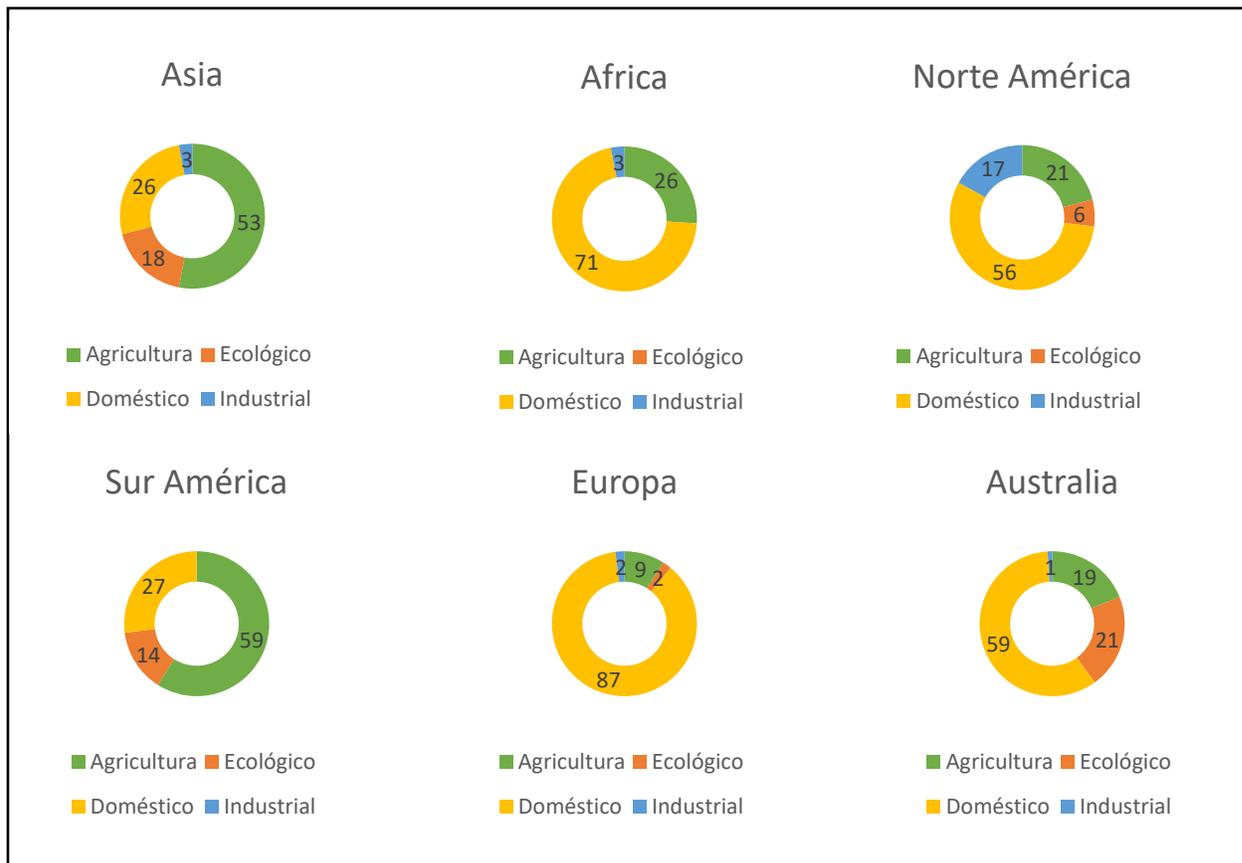


Figura 2 Uso final del agua por continente

Cabe destacar algunos aspectos importantes en la figura 2; en el caso de Europa y África el uso final más recurrente fue destinado para doméstico, también existen otros objetivos primarios distintos, como mejorar la calidad del agua el primer caso y en África para almacenamiento máximo natural, en Asia y Sur América el uso es para la agricultura en mayor porcentaje, Norte América y Australia también coinciden con los dos primeros en dar mayor uso al doméstico.



México es de los países que cuenta con normatividad para el desarrollo y aplicación de proyectos de gestión de recarga artificial de acuíferos, se han publicado dos normas; la (NOM-014-CONAGUA-2003), que define los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada; y la (NOM-015-CONAGUA-2007), que refiere a la Infiltración artificial de agua a los acuíferos, establece las características y especificaciones de las obras y del agua. De acuerdo con (Palma Nava et al, 2014) se menciona que “sirven para comunicar los propósitos de contribución para la recuperación de acuíferos y protección de la calidad del agua subterránea”.

En el País de India al igual que el resto del mundo el agua subterránea en su mayor porcentaje es utilizada para la agricultura y con la finalidad de hacer frente a la sobreexplotación, en 1992 se invirtió en programas para rehabilitar y conservar obras de recarga de los sistemas MAR. (Alazard et al, 2016)

Algunas técnicas de recarga, como las de detención-infiltración han tenido un crecimiento en el mundo, mediante obras de retención y/o diques, ya que pueden responder y mitigar a lo imprevisto de las tormentas extremas que por efecto del cambio climático suceden. (F.Escalante et al, 2018)

También existen otro tipo de sistemas semejante al anterior descrito, es decir se colocan sobre los ríos y arroyos , sólo que involucra un volumen de obra mayor, conocido como presas de control, que de igual forma sirven para recolectar agua; el costo de construcción es elevado por el tipo de infraestructura que requieren, los extensos materiales, mantenimiento y operación, este método se amerita según la zona, lo cercano de la fuente de agua y el objetivo final del uso del agua. (Kalantari et al, 2010)



En el inventario global MAR, en su portal se puede visualizar, la información detallada que existe en diferentes partes del mundo, por ejemplo, en la figura 3 se puede observar el tipo de método aplicado, la clasificación, el objetivo principal, la fuente proveniente del agua, y el uso final. (un-igrac.org, s.f.)



Figura 3 Portal MAR de inventario global

La utilidad de un sistema MAR es que se tiene la ventaja de realizar combinaciones con otro tipo de técnicas de recarga lo que conlleva a dar un uso sostenible particularmente sobre agua urbana, ya sea para usos de agua potable u otros distintos. Lo cual lleva a dar una mejora a la recarga de agua natural, logrando así un impacto en superficies urbanas. (Page et al, 2018)

Existen diversos tipos de MAR enfocados a la recarga de agua para entornos urbanos dependiendo de las características de los acuíferos. En la tabla 1 se muestran y se describen algunos de ellos.



Tabla 1 Tipos de MAR en entornos urbanos Dillon 2005 citado en (*Page et al, 2018*)

Tipo De MAR	Descripción
ASR	Almacenamiento y recuperación de acuíferos: Consiste en la inyección de agua hacia un pozo para su almacenamiento y recuperación desde el mismo pozo.
ASTR	Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos: Consiste en inyectar agua en un pozo para su almacenamiento y recuperación en otro pozo.
Pozos Secos	Generalmente, pozos poco profundos donde las capas freáticas son profundas, lo que permite la infiltración de agua de alta calidad a un acuífero no confinado.
Tanques de percolación, presas de control o vertederos de recarga	Las represas construidas en arroyos efímeros retienen el agua que se infiltra a través del lecho para mejorar el almacenamiento en acuíferos no confinados y se extrae aguas abajo.
Captación de agua de lluvia para almacenamiento de acuíferos	El agua pluvial de las azoteas se desvía hacia un pozo de arena o grava filtrándose hasta la capa freática donde se recolecta mediante bombeo desde un pozo.
Filtración bancaria	Extracción de agua subterránea de un pozo cerca o debajo de un río o lago para inducir la infiltración desde el cuerpo de agua superficial.
Galerías de infiltración	Mediante zanjas enterradas en suelos permeables que permiten la infiltración a través de la zona no saturada a un acuífero no confinado.
Filtración de dunas	Infiltración de agua de estanques construidos en dunas y extracción de pozos o estanques a menor altura.
Estanques de infiltración	Se desvía el agua superficial hacia cuencas y canales fuera de la corriente que permiten que el agua penetre a través de una zona no saturada hacia el acuífero no confinado subyacente.
Tratamiento de acuíferos de suelos (SAT)	El efluente de aguas residuales tratadas se infiltra intermitentemente a través de estanques de infiltración para facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos en el paso a través de la zona no saturada para su recuperación mediante pozos después de residir en el acuífero no confinado.
Liberaciones de recarga	Las represas en los arroyos efímeros se utilizan para retener el agua de las inundaciones y los usos pueden incluir la liberación lenta de agua en el lecho del río, río abajo para igualar la capacidad de infiltración en los acuíferos subyacentes, mejorando así significativamente la recarga.



En la tabla 2 se muestran los Beneficios y requisitos de los tipos de MAR aplicados en diferentes países.

Tabla 2 Tipos de MAR en el mundo (*Page et al, 2018*)

Tipo De Mar	Beneficios/Requisitos	Aplicación País
ASR	Esto es especialmente útil en acuíferos donde el almacenamiento es el objetivo principal y el tratamiento del agua es una consideración menor. Comúnmente utilizado para almacenar agua potable sin embargo se ha usado con éxito para la reutilización de aguas residuales tratadas. En general, se requiere una mayor calidad del agua para compensar la posible obstrucción de los pozos.	USA/AUSTRALIA
ASTR	Se logra un tratamiento de agua adicional (especialmente para patógenos y micro contaminantes) al extender el tiempo de residencia en el acuífero.	AUSTRALIA
Pozos Secos	Permitir la recarga de acuíferos profundos.	USA
Tanques de percolación, presas de control o vertederos de recarga	Mejora la infiltración de ríos urbanos naturales	INDIA
Captación de agua de lluvia para almacenamiento de acuíferos	Escala mucho más pequeña que otros tipos de MAR, puede ser muy efectivo cuando se usa ampliamente.	NEPAL
Filtración bancaria	Ciertos contaminantes de la fuente de agua pueden eliminarse mediante el proceso	ALEMANIA/NORUEGA
Galerías de infiltración	Requieren menos área de tierra que los estanques de infiltración, y hay menos posibilidades de obstrucción debido al crecimiento excesivo de algas.	AUSTRALIA
Filtración de dunas	Mejorar la calidad del agua y equilibrar la oferta y la demanda	BÉLGICA
Estanques de infiltración	Mayor área de terreno que los métodos de inyección de pozos, tienen altas tasas de crecimiento de algas en comparación con las galerías y pueden ser más difíciles de manejar para la obstrucción en comparación con SAT	SUDÁFRICA
Tratamiento de acuíferos de suelos (SAT)	El secado de los estanques de recarga SAT que se dejan secar permite una mejor gestión de las tasas de infiltración y puede evitarse una obstrucción excesiva	USA
Liberaciones de recarga	Liberaciones de agua de fuentes tradicionales de embalses superficiales para permitir el uso conjunto del almacenamiento de aguas superficiales y subterráneas	AUSTRALIA



2.2. Idoneidad del sitio de recarga

La idoneidad de recarga tiene que ver con los procesos de identificación de zonas aptas sobre los métodos MAR, es decir se describiría como la factibilidad u oportunidad para desarrollar e implementar una técnica de recarga en algún sitio adecuado, los cuales son basados en múltiples factores como la hidrogeología, relieve, cobertura del suelo y clima, entre otros; son parámetros considerados para medir el transcurso de la recarga de agua subterránea. Una correcta evaluación de la idoneidad del sitio para establecer un sistema MAR, puede lograrse con la aplicación de combinaciones de criterios múltiples a través de Sistemas de Información Geográfica GIS, que conllevan a la toma de decisiones de selección de sitios para recarga. (J.Sallwey et al, 2018)

Se muestra en la figura 4 la detección del sitio apto para métodos de esparcimiento MAR con la combinación de multicriterio GIS, entre pendiente del terreno y textura del suelo.

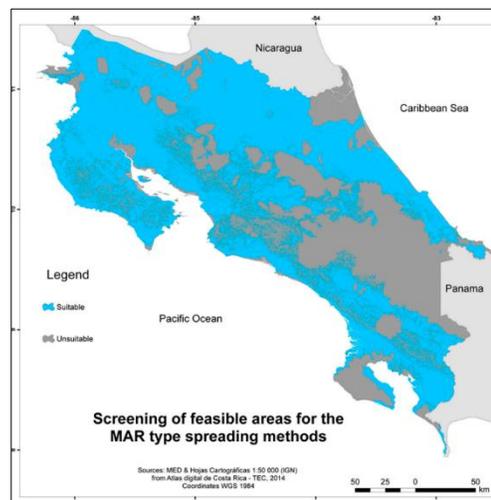


Figura 4 Mapa esquemático de Idoneidad del sitio en Costa Rica con multicriterio de pendiente del terreno y textura del suelo (Bonilla et al, 2016)



Dependiendo el objetivo principal del MAR como es: para agricultura, doméstico, ecológico, e industrial entre otros criterios como profundidad del acuífero, permeabilidad, geología, transmisividad, pendiente, lluvia, textura del suelo, calidad del agua, pueden ser considerados para evaluación de la idoneidad del sitio; en España se realizó una evaluación de técnicas de recarga basados en un inventario de 24 categorías de las antes mencionadas para la selección del sitio. (Escalante et al, 2014)

2.3. MAR En El Ámbito Urbano

De acuerdo con (Alraggad and Jasem, 2010), las áreas urbanas representan un factor limitante para la construcción de estructuras MAR, sin embargo puede contribuir al abastecimiento de agua en zonas urbanas, contemplando un diseño adecuado para la recolección del agua de escorrentía, en donde la autoridad local puede contribuir hacia los desarrollos habitacionales para colocar condiciones en las que se puedan disminuir los flujos de corriente con obras determinadas; y extender el periodo de recarga después de cada tormenta. (P.Dillon et al, 2009)

En la figura 5 se muestra la contribución de MAR en un desarrollo urbano, previendo la planificación e infraestructura de los sistemas de agua pluvial, residual y suministro.

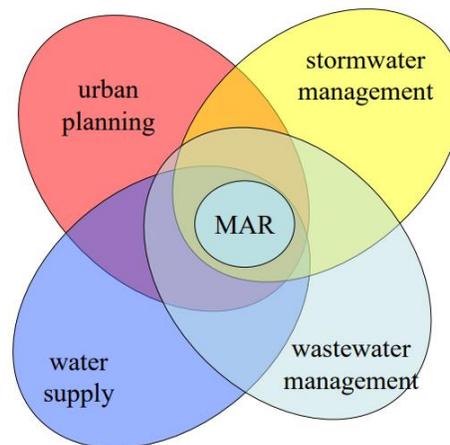


Figura 5 MAR dentro de la planificación integrada del agua urbana (P.Dillon et al, 2009)



A medida que se experimenta sobre la implementación de sistemas MAR, se requiere mayor conocimiento técnico, proyectos de planificación constantes que promuevan el buen uso de las fuentes de agua, así como de las obras en su infraestructura que eviten el descuido y abandono mismo, para que a futuro se tenga la confianza y resultados favorables que contribuyan a la gestión de la recarga de acuíferos. (Page et al, 2018)

2.4. Planteamiento del problema

Es común, que se tome la decisión de hacer estructuras de recarga, sin un conocimiento profundo del área (idoneidad de recarga) (UN-IGRAC,2021), aunado a la falta de capacidad técnica para la definición y selección del método de recarga (INOWAS,2021), estos dos factores inciden, en que los resultados del objetivo de recarga, no se reflejan en el “corto” tiempo, ni sean percibidos por la sociedad o las instituciones; inhibiendo o desactivando la ejecución de estos proyectos. En otros casos, estos dos factores pueden generar impactos negativos en las fuentes de abasto en un tiempo determinado, en cuyos casos difícilmente puede remediarse la problemática generada.

2.5. Justificación

La limitada disponibilidad de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos en toda la extensión de territorio del estado de Chihuahua, debido a la sobreexplotación, e incremento de la demanda y porque no mencionarlo al mal uso que como individuos se le ha dado a este vital líquido; a la vez que se afrontan condiciones adversas al presentarse climas cada vez más calurosos y secos por la falta de precipitación que año con año, tiende a disminuir la infiltración y por ende los volúmenes de agua recargada.

El régimen de lluvias se presenta en tormentas intensas de corta duración, lo que producen escurrimientos que rápidamente fluyen por sus cauces naturales, lo que no favorece la infiltración hacia disminución el suelo.



Conforme se extiende la población, aumentan los desarrollos habitacionales, los cuales carecen de diseño para obras de retención del agua superficial, por lo que disminuye la infiltración natural al suelo, esto sería mitigado si contaran con obras y/o técnicas en sitio para recuperar aguas superficiales, que puedan servir para inducir hacia el acuífero.

Esta investigación presenta las diversas técnicas y oportunidades del manejo de la recarga de acuíferos, que pueden aplicarse en los fraccionamientos para evitar la disminución y al contrario favorecer la recarga de agua al acuífero.

3. Hipótesis

Es posible implementar la recarga inducida mediante una técnica MAR en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua.

3.1. Objetivo General

Definir cuál(es) alternativa(s) de métodos de recarga inducida de acuíferos se pueden realizar en los fraccionamientos urbanos ubicados en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las características geo hidrológicas de la zona poniente de la ciudad de Chihuahua
- Determinar las características específicas del desarrollo urbano de la zona
- Calcular las variables requeridas para implementar en la herramienta IGRAC(INOWAS) para recarga de acuíferos
- Obtención de la aplicabilidad de los distintos métodos de recarga inducida IGRAC (Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas)



4. Metodología

En este apartado se muestran la obtención y selección de los requerimientos para la implementación de los métodos de recarga inducida que pueden ser construidos en la zona de estudio.

Para el procesado de la información de cartografía digital contenida en los sistemas geográficos del INEGI, se hizo una recopilación de diversas cartas, así como de información de investigaciones científicas, como: artículos, libros, tesis de apoyo y páginas de confiabilidad como IGRAC e INOWAS.

La zona de estudio se eligió en base al desarrollo de la ciudad de Chihuahua, considerando la descripción del uso de suelo y crecimiento que presenta el IMPLAN. Cuya zona se encuentra en el acuífero Chihuahua Sacramento el más antiguo en la explotación para el abastecimiento de agua potable.

Se calcularon parámetros geomorfológicos y geohidrológicos requeridos para el análisis y definición de alternativas de recarga inducida al acuífero.

De acuerdo a las condiciones de disponibilidad de tipo de fuente para recarga, las condiciones geohidrológicas características del suelo, geología superficial, zona no saturada geohidrología del lugar y uso final del agua, se definieron los métodos de recarga que pudieran ser implementados mediante la interacción, selección y combinaciones de diferentes técnicas de recarga, utilizando la herramienta en el INOWAS.

Para la obtención del mapa de idoneidad, se consideraron los rasgos como la pendiente de la cuenca, geología, cobertura del suelo y el tipo de suelo y se obtuvo la configuración en la plataforma de INOWAS. Se determinan los sistemas de recarga que aplican a las condiciones del sitio y los cálculos arrojados en el modelo matemático de la plataforma INOWA, finalmente, se realiza el análisis de los resultados.

4.1. Selección del Sitio de Estudio

4.1.1. Localización

La zona de estudio está localizada en la parte Sur Oeste de la ciudad de Chihuahua, referido comúnmente como la zona poniente; la cuenca queda comprendida dentro del acuífero Chihuahua Sacramento, el parteaguas delimitado topográficamente en su mayor extensión sitúa la microcuenca sobre desarrollos habitacionales tipo fraccionamientos Monteverde, los límites de las coordenadas se ubican al norte 3164268, sur 3162311, oeste 385145 y este 389030 en su proyección UTM por sus siglas en inglés Universal Transverse Mercator perteneciente a la zona 13 como muestra la figura 6

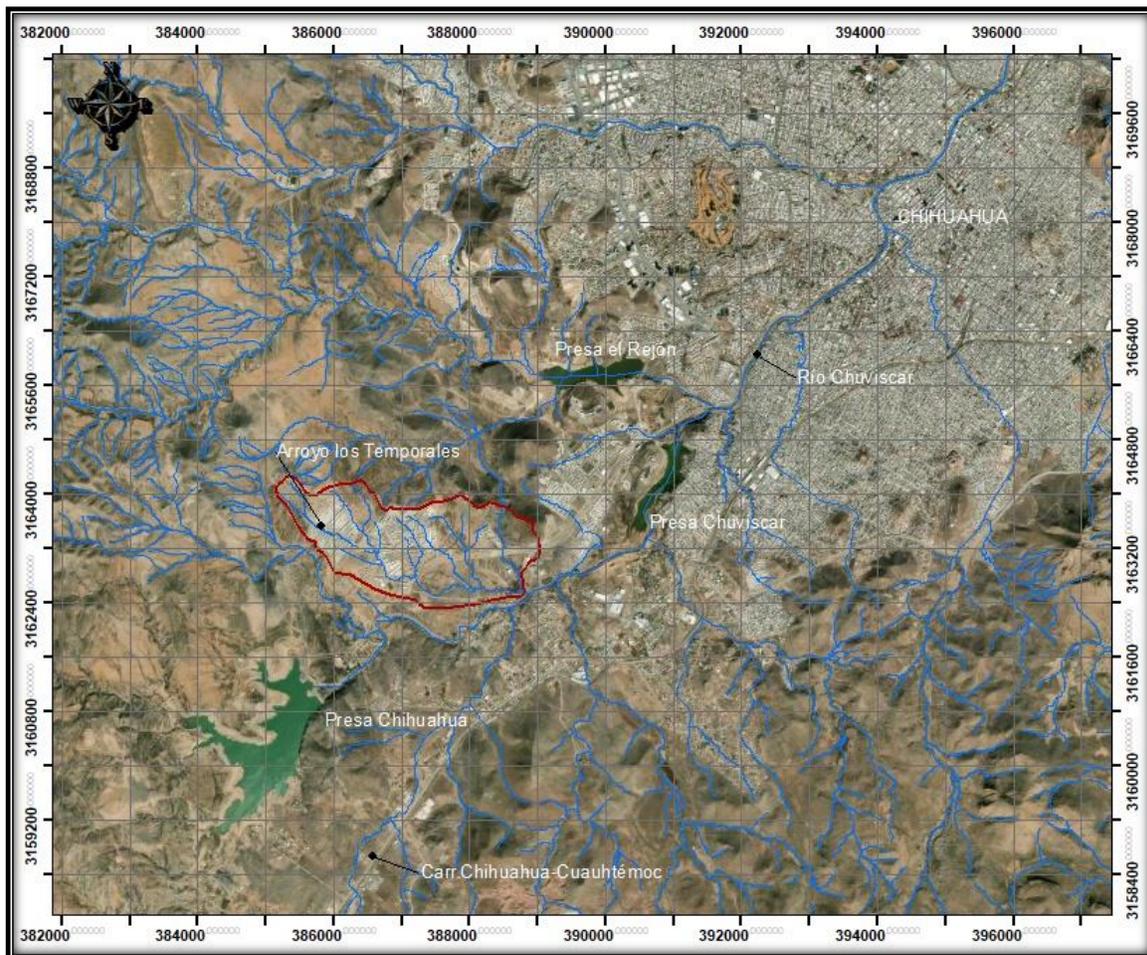


Figura 6 Localización de la microcuenca en la zona poniente de la ciudad Fuente INEGI



4.2. Características Geohidrológicas del sector

4.2.1. Geomorfología

4.2.2. Parteaguas

De acuerdo con (Aparicio, 1987), el parteaguas se define como una línea y/o un borde imaginario que en su proyección topográfica de los puntos más altos son definidos por las curvas de nivel y que estas separan el área de una cuenca hidrológica de otra.

Para la creación y configuración de las curvas topográficas, se utilizó el modelo digital de elevaciones tipo terreno con 5 metros de resolución derivado de datos sensores remotos satelitales y aerotransportados de la carta H13C66e2 ESCALA 1:10000 por fuente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. En la figura 7 se aprecia el parteaguas de la cuenca trazada con el apoyo del software ArcMap V.10.5.

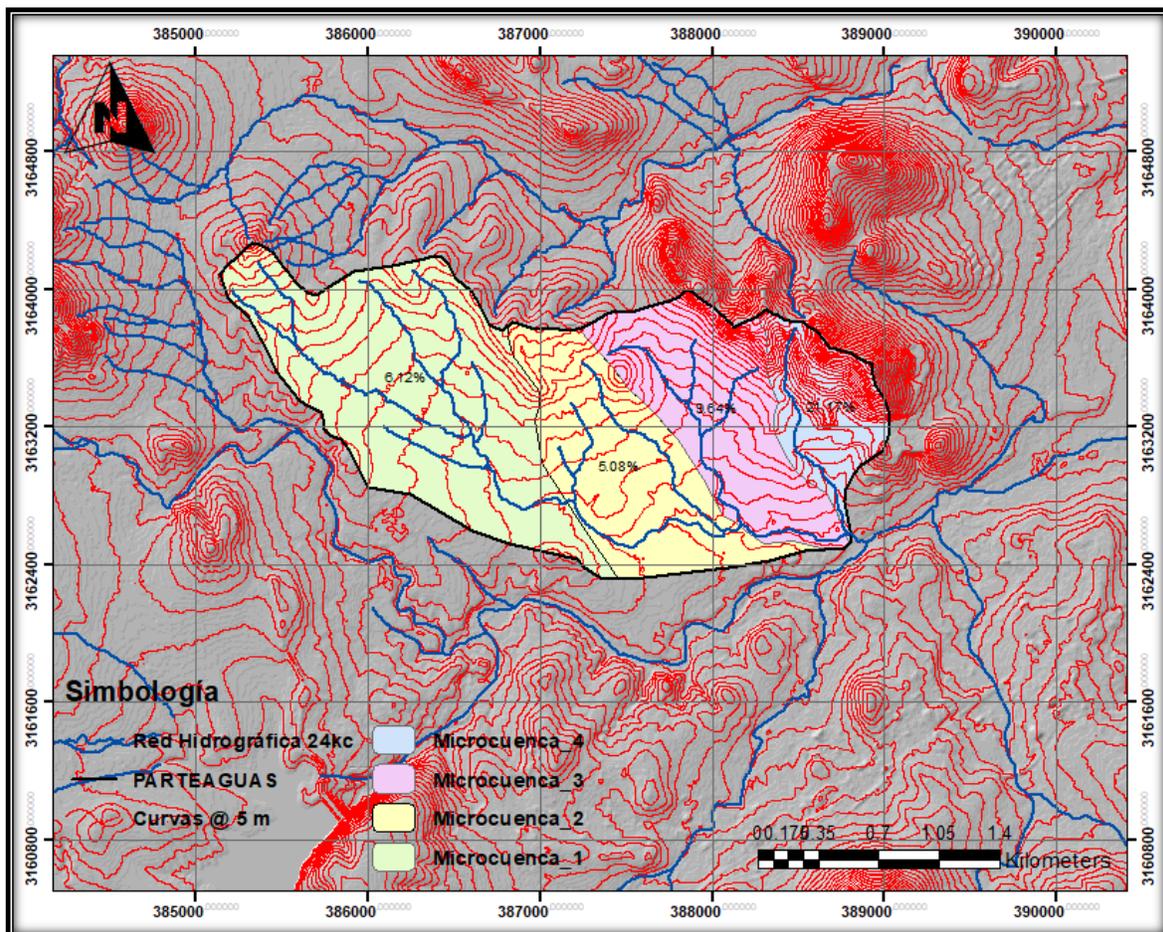


Figura 7 Trazo de Parteaguas con curvas de nivel a cada 5 m. Esc: 1:31,000 Fuente INEGI



4.2.3. Superficie

La superficie de la microcuenca es un aspecto importante a considerar para el estudio hidrológico, en este caso el área de una cuenca es contemplada mediante la zona hasta donde es delimitada por el parteaguas, comprendiendo su definición como una proyección horizontal de la superficie. (Aparicio, 1987)

4.2.4. Hidrografía

La red hidrográfica de la microcuenca trazada corresponde a la subcuenca RH24Kc, Río Chuvíscar perteneciente a la cuenca Rio Conchos y presa El Granero región Bravo Conchos, en escala 1:50,000 en su segunda edición INEGI. El comportamiento de las corrientes en sitio es de forma intermitente, una de las principales corrientes es el arroyo Los Temporales, que se conduce hacia el río Chuvíscar para desembocar en la presa Chuvíscar, este último es el cauce principal del acuífero Chihuahua sacramento.

4.2.5. Región hidrológica

Dentro de las 13 regiones hidrológico administrativas (RHA) la microcuenca de estudio se ubica en la región VI Río bravo y ubicándose en la región hidrológica 24 Bravo Conchos. (CONAGUA, 2018)

4.2.5.1. Orden de corriente

Según Horton citado en (Linsley, 1977), sugiere la clasificación de los ríos conforme al número de orden de un cauce, siendo como una magnitud de ramificaciones del río principal, de tal modo que un cauce de orden uno tiene ramificación, uno de orden dos conformado con ramificaciones de orden uno, de orden tres se forma por tributarios de orden dos y primer orden y así en lo sucesivo.



Se obtuvo que el número de orden en la cuenca es 3, que representa una aproximación a las características de superficie de terreno actuales, y en base a esto poder calcular la densidad de drenaje, se muestra en la figura 8

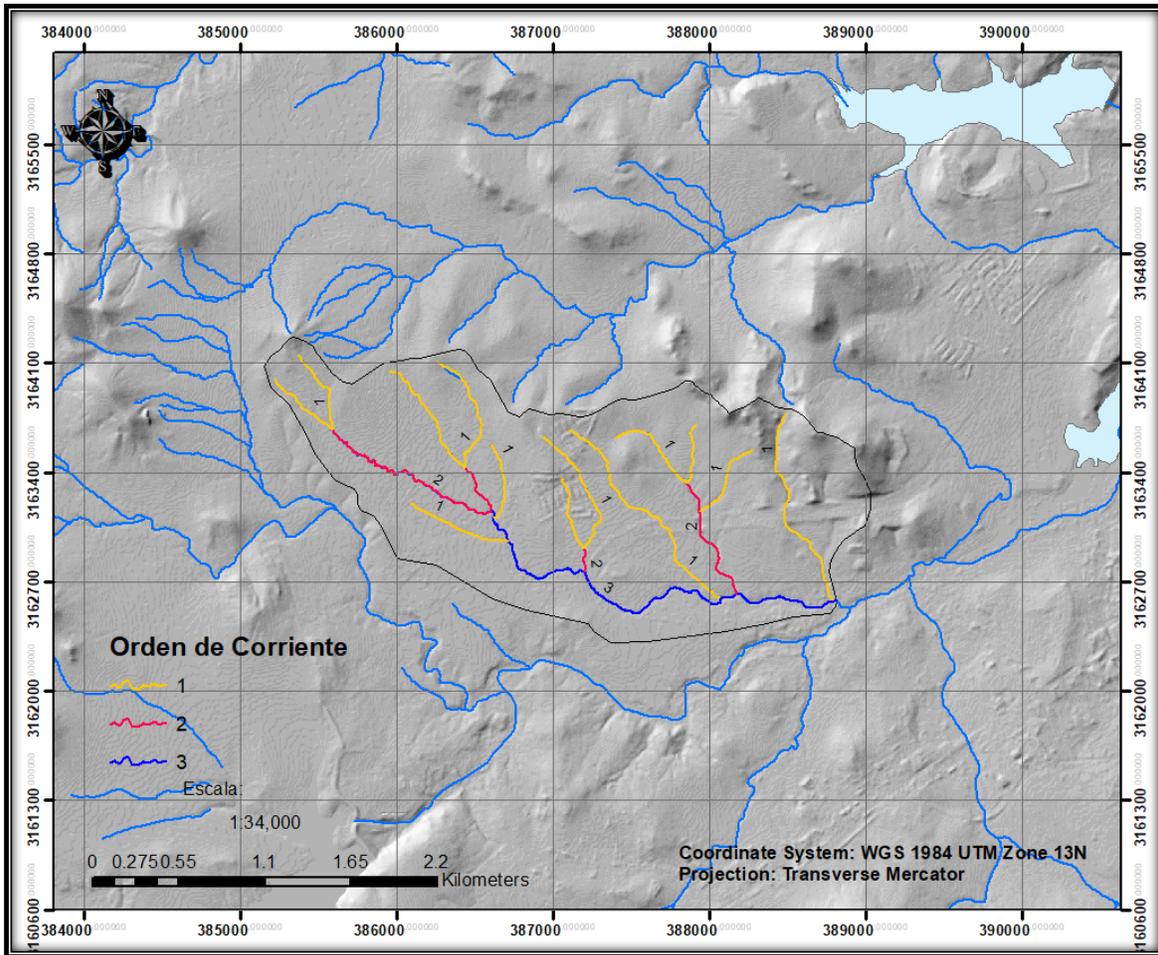


Figura 8 Definición del orden de corriente 3



4.2.5.2. Densidad de drenaje

Con este parámetro se logra valorar el desarrollo de la red hidrográfica considerando la magnitud de las densidades de drenaje con la finalidad de obtener la capacidad de respuesta a la precipitación de lluvia, de tal modo que puede evaluarse un resultado que presente mayor densidad de drenaje, el tiempo de duración del flujo de corriente será menor de acuerdo con la tabla 3, la microcuenca se clasifica en una red de drenaje que puede ir de alta a moderada. (Camino, 2018)

Tabla 3 Clase de rangos de densidad de drenaje según (Camino, 2018)

Fuentes Junco (2004)		Delgadillo Y Páez (2008)	
Rangos km/km ²	Clase	Rangos km/km ²	Clase
0.1-1.8	Baja	<1	Baja
1.9-3.6	Moderada	1-2	Moderada
3.7-5.6	Alta	2-3	Alta
		>3	Muy Alta

Tabla 4 Cálculo de la densidad de drenaje de la microcuenca poniente

Orden	No.de Drenajes	Longitud (km)	Área (Km ²)	Dd
1	13	10.052	4.5899	3.4136
2	5	2.732		
3	7	2.882		
	25	15.160		

La tabla 4 presenta los resultados de la densidad de drenaje de la zona de estudio, Considerándose en una clase que oscila de moderada a alta según los rangos.



4.2.6. Pendiente del cauce Principal

De acuerdo con (Campos Aranda D. , 1992), hace mención que es un parámetro importante en cuanto a la reacción hidrológica se refiere, debido a que, en un cauce corto los efectos de la lluvia se hacen notar más rápido con respecto a uno largo.

La figura 9 muestra la pendiente suavizada trabajada por el método de Taylor y Schwarz. (Campos Aranda, 2010)

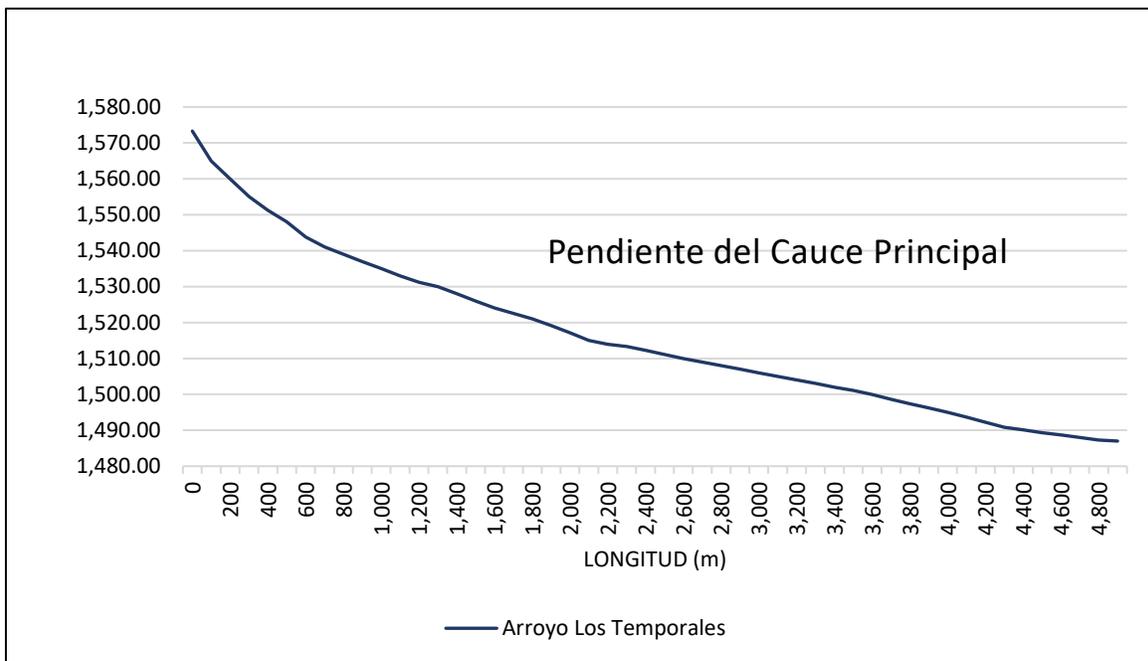


Figura 9 Gráfico de la Pendiente suavizada del cauce principal

Como auxiliar para el trazo de la pendiente, se utilizó ArcMap en su versión 10.5 que se muestra en la figura 10, para la interpolación de datos para su configuración, con la finalidad de obtener la pendiente en porcentaje por el método de Taylor and Schwarz a través de longitud constante.

El cálculo de la pendiente de la tabla 5, fue realizado por el método de Taylor y Schwarz, el cual describe que, para la pendiente media, el comportamiento es similar a la de un canal contemplando la sección transversal uniforme y que pueda ser dividido en tramos



de igual longitud (Campos Aranda, 2010) en la figura 9 se muestran la pendiente en secciones en intervalos de 100 metros.

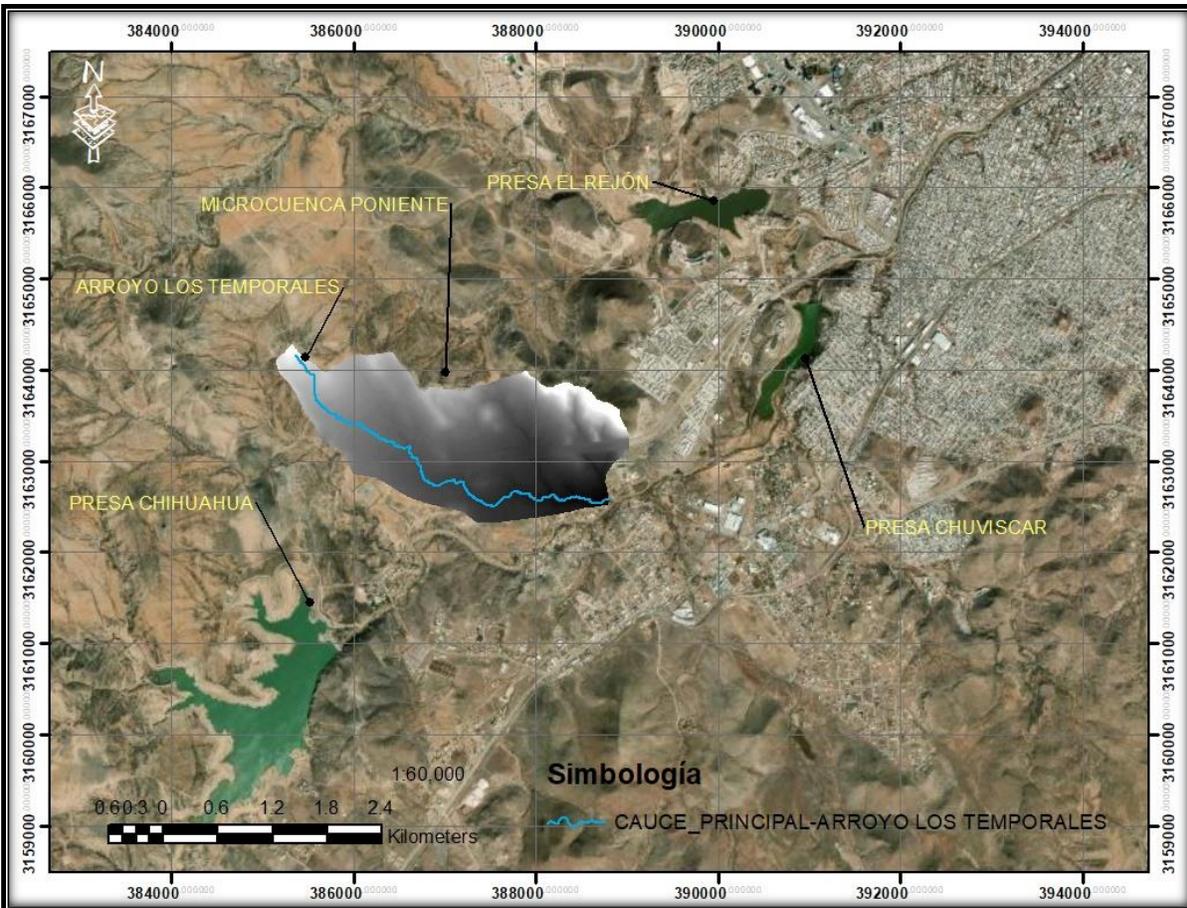


Figura 10 Trazo del Cauce principal

La fórmula de Taylor Schwarz es la siguiente:

$$S_c = \left(\frac{m}{1/\sqrt{S_1} + 1/\sqrt{S_2} + 1/\sqrt{S_3} + \dots + 1/\sqrt{S_m}} \right)^2$$

Donde:

S = pendiente media

m = número de tramos

S_i = pendiente del tramo

L_i = longitud del tramo

L = longitud del cauce principal



Tabla 5 Cálculo de la pendiente del cauce principal por método de longitud constante Taylor y Schwarz (*Campos Aranda, 2010*)

Long. (m)	L AC. (m)	CURVAS DE NIVEL		ΔH (m)	ΔH AC. (m)	S	$1/(S^{0.5})$
0	0	1,573.3	1,573.28	0.00	85.97	0.0000	0.000
100	100	1,573.3	1,564.98	8.30	77.67	0.0830	3.472
100	200	1,565.0	1,560.01	4.97	72.70	0.0497	4.484
100	300	1,560.0	1,555.00	5.01	67.69	0.0501	4.468
100	400	1,555.0	1,551.24	3.76	63.93	0.0376	5.156
100	500	1,551.2	1,548.00	3.24	60.69	0.0324	5.556
100	600	1,548.0	1,543.79	4.21	56.48	0.0421	4.875
100	700	1,543.8	1,541.01	2.79	53.69	0.0279	5.991
100	800	1,541.0	1,539.00	2.00	51.69	0.0200	7.062
100	900	1,539.0	1,536.98	2.02	49.67	0.0202	7.042
100	1,000	1,537.0	1,535.00	1.98	47.69	0.0198	7.100
100	1,100	1,535.0	1,533.01	1.99	45.69	0.0199	7.082
100	1,200	1,533.0	1,531.22	1.79	43.90	0.0179	7.477
100	1,300	1,531.2	1,530.00	1.22	42.69	0.0122	9.062
100	1,400	1,530.0	1,528.06	1.94	40.74	0.0194	7.171
100	1,500	1,528.1	1,526.00	2.05	38.69	0.0205	6.979
100	1,600	1,526.0	1,524.03	1.97	36.72	0.0197	7.125
100	1,700	1,524.0	1,522.52	1.51	35.21	0.0151	8.126
100	1,800	1,522.5	1,521.01	1.51	33.70	0.0151	8.144
100	1,900	1,521.0	1,519.18	1.83	31.87	0.0183	7.399
100	2,000	1,519.2	1,517.12	2.06	29.81	0.0206	6.963
100	2,100	1,517.1	1,515.04	2.08	27.73	0.0208	6.933
100	2,200	1,515.0	1,513.94	1.10	26.63	0.0110	9.549
100	2,300	1,513.9	1,513.29	0.66	25.97	0.0066	12.337
100	2,400	1,513.3	1,512.26	1.02	24.95	0.0103	9.859
100	2,500	1,512.3	1,511.13	1.13	23.81	0.0113	9.405
100	2,600	1,511.1	1,510.00	1.13	22.69	0.0113	9.418
100	2,700	1,510.0	1,509.00	1.00	21.69	0.0100	10.000
100	2,800	1,509.0	1,508.00	1.00	20.69	0.0100	10.000
100	2,900	1,508.0	1,507.00	1.00	19.69	0.0100	10.000
100	3,000	1,507.0	1,506.00	1.00	18.69	0.0100	10.018
100	3,100	1,506.0	1,505.01	1.00	17.69	0.0100	10.011
100	3,200	1,505.0	1,504.00	1.00	16.69	0.0100	9.995
100	3,300	1,504.0	1,503.00	1.00	15.69	0.0100	9.999
100	3,400	1,503.0	1,502.00	1.00	14.69	0.0100	9.977
100	3,500	1,502.0	1,501.06	0.94	13.75	0.0094	10.308
100	3,600	1,501.1	1,499.99	1.07	12.67	0.0107	9.650
100	3,700	1,500.0	1,498.62	1.36	11.31	0.0136	8.568
100	3,800	1,498.6	1,497.37	1.25	10.06	0.0125	8.933
100	3,900	1,497.4	1,496.21	1.16	8.90	0.0116	9.299
100	4,000	1,496.2	1,495.00	1.21	7.69	0.0121	9.086
100	4,100	1,495.0	1,493.64	1.36	6.33	0.0136	8.578
100	4,200	1,493.6	1,492.28	1.36	4.97	0.0136	8.568
100	4,300	1,492.3	1,490.84	1.44	3.53	0.0144	8.336
100	4,400	1,490.8	1,490.11	0.74	2.79	0.0074	11.658
100	4,500	1,490.1	1,489.30	0.80	1.99	0.0080	11.164
100	4,600	1,489.3	1,488.67	0.63	1.36	0.0063	12.569
100	4,700	1,488.7	1,488.01	0.66	0.70	0.0066	12.336
100	4,800	1,488.0	1,487.31	0.70	0.00	0.0070	11.949
9.0	4809	1,487.3	1487	0.31	0.00	0.0347	5.364
							414.60



Se obtuvo la pendiente del cauce principal por el método de longitud constante en la tabla 5 de 0.01454.

4.2.7. Pendiente de la Cuenca

Es un parámetro a considerar importante en este estudio, ya que puede existir una relación con la escorrentía superficial, con la infiltración, humedad del suelo y con la aportación del agua subterránea. (Villon Béjar, 2002)

De acuerdo con (Bonilla et al, 2016), en una pendiente demasiado inclinada difícilmente se puede implementar algún tipo de obra de recarga por medio de infiltración, no obstante, para una pendiente de menor pronunciación es factible que se pueda presentar una recarga de acuífero, debido a que surge una estabilidad del flujo superficial o bien surge una disminución de la velocidad del agua lo cual es propicio para que se pueda infiltrar el agua.

Para este fin la microcuenca se subdividió en 4 secciones y se realizó el cálculo de la pendiente media por el método de Alvord en la tabla 6. (Villon Béjar, 2002)

$$Sc = \frac{D * (\sum L)}{A}$$

D= desnivel entre curvas

$\sum L$ = sumatoria de longitud de curvas

Sc= pendiente media de la cuenca

Los resultados de la tabla 6, muestran por subcuenca, la pendiente media (Sc) de las subcuencas con valores reflejados de acuerdo con el relieve que se presenta en cada superficie.



Tabla 6 Cálculo de la pendiente por microcuencas por método de Alvord (Villon Béjar, 2002)

	Mc1	Mc2	Mc3	Mc4	Cuenca Gral.
Área km ²	1.972	1.082	1.013	0.517	4.586
D	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
ΣL	24.14	10.99	19.54	21.92	76.60
Sc	6.12	5.08	9.64	21.17	8.35

En la figura 11 se muestra el porcentaje de la pendiente de la microcuenca que oscila entre valores de 4.97 a 12.78

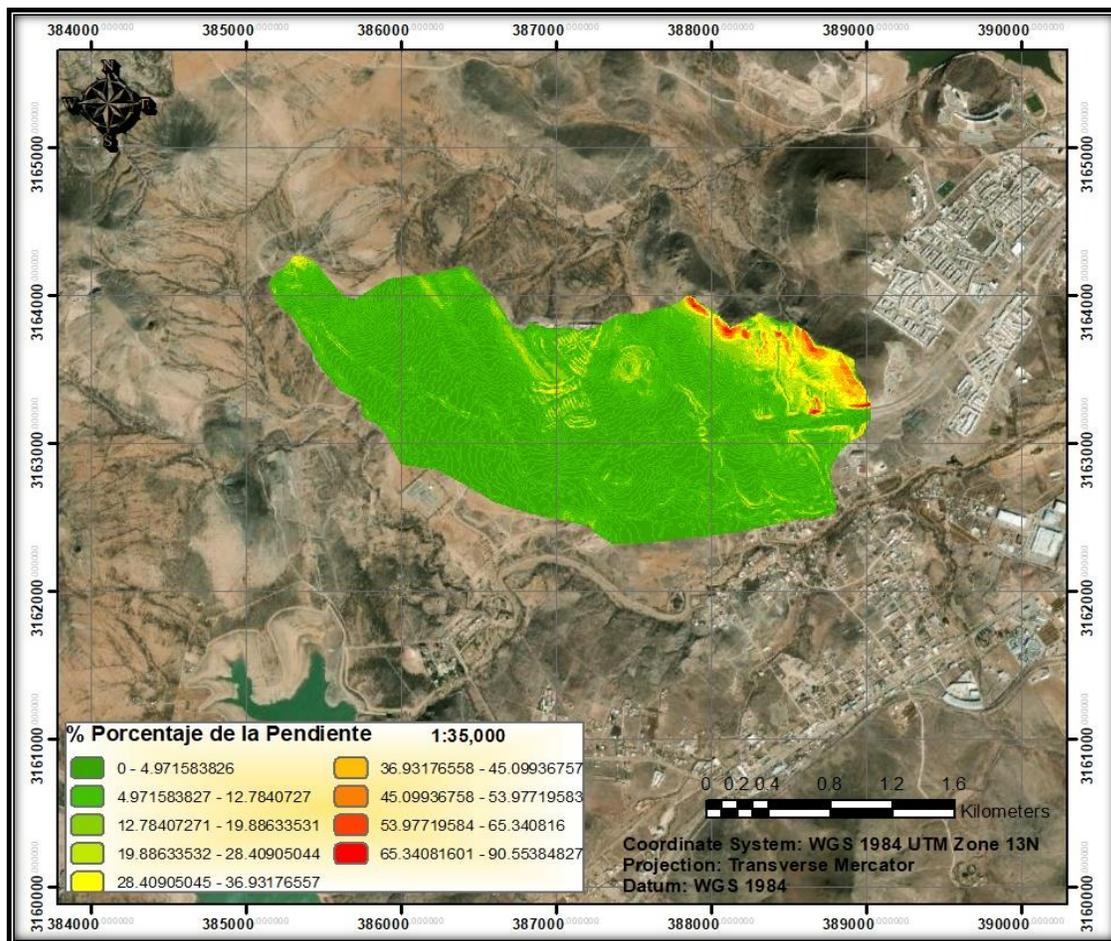


Figura 11 Configuración e interpolación de la pendiente de la microcuenca fuente ArcMap vr 10.5

En la tabla 7 se muestra el resultado de la pendiente de la cuenca.



Tabla 7 Calculo de la pendiente de la microcuenca por ArcMap Vs 10.5

OBJECTID	ID	COUNT	ÁREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	0	182176	4554400	0	90.553	90.553	8.687	9.441	1582710.872

Por medio de ArcMap se trazó la pendiente media de la cuenca y se obtuvo un resultado muy aproximado al cálculo realizado por el método Alvord, estos datos digitales han sido considerados para utilizarlos en la plataforma de INOWAS. El valor de la pendiente media de la cuenca en porcentaje es de 8.68.

En esta gráfica de la figura 12 se observan los valores entre los que oscila el porcentaje de la pendiente de la microcuenca.

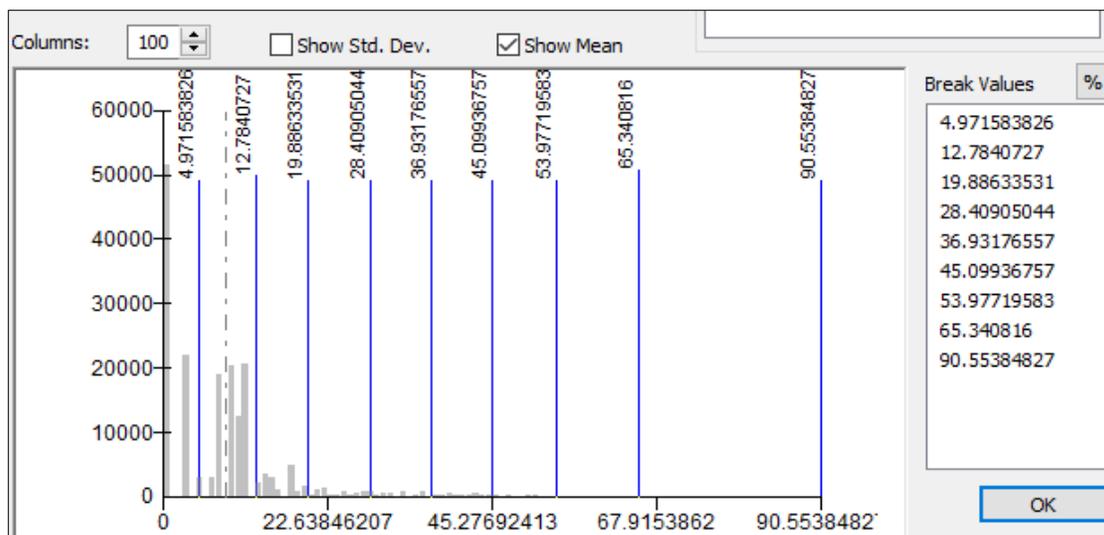


Figura 12 Gráfico de valores de la pendiente media de la microcuenca ArcMap Vs10.5

4.2.8. Climatología

Las regiones áridas y semiáridas tienden a ser zonas en las cuales, la precipitación es baja y en donde suelen presentarse temperaturas extremas, que ocasionan tasas elevadas



de evapotranspiración, por ende, limitados volúmenes de recarga de agua subterránea, que dan una disponibilidad de agua relativamente baja o nula. (Henaó et al, 2021)

El clima árido juega un papel importante en la recarga, debido a que los escurrimientos de las aguas pluviales tienen la posibilidad de reducir el volumen, pues puede perderse por la evaporación ocurrida, aunque la infiltración no siempre produce recarga, por ser un factor el clima, la evaporación suele suscitar a que se produzca menos infiltración y por ende una limitada recarga directa. (Peter and Clark, 1997)

Las condiciones de estaciones climáticas en la ciudad de Chihuahua son bien diferenciadas, se presenta la época de lluvia de junio a septiembre en la figura 13, acontece que en el resto de los meses ocurre poco o nulas veces, lo mismo sucede con la temperatura la cual acontece desde el mes de mayo a septiembre resultando el intervalo de tiempo con más calor.

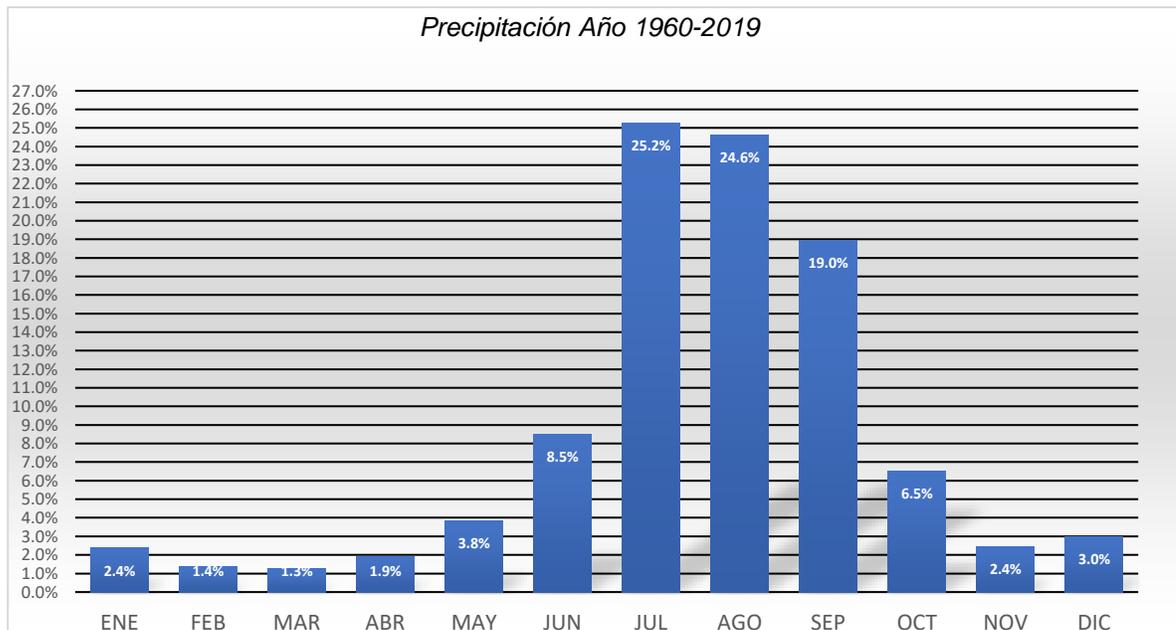


Figura 13 Porcentaje de precipitación mensual histórico

En la ciudad de Chihuahua existe la estación meteorológica del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) denominada Observatorio con identificación 8040, por lo cual se ha dispuesto de los datos de temperatura y precipitación para realizar cálculos de



escurrimientos y evapotranspiración. En el histórico de 1960 al 2019 de temperatura se puede observar la temperatura máxima media anual, así como la mínima, registrando valores que oscilan de 5.9 °C a 29.5°C

Considerando el acuífero Chihuahua Sacramento, de acuerdo con la actualización de la disponibilidad media anual de agua, según la clasificación Köppen presenta 3 tipos de clima; árido (BSokw), en el cual la temperatura oscila de 12° C a 18° C al igual que el semiárido (BS₁kw), este presentando en clima frio de -3° C a 18° C y semiseco (BS₁k'' w); de forma general predomina el clima árido con tendencia a ser extremo. (CONAGUA, 2020)

En la gráfica de la figura 14 se puede observar la línea de tendencia, en la cual se puede ver de forma ascendente conforme el tiempo.

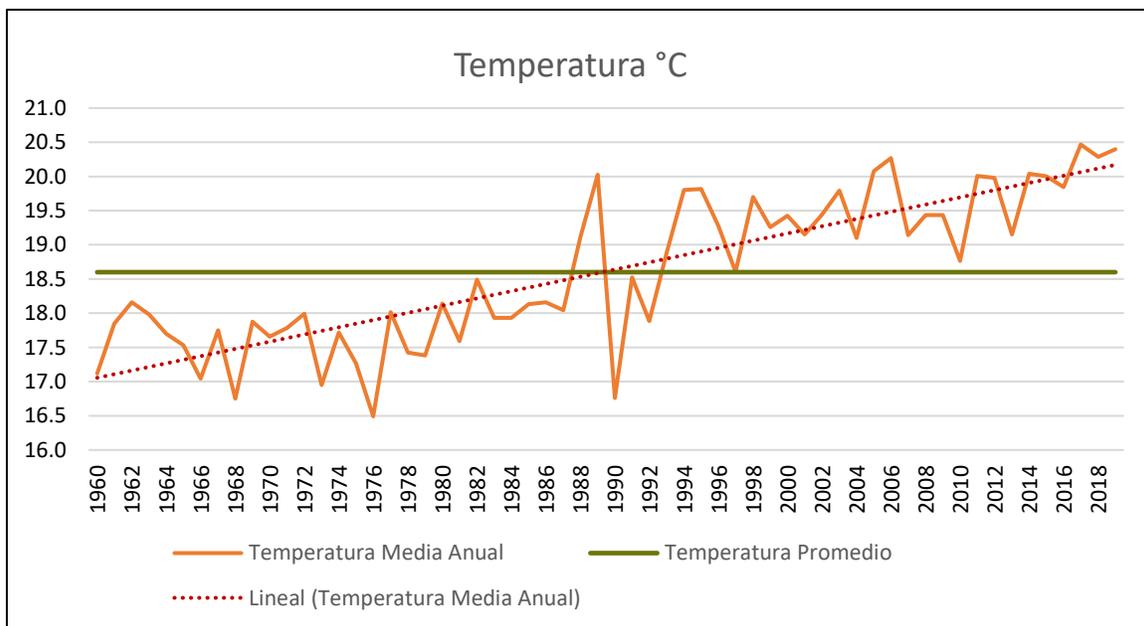


Figura 14 Serie de tiempo de la temperatura media Anual



4.2.8.1. Precipitación promedio de la cuenca

Como fuente de obtención de datos históricos de precipitación media de la microcuenca se utilizó, la estación climatológica del municipio de Chihuahua Observatorio 8040 contemplando información histórica desde el año 1960 al 2019, con estos datos se obtiene una precipitación media anual de 415 mm; presentando el año más lluvioso en 1986 con 714 mm y con menor cantidad de lluvia en 1994 con 171 mm y en el año 2011 con 190 mm que se muestra en la figura 15.

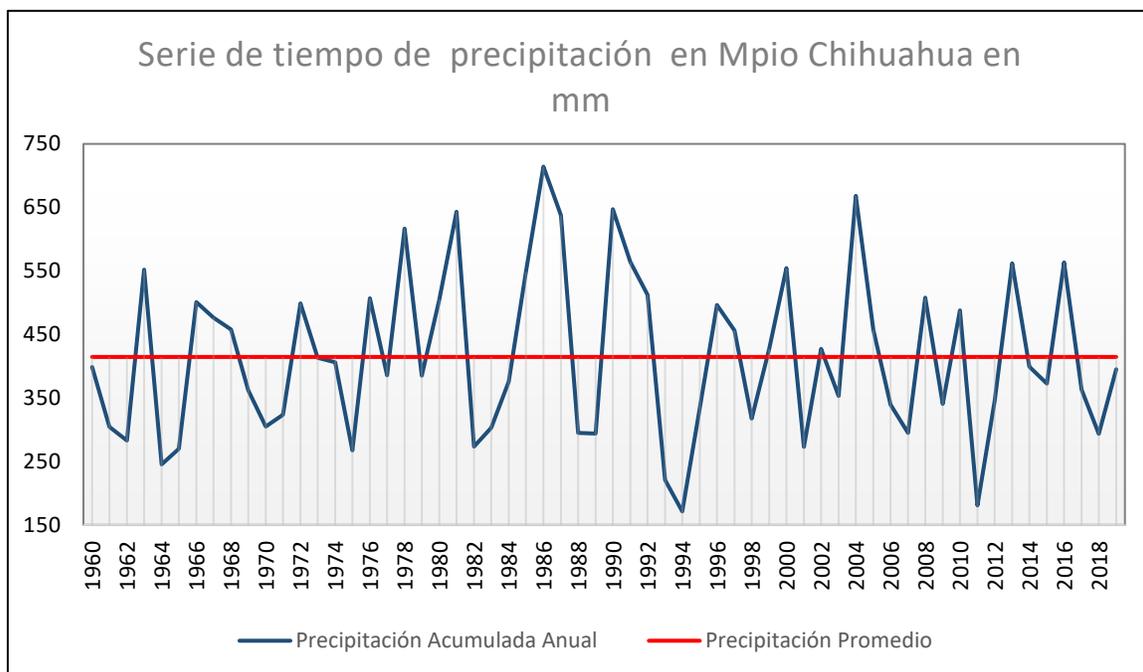


Figura 15 Serie de tiempo de la precipitación media anual, fuente de datos CONAGUA

4.2.9. Uso de Suelo y Vegetación

Para la proyección en la superficie de la microcuenca acerca del uso de suelo y vegetación se utilizó la carta topográfica en conjunto de datos vectoriales Uso del Suelo y Vegetación serie VI en escala 1:250,000 por fuente del INEGI

De igual forma la microcuenca fue subdividida en 4 microcuencas para la descripción del uso de suelo y la vegetación contenida en cada una, presentando los



siguientes usos generales como urbano construido, agricultura de temporal anual, bosque de galería y también se presenta en la zona el tipo de vegetación matorral desértico micrófilo que se muestra en la figura 16.

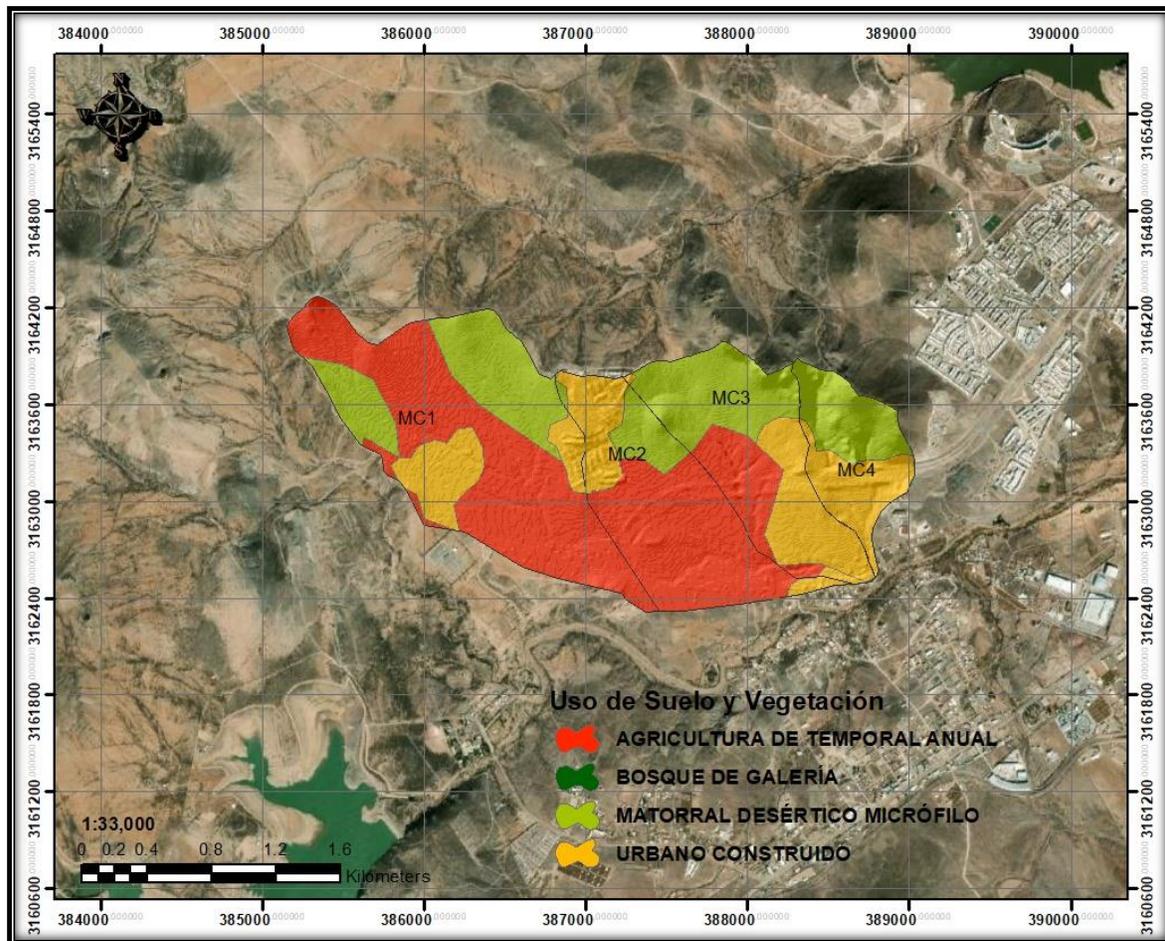


Figura 16 Uso de suelo y vegetación serie VI por fuente de INEGI

4.2.10. Bosque de Galería

Este tipo de sistema predominan en zonas áridas y semiáridas del país, su composición arbórea presenta alturas entre 4 y 40 metros, el bosque de galería comúnmente



está formado por sauces en su nombre técnico *Salix spp*, Fresnos *Fraxinus spp*, Álamos *Populus spp* entre otras especies.

4.2.11. Matorral desértico micrófilo

Es común la presencia de este tipo de vegetación en el estado de Chihuahua por ser zona árida y/o seco, siendo los matorrales *Larrea tridentata* con mayor predominancia y *Flourensia cernua*, desarrollándose sobre llanuras y partes bajas de abanicos aluviales.

En lo que cabe a considerar de lo que es la vegetación y uso de suelo, es importante tomar en cuenta los parámetros para realizar los cálculos correspondientes para determinar los escurrimientos producidos en cada microcuenca, y que estos intervienen según la cobertura del suelo y vegetal. En la tabla 8 se calculó el área por microcuenca por medio de herramientas de ArcMap Vs 10.5.

Tabla 8 Área por cobertura de suelo y vegetación de cada microcuenca, Serie VI INEGI

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	ÁREA Km ²
MC1	1.97
URBANO CONSTRUIDO	
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	
MC2	1.08
URBANO CONSTRUIDO	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	
MC3	1.01
URBANO CONSTRUIDO	
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	
BOSQUE DE GALERÍA	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	
MC4	0.51
URBANO CONSTRUIDO	
BOSQUE DE GALERIA	
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	



4.2.12. Uso de suelo según IMPLAN

El plan de desarrollo urbano de la ciudad de Chihuahua visión 2040 que se muestra en la figura 17, presenta de forma ilustrativa la proyección a futuro del crecimiento de la ciudad, en el cual se puede observar las transformaciones y evoluciones que se van dando de forma gradual y que estas apuntan hacia ciertas direcciones de la mancha urbana; siendo objeto para este estudio la zona poniente, por tener una reserva de crecimiento urbano enfocado principalmente a desarrollos habitacionales, motivo por el cual propicia la oportunidad de ser elegible para la implementación de algún tipo de técnica MAR.

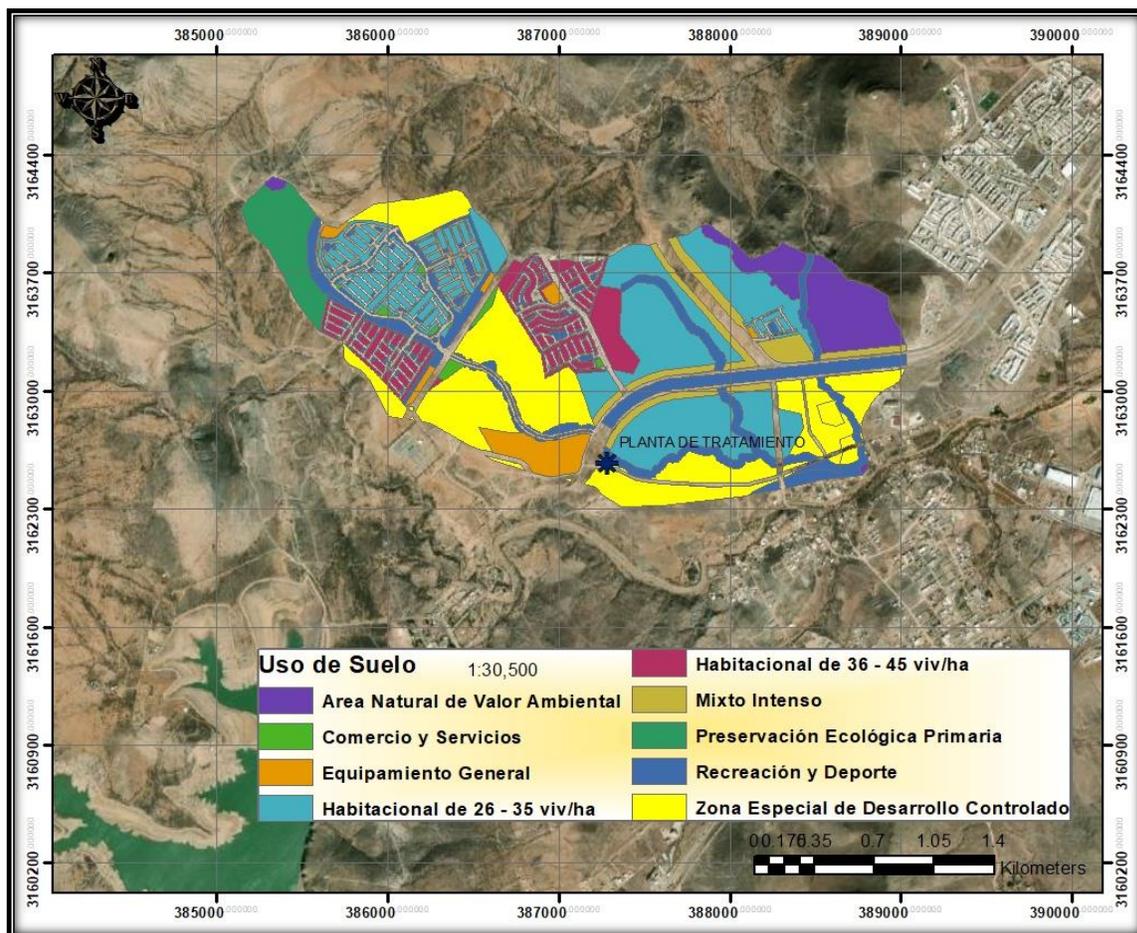


Figura 17 Uso de suelo por fuente de IMPLAN



La tabla 9 presenta los cálculos referentes a las áreas y usos del IMPLAN obteniendo coeficientes de escurrimiento.

Tabla 9 Cálculo del coeficiente de escurrimiento del uso de suelo por el IMPLAN

Uso de suelo IMPLAN PDU2040	Descripción de la Zona	Área km2	%	Ponderación	C	Ce
<i>Área Natural de Valor Ambiental</i>	Preservación Ecológica	0.3096	6.75%	0.0675	0.49	0.0331
<i>Comercio y Servicios</i>	Área Urbana de la Cd. de Chihuahua	0.0270	0.59%	0.0059	0.884	0.0052
<i>Equipamiento General</i>	Reserva de Crecimiento Urbano	0.1390	3.03%	0.0303	0.65	0.0197
<i>Habitacional de 26 - 35 viv/ha</i>	Área Urbana de la Cd. de Chihuahua	1.0820	23.59%	0.2359	0.7	0.1651
<i>Habitacional de 36 - 45 viv/ha</i>	Área Urbana de la Cd. de Chihuahua	0.3355	7.31%	0.0731	0.7	0.0512
<i>Mixto Intenso</i>	Reserva de Crecimiento Urbano	0.2092	4.56%	0.0456	0.45	0.0205
<i>Preservación Ecológica Primaria</i>	Preservación Ecológica Primaria	0.1936	4.22%	0.0422	0.49	0.0207
<i>Recreación y Deporte</i>	Reserva de Crecimiento Urbano	0.5863	12.78%	0.1278	0.48	0.0614
<i>Zona Especial de Desarrollo Controlado</i>	Reserva de Crecimiento Urbano	1.0050	21.91%	0.2191	0.7	0.1534
<i>Calles</i>	Vialidades	0.6994	15.25%	0.1525	0.91	0.1388
	TOTAL	4.586				0.6690

4.2.13. Edafología

La zona de estudio fue trabajada con datos edafológicos en su información que refieren características y tipo de suelo, en conjunto de datos vectoriales de Edafología Serie II en su escala 1:250,000 a través de INEGI. La microcuena trazada presenta tres tipos de suelo como son; Luvisoles, Leptosoles y Cambisoles como se muestra en la figura 18 que a continuación se describen.

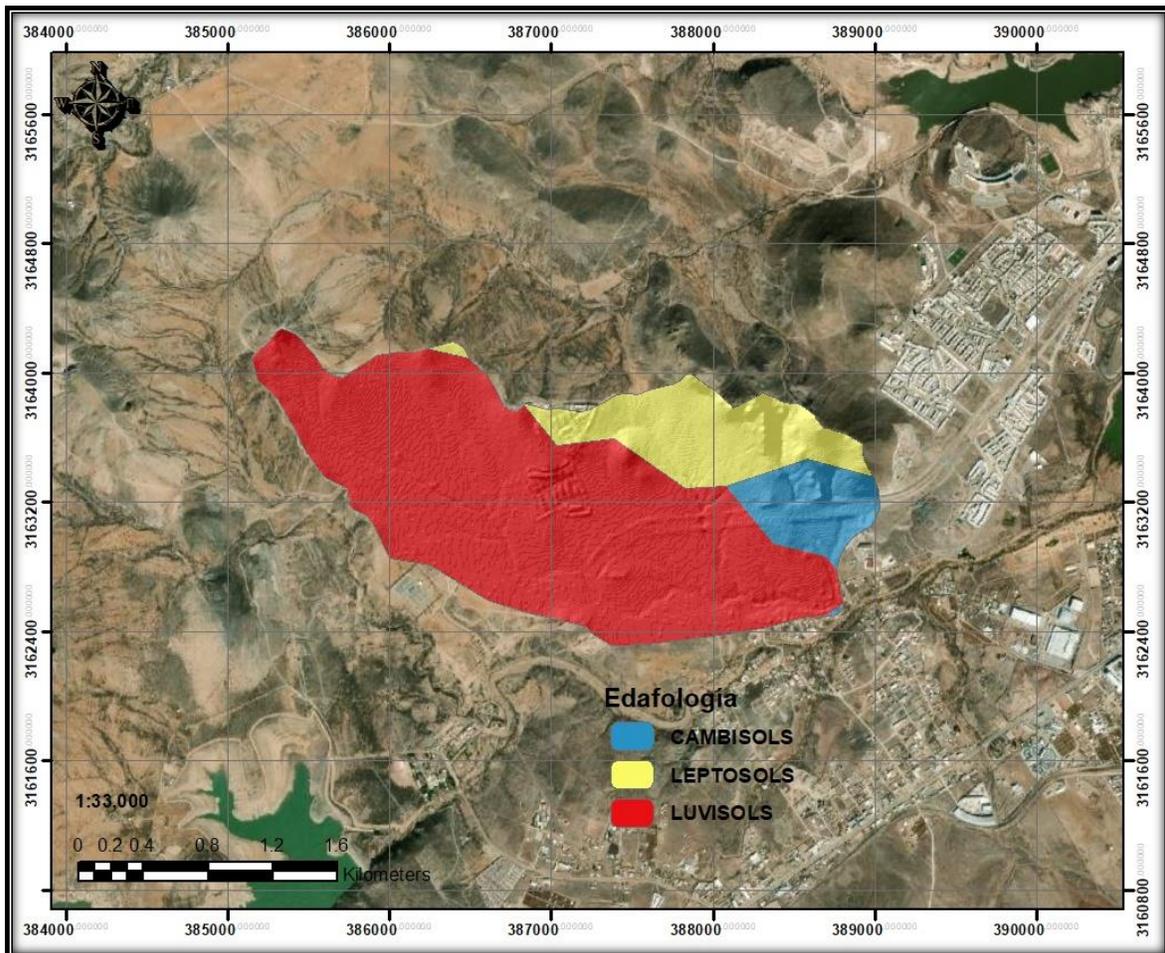


Figura 18 Edafología de la microcuenca por fuente de INEGI

Cambisols. - Suelos que han sufrido cambios en su tonalidad de color, estructura y consistencia, son materiales de composición mediana y fina, provenientes de una gran variedad de rocas, se desarrollan en la mayoría de los climas, en planicies o relieves montañosos de forma común, han sido sometidos a procesos que provocan su alteración, así como son susceptibles a la erosión y son propicios para tierras agrícolas. (FAO, 2016)

Luvisols. - Son suelos principalmente arcillosos de forma subsuperficial y/o horizonte medio en tonalidad rojo grisáceo que son frecuentes en zonas áridas. La profundidad de este tipo oscila de 50 a 100 cm, desarrollándose comúnmente en un medio



ambiente de planicies o en superficies ligeramente con pendiente pronunciada, asociados con materiales aluviales, eólicos y coluviales presentes en climas secos y húmedos. (FAO, 2016)

Leptosoles. - Son suelos de rocas calizas que proceden de Rendizinas y Rankers, por su significado del griego leptos que significa suelos delgados, muy aproximados a la superficie con exceso de pedregosidad; también se encuentra en todos los climas, se presentan en zonas específicamente que se han sometido a un fuerte proceso de erosión, en superficies topográficamente de altitud elevada a mediana, por ende, con una pendiente de mayor inclinación. (FAO, 2016)

4.2.13.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración de acuerdo a diversos factores tiene diferente comportamiento, de los cuales se puede distinguir el clima, la temperatura, humedad en el suelo, vegetación, y el que tiene mayor influencia en climas áridos y semiáridos es la precipitación; esto debido, que en zonas secas la transpiración es afectada por motivo del estrés hídrico en la flora (Flores et al, 2012); logrando acabar con las plantas, por consecuencia, resulta mayor la pérdida de evaporación que la absorción del agua en las raíces, esto a causa de una demanda mayor de evaporación atmosférica y poca concentración de humedad en el suelo. (Hidalgo et al, 2020)

Para el cálculo de la evapotranspiración el método empleado es el de Turc por implicar la temperatura; fueron considerados los meses más lluviosos de julio a septiembre conforme al histórico de 1960 al 2019.

4.2.14. Escorrentía superficial

Es un rasgo importante a considerar en el área de estudio, como bien se ha observado y detectado en el sitio solo existen ríos efímeros, es decir corrientes de flujo de agua superficial que solo se presentan en tiempos de lluvia y fuera de esto, totalmente



secos, en lo posible, por medio de la infiltración de un cauce con características de suelo permeable son índices de que este se mantenga seco. (Vide, 2003)

Para fines de conocimiento se realizó el cálculo de escurrimientos procedentes de la microcuenca trazada, tomando en cuenta los datos de precipitación de la estación observatorio de Chihuahua, el parámetro de k que está en función del tipo y uso de suelo, y N que es el número de curva conforme a la cobertura del uso de suelo; se ha tomado en cuenta el porcentaje de precipitación de los meses más lluviosos con datos históricos de 60 años observados en la figura 13.

Para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural, en la tabla 10 se consideró en parte el método del coeficiente de escurrimiento, dicho procedimiento está establecido en la norma oficial mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015), que establece las especificaciones y proceso para la obtención de la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; de igual forma fueron contemplados los parámetros mencionados anteriormente.

Tabla 10 Cálculo del volumen de escurrimientos por microcuenca

Año 1960-2019	Ppt (mm) mes	N	K	Pe (cm)	Ce	V(mm)	V(Hm ³)
MC1	Junio	86.813	0.2745	17.724	0.054	2192	0.00433
MC1	Julio	86.813	0.2745	69.801	0.063	7.037	0.01388
MC1	Agosto	86.813	0.2745	68.183	0.063	6.773	0.01336
MC1	Septiembre	86.813	0.2745	51.575	0.060	5.314	0.01048
MC2	Junio	86.7788	0.2752	17.696	0.054	2188	0.002369
MC2	Julio	86.7788	0.2752	69.731	0.063	7.023	0.008
MC2	Agosto	86.7788	0.2752	68.110	0.063	6.759	0.007
MC2	Septiembre	86.77880	0.2752	51.517	0.060	5.304	0.006
MC3	Junio	74.53759	0.2809	10.284	0.057	2.309	0.002
MC3	Julio	74.53759	0.2809	47.848	0.066	7.380	0.007
MC3	Agosto	74.53759	0.2809	45.480	0.066	7.108	0.007
MC3	Septiembre	74.53759	0.2809	33.987	0.063	5.579	0.005
MC4	Junio	74.90681	0.2847	10.442	0.059	2.391	0.001
MC4	Julio	74.90681	0.2847	48.433	0.069	7.621	0.004
MC4	Agosto	74.90681	0.2847	46.084	0.069	7.345	0.004
MC4	Septiembre	74.90681	0.2847	34.440	0.066	5.766	0.003



En la tabla 10 se puede observar que los meses con mayor volumen de escurrimiento se presentan en julio y agosto procedido por septiembre y con menor valor es junio. Así también se puede visualizar que conforme a la pendiente de cada microcuenca visto en la tabla 6 la de mayor inclinación produce más volumen que la de menor.

4.2.15. Caudal

En la escorrentía superficial existe una variante muy importante a considerar de acuerdo con (Linsley, 1977) citado en (Bonilla, 2018) es una de las medidas con mayor precisión debido a que el agua se presenta con mayor concentración; de igual forma la escorrentía suele ser afectada por factores del tipo clima, geografía del sitio, y la intervención de las actividades del ser humano.

Para efectos de la recarga artificial, se calculó el caudal máximo de la microcuenca de estudio, con la finalidad de obtener, como dato estimado, el volumen con el que se puede contar en condiciones de intensidad de lluvia con duraciones de 24 horas, en los cuales estos se presentan en los meses más lluviosos, en base al histórico de precipitación. No obstante, también puede ser considerado para diseño de obras hidráulicas.

Por medio de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se obtuvo un histórico de precipitación máxima de veinticuatro horas y de una hora para la ciudad de Chihuahua, los datos se presentan en la tabla 11



Tabla 11 Precipitación máxima por hora y 24 horas, histórico del 1983 al 2019

Año	PPT Max 24 hr	PPT Max 1 hr	Año	PPT Max 24 hr	PPT Max 1 hr
1983	34	18	2001	63.2	38
1984	23	12.8	2002	43.6	31
1985	55.3	25	2003	62.5	23
1986	57.6	37	2004	91.5	65
1987	48	35.2	2005	62.1	29
1988	36	24	2006	27	21
1989	56	51.7	2007	29.6	11.5
1990	70.5	32.6	2008	47.5	39.5
1991	42.2	16.1	2009	26.7	15
1992	46	22	2010	60	43.2
1993	28.2	13	2011	38.8	32
1994	46.7	28.2	2012	64.7	37.8
1995	112.9	22.1	2013	92	18.5
1996	57.7	49	2014	50.5	31
1997	33	17.3	2015	35	17.1
1998	27.1	18.8	2016	56.4	26.2
1999	54	15.2	2017	54.9	23.5
2000	72.6	47.4	2018	24.4	10.9
			2019	44.8	35.6

Con el fin de estimar las curvas de intensidad duración frecuencia I-D-Tr se empleó el método de Cheng Lung Chen, que contempla alturas de precipitación de 10 años o más de periodo de retorno, Chen 1983 citado en (González y Mora, 2013), al igual que el método de Bell, que fue necesario utilizarlo durante el desarrollo del proceso.

Mediante las ecuaciones

Chen:

$$P_t^{Tr} = \frac{a.P60_{60}^{10} \cdot \log(10^{2-F} \cdot Tr^{F-1}) \cdot t}{60 \cdot (t+b)^c}$$

Donde:

P_t^{Tr} = Altura de precipitación en mm para un periodo de retorno Tr y una duración de la tormenta t .

Tr = Periodo de retorno en años



t = Duración de la tormenta en minutos

a, b, c = parámetros regionales de función del cociente lluvia duración R

P_{60}^{10} = Altura de precipitación en mm para un periodo de retorno de 10 años y una duración de sesenta minutos obtenida de la fórmula de Bell.

F = cociente lluvia periodo retorno.

Bell:

$$P_t^{Tr} = (0.35 \ln(T_r) + .076)(0.54(t)^{0.25} - 0.5)P_{60}^2$$

Con el método de Chen se calculan los parámetros regionales en función del cociente de lluvia R con las siguientes ecuaciones:

$$a = -2.297536 + 100.0389 * R - 432.5438 * R^2 + 1256.228 * R^3 - 1028.902 * R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 * R - 341.4349 * R^2 + 757.9172 * R^3 - 598.7461 * R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 * R - 16.08111 * R^2 + 29.09596 * R^3 - 20.06288 * R^4$$

Como auxiliar para analizar datos de precipitación de 24 horas y 1 hora se utilizó el software Ax+B, para configuración que permite obtener datos precisos para diversos años de periodo de retorno, se contemplaron datos de precipitación históricos de 37 años del 1983 hasta el 2019 de la ciudad de Chihuahua por fuente de CONAGUA.

El método racional para obtener el caudal, es de lo más aplicados para este fin, de la zona de estudio se han desarrollado sus variables para el cálculo correspondiente.

De acuerdo con (Gómez, 2007) en la actualidad el uso del método racional es de los más comunes por la simplicidad que facilita para obtener datos para su aplicación, el cual es basado en la obtención del caudal máximo de escorrentía (Q).

Mediante la siguiente formula queda determinado el caudal máximo:

$$Q = 0.278C_e i A_r$$



Donde:

Q = Gasto Pico (m^3/s)

C_e = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

i = Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración(mm/h)

A_T = Área de la cuenca en (km^2)

0.278 = Factor de conversión de unidades

En las tablas 12 y 13 se presentan los resultados obtenidos para distintos periodos de retorno.

Tabla 12 Cálculo de altura de precipitación

Tr años	Precipitación(mm) -Duración (min)							
	5	10	20	30	40	67.914	120	1440
10	11.00	17.50	25.17	29.77	32.95	38.51	44.07	66.83
20	12.60	20.05	28.84	34.10	37.75	44.12	50.48	76.56
25	13.12	20.87	30.02	35.50	39.29	45.92	52.54	79.69
50	14.72	23.42	33.68	39.83	44.08	51.53	58.96	89.42
100	16.32	25.96	37.34	44.16	48.88	57.13	65.37	99.14

Tabla 13 Cálculo de intensidad de lluvia duración periodo de retorno

Tr años	Intensidad de lluvia(mm/hr) -Duración (min)							
	5	10	20	30	40	67.914	120	1440
10	132.00	105.02	75.52	59.54	49.43	34.03	22.03	2.78
20	151.21	120.30	86.51	68.20	56.62	38.98	25.24	3.19
25	157.39	125.22	90.05	70.99	58.93	40.57	26.27	3.32
50	176.60	140.50	101.04	79.66	66.13	45.52	29.48	3.73
100	195.81	155.78	112.03	88.32	73.32	50.48	32.68	4.13



En la tabla 14 se muestran los resultados para la estimación de caudal en la zona de estudio.

Tabla 14 Cálculo del caudal máximo de la microcuenca poniente

Cuenca	Altura máx.	Altura min	Long cauce	Pendiente	Tiempo de concentración		Área	Ce	intensidad	Caudal
	m	m	m	%	Horas	Minutos	Km ²		mm/h	m ³ /s
CAUCEPPAL	1573	1487	4809	0.01454	1.1319	67.9142	4.586	0.669	45.52	38.824

Finalmente, para la aplicación del método racional, una vez seguido el anterior procedimiento, se obtiene gasto pico en metros cúbicos por segundo del total de la microcuenca poniente. Se obtuvo un caudal máximo de 38.824 m³/s

4.2.15.1. Geología

La Geología forma parte esencial del área de estudio, debido a que proporciona información detallada sobre el subsuelo; también las características importantes a considerar como la propiedad que tiene el suelo de conducir tanto aguas superficiales como subterráneas, la composición, así como su textura y estructura. Cabe mencionar que la Geología del sitio puede ser un índice de efectividad para determinar algún método de recarga artificial.

La caracterización del acuífero y en específico la del sitio en estudio es compleja, de acuerdo con (Dillon, 2018) menciona en sus investigaciones la importancia de comprender la dinámica del agua subterránea con mayor énfasis, ya que el tipo de información necesaria como perforaciones , estudios de piezometría, estudios de hidro geoquímica, la implementación de Geofísica y modelaciones son necesarias para obtener una mejor interpretación , debido a que esto permite determinar la capacidad que tiene el subsuelo de recibir agua, así como la velocidad con la que se puede llegar almacenar el líquido, destacando la importancia de recuperación a corto y largo plazo.



Por fuente del Servicio Geológico Mexicano SGM se utilizó la carta Geológico-Minera de Chihuahua, Litología (H13-10), que corresponde a la zona de estudio y que es representada en la figura 19.

Presentando una Geología de la Era Cenozoica de forma superficial de nombre conglomerado polimíctico perteneciente al periodo Cuaternario Holoceno-Pleistoceno, contiguo a ello comprende otra columna de Toba riolítica del periodo Terciario, Paleogeno-Oligoceno, que se muestra en la figura 19.

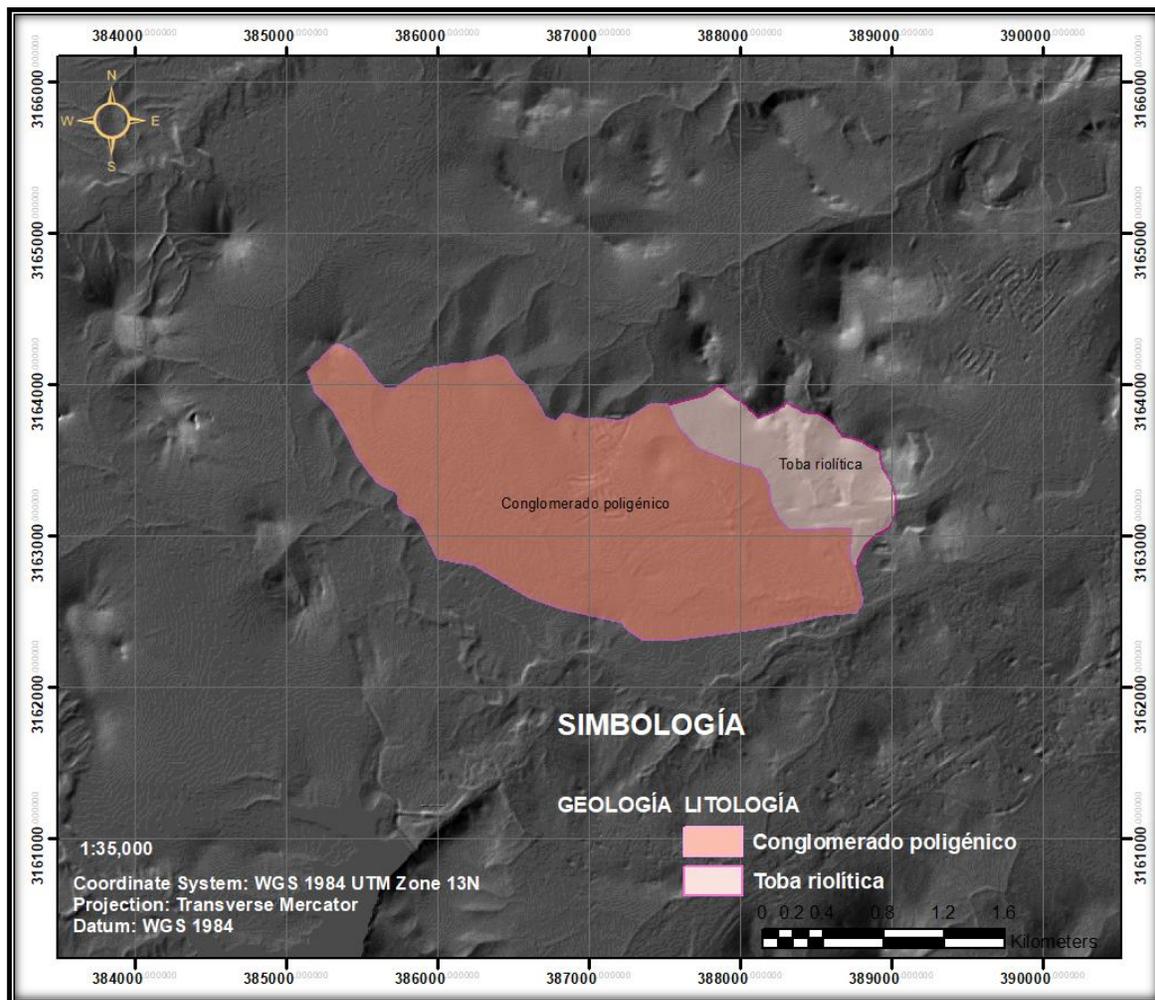


Figura 19 Geología del sitio de estudio por fuente de SGM



4.2.15.2. *Conductividad hidráulica*

Este parámetro forma parte esencial de la naturaleza de la infiltración del agua, según (Fetter, 2001), este concepto queda definido como la capacidad que tiene un material ya sea de cualquier conformación de suelo, de permitir que el agua logre transportarse.

Para obtener el valor de la conductividad hidráulica se requiere de estudios geofísicos tales como sondas eléctricas verticales SEV, sin embargo para fines prácticos de este estudio, se ha tomado en cuenta valores de otras investigaciones científicas realizadas en la ciudad de Chihuahua, como el desarrollo de un proyecto de recarga de acuíferos tipo MAR (Palma et al, 2018), datos de cortes litológicos de perforaciones y/o exploraciones de pozos de nombre El Chapo, localizado cerca de la microcuenca poniente así como también datos referentes en la actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Chihuahua Sacramento del año 2020.

Con el fin de realizar el cálculo del parámetro anterior mencionado, se recopilaron los datos y se hicieron combinaciones de un perfil como paquete o conjunto estratificado con la finalidad de aplicar la fórmula de permeabilidad vertical siendo está contenida en (Custodio & LLamas, 1983) y expresada de la siguiente forma:

$$1/k_v = \frac{1}{L} \sum \frac{b_i}{k_i}$$

Donde:

K_v = permeabilidad vertical

L = longitud del medio permeable

B_i = espesor de cada capa

K_i = permeabilidad del tipo de estrato



Aunque en algunas de las herramientas de la plataforma INOWAS se utilizan valores de conductividad hidráulica de forma general en otras se requiere el valor preciso del sitio de estudio, por tal motivo se opta por elegir el valor obtenido en la tabla 15 y que este queda comprendido entre los valores según (CONAGUA, 2020) ,que están en la actualización de la disponibilidad media anual del Acuífero Chihuahua Sacramento.

En la estimación de los valores de la tabla 15, se consideró algunos datos del subsuelo para cálculo de la conductividad hidráulica de un estudio previo de proyecto de recarga en Chihuahua en la figura 20 se muestras datos de K.

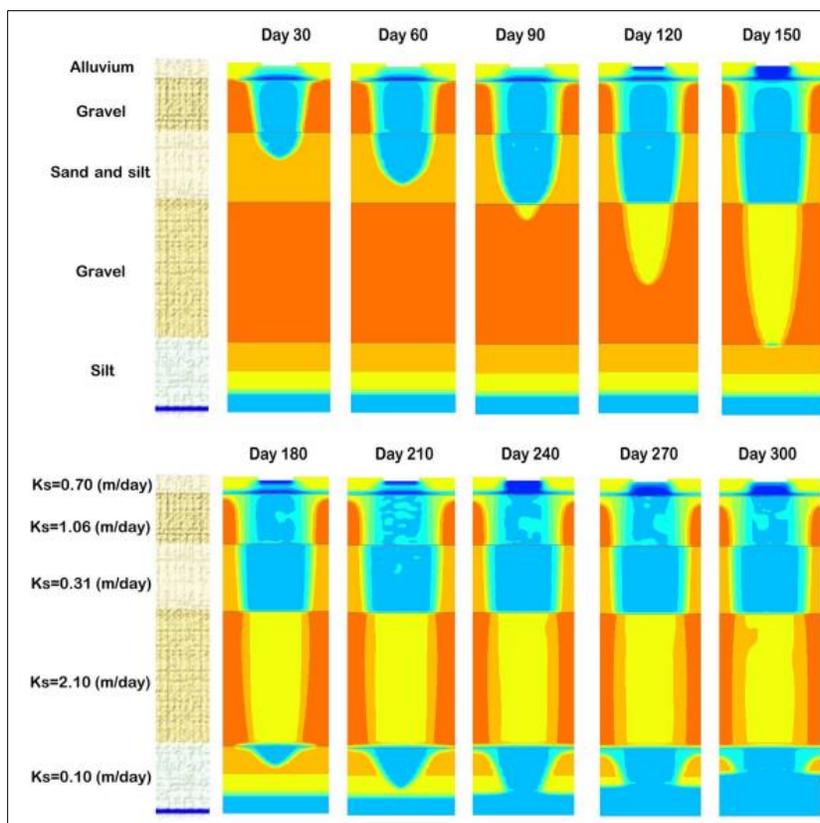


Figura 20 Valores de Conductividad hidráulica (Palma et al, 2018) adaptación propia

En la tabla 15 se realizó el cálculo con datos de K de la figura 20 y con adaptación propia para aplicarlos en la fórmula de (Fetter, 2001) y (Custodio & LLamas, 1983)



Tabla 15 Cálculo de la conductividad hidráulica vertical (*Fetter, 2001*)

Profundidad	Material	K m/d	K m/s
0 a 8	ALUVION	0.7	8.10185E-06
8 a 64	GRAVA	1.06	1.22685E-05
64 a 98	GRAVA ARCILLOSA	0.31	3.58796E-06
98 a 128	GRAVA ARCILLOSA	0.31	3.58796E-06
128 a 170	GRAVA	2.1	2.43056E-05
170 a 200	GRAVA	2.1	2.43056E-05
200 a 236	GRAVA	1.06	1.22685E-05
	K vertical	0.6962507	8.05846E-06

Se obtuvo un valor de K de 0.69 m/d, y/o de 8.05×10^{-6} m/s en la tabla 15, y como se describió anteriormente está comprendido entre los valores de la disponibilidad media anual del Acuífero Chihuahua Sacramento.

5. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la plataforma INOWAS, software que se utilizó para definir las factibilidades de implementación de los diferentes métodos seleccionados, acordes a los criterios internacionales para la recarga inducida, considerando todos los factores que intervienen como: fuente, suelo. Objetivo. Vegetación, geología etc.; obtenidos ya los parámetros necesarios en el capítulo anterior.

5.1. Plataforma INOWAS

El INOWAS es una plataforma de modelación creada por un grupo de investigación de la Universidad Técnica de Dresden en Alemania, la licencia es de versión gratuita y sirve para evaluación y optimización de las técnicas MAR.

5.1.1. Base de datos de reducción de la capacidad de infiltración de la cuenca

Esta instrumentación contiene escenarios que son considerados para toma de decisiones, en cuanto a obtener una perspectiva, acerca de ciertos efectos de las variantes que influye en la capacidad de infiltración, algunos de los factores que están contemplados dentro de la herramienta son; el tiempo de infiltración, conductividad hidráulica, la tasa y ciclo de carga hidráulica, y el clima; debido a experimentos realizados en campo y laboratorio que clasifican los ensayos de las condiciones climáticas, frío, cálido y templado. A continuación, se presenta la imagen de los resultados obtenidos de los escenarios de infiltración a partir de una balsa en superficie, figura 21

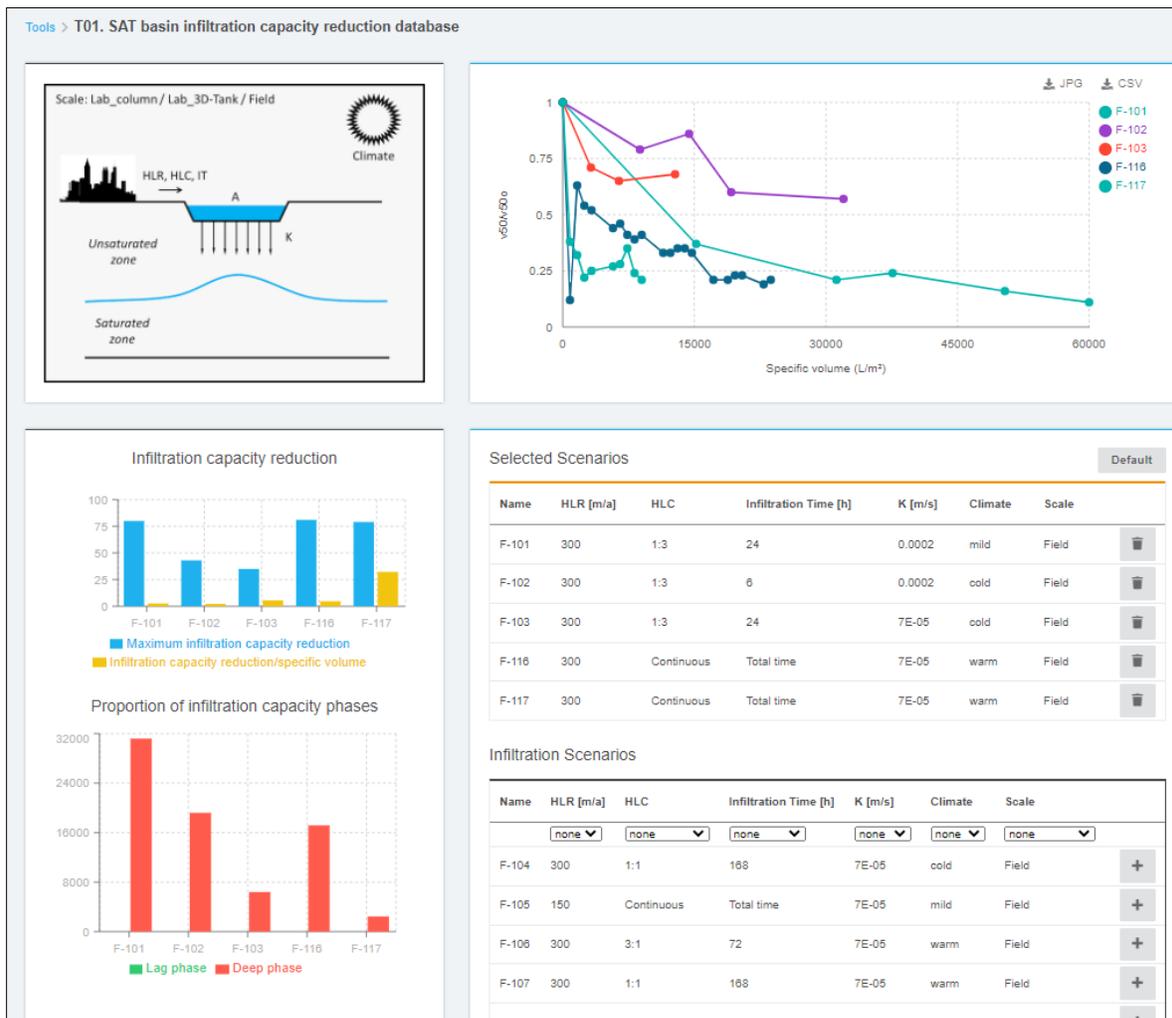


Figura 21 Escenarios de la infiltración de la plataforma INOWAS



5.1.2. Modelo de Selección MAR INOWAS

En la selección del modelo MAR de la plataforma INOWAS ofrece los diferentes tipos de técnica con la posibilidad de filtrar la información de manera general o específica, además presenta el modelo del software por el cual se aplica el criterio seleccionado, ya que el programa combina la modelación para obtener un resultado, también es importante mencionar que la selección de algún método y/o técnica están referenciados a artículos de investigación científica sobre casos de estudios reales de diferentes países del mundo para la evaluación.

5.1.2.1. Selección del método MAR INOWAS

Para determinar el método MAR el INOWAS permite seleccionar algunos aspectos a considerar como son; la principal fuente proveniente del agua, el tipo de suelo que representa el área según su permeabilidad, el uso de suelo de la zona ya sea residencial, industrial y tierras agrícolas entre otros; el objetivo a referir si se va a utilizar para restauración de aguas subterráneas, para un beneficio ecológico, uso doméstico, usos agrícolas y almacenamiento natural. Posteriormente una vez seleccionado las variantes anteriormente descritas, arroja información acerca de la técnica específica de recarga posible del lugar, esto conforme a los datos del proyecto, además se hace sugerencia del costo relativo bajo, medio y alto dependiendo del tipo de obra que resulta.

Al seleccionar los aspectos de manera específica de acuerdo con los datos del proyecto, área, condiciones del lugar, tipo de suelo y sus fuentes principales de agua; el sistema arroja una configuración de las técnicas disponibles, tipo MAR de aplicación posible en la zona de estudio. Haciendo mención de cada una de ella, por ejemplo: represas de arena, ASR por sus siglas en inglés Aquifer Storage and Recovery que quiere decir almacenamiento y recuperación de acuíferos, ASTR Aquifer Storage Transfer and Recovery que significa almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos, por



último, infiltración de pozos poco profundos a pozos. A continuación, se muestra en la tabla 16, las técnicas MAR y los métodos disponibles, así como su clasificación.

5.1.3. Técnica de recarga

Hay múltiples métodos MAR disponibles y existen varios esquemas de clasificación que se muestran en la tabla 16. Las Herramientas de la plataforma INOWAS se basan en el sistema de clasificación desarrollado por el centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas, IGRAC (Stefan and Ansems, 2017)

Tabla 16 Técnicas de la recarga artificial gestionada MAR (adaptación de IGRAC,2015)

Principales Métodos MAR		Métodos MAR específicos
<i>Técnicas que se refieren principalmente a la infiltración de agua</i>	Métodos de esparcimiento	Lagunas de infiltración (SAT)
		Inundación
		Zanjas y surcos
		Excesos de riego
	Infiltración bancaria inducida	Filtración de orillas de ríos
		Filtración de dunas
	Recarga de pozo a pozo	ASR / ASTR
		Infiltración en pozos poco profundos de pozo a pozo
<i>Técnicas que se refieren principalmente a interceptar el agua.</i>	Modificación en el canal	Presas de recarga
		Presas de subterráneas
		Presas de arena
		Difusión de canales
	Recolección de escorrentía	Recolección de agua de lluvia
		Barreras y terraplenes
		Trincheras



5.2. Definición de Método de Recarga Inducida

La recarga inducida tiene como finalidad la recuperación futura de los acuíferos, así como beneficios del tipo medio ambiental, no obstante, la recarga de forma accidental o bien no gestionada promueve la recarga de acuíferos mediante actividades que no han sido consideradas para tal fin. (Ringleb et al, 2016)

De acuerdo con (Dillon et al, 2010), el manejo de la recarga de acuíferos es la recarga intencionada de agua hacia los acuíferos para la obtención de algún beneficio ambiental, o bien su recuperación. De tal forma que éstos logran su reposición de forma natural mediante la infiltración de las lluvias y de los arroyos.

A través de las actividades humanas que pueden dar mejoría a la recarga se pueden clasificar en tres partes. (Dillon et al, 2010)

Involuntario. - Por causa de la limpieza de la vegetación de raíces profundas, la filtración profunda debajo de las áreas de riego, por fugas de las tuberías de agua y alcantarillado.

No gestionado. - Incluidos pozos, sumideros o drenes de aguas pluviales, lagunas de oxidación con transporte de desechos y tanques sépticos generalmente usados para la eliminación de agua, sin recuperación o considerar su reutilización.

Administrado. – Sistemas de recarga mediante estructura diseñadas que contemplan planificación de pozos de inyección, lagunas de infiltración, agua pluvial, agua tratada.

Las técnicas de la recarga artificial de acuíferos tienen sobre fundamento la inducción forzada de aguas superficiales de entre ellas la lluvia con la finalidad de incrementar la disponibilidad del agua en el subsuelo, en algunos casos dar una mejora a su calidad. El tipo de formación geológica según su permeabilidad, las condiciones aptas para lograr el almacenamiento y transmitir aguas subterráneas son factores a considerar para la práctica de la recarga. (Peña et al, 2016)

Acerca de las fuentes de agua sobre técnicas MAR, dentro del ámbito superficial, el agua de lluvia y la escorrentía son aptas de tal forma que se pueden utilizar para recolección



y/o almacenamiento, aun se sabe que usando un porcentaje de eficiencia de esta agua debido a que se reconocen pérdidas, existe la posibilidad de que se dé la recarga de acuífero. (Rahman et al, 2013)

Según (Murillo, 2009) la recarga artificial de acuíferos es una de las técnicas hidrogeológicas que se ven con la posibilidad de ser una solución a los problemas de sobreexplotación que afectan a los acuíferos.

(Escalante, 2006) menciona que las técnicas MAR por sus siglas en inglés Managed Aquifer Recharge son consideradas una elección de gestión hídrica de primer orden en algunos lugares del mundo.

Las técnicas para la recarga se dividen en las que tienen la capacidad de infiltrar agua y las que interceptan el agua, las cuales se presentan en la tabla 16 (IMTA, 2017)

Dentro de las técnicas MAR se clasifican en cinco grupos, los cuales contemplan subdivisiones, la clasificación es utilizada en el inventario global MAR por IGRAC en sus siglas en inglés y traducido al idioma español, el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas. A continuación, se mencionan y se muestran en la figura 22:

- Métodos de distribución, figura A
- Infiltración inducida en los márgenes de los ríos, figura B
- Pozos, túneles y perforaciones, figura C
- Modificación en canales, figura D
- Captación de agua de lluvia, figura E

<p>A.</p>	<p>Los estanques de dispersión superficial y específicamente de infiltración se encuentran entre las técnicas de MAR más aplicadas en todo el mundo. Se basan en la retención y esparcimiento del agua sobre un área mayoritariamente plana con el fin de mejorar la infiltración. (IGRAC, 2015)</p>
<p>B.</p>	<p>Para la filtración de la orilla de un río / lago, se induce la infiltración del agua superficial de un río o lago bombeando en una galería de pozos o en una línea de pozos paralela a la orilla de la fuente de agua. (IGRAC, 2015)</p>
<p>C.</p>	<p>La infiltración a través de pozos, pozos o pozos poco profundos se suele practicar para recargar un acuífero freático donde no se pueden aplicar métodos de esparcimiento debido a la existencia de capas superficiales de baja permeabilidad.</p>
<p>D.</p>	<p>Las modificaciones dentro del canal comprenden estructuras construidas en canales de drenaje que interceptan o retrasan la escorrentía, mejorando así la infiltración y la recarga de agua subterránea. (IGRAC, 2015)</p>
<p>E.</p>	<p>La recolección de agua de lluvia en los tejados se utiliza cada vez más en las zonas urbanas para recolectar el agua de precipitación. Los usos son múltiples e incluyen almacenamiento en superficies en tanques, uso para riego y recarga de agua subterránea. (IGRAC, 2015)</p>

Figura 22 Clasificación de los sistemas MAR fuente



La recarga por infiltración inducida de los ríos para suministro de agua potable se establecía en Europa en la década de 1870 y las primeras cuencas de infiltración aparecieron en 1897 en Suecia y en 1899 en Francia. Sin embargo, hace 60 años cuando se formó la Asociación Internacional de hidrogeólogos (IAH), la intervención de la humanidad para aumentar la tasa de recarga de aguas subterráneas, como pozos de drenaje para evitar inundaciones, eliminación de aguas residuales a través de fosas sépticas, o la infiltración por medio de los cultivos regados con agua superficial, no se gestionaba o era incidental. (Dillon, 2018)

En India, los pozos de recarga fueron utilizados en el año 600 d.C. para recargar el agua de lluvia recolectada en estanques, de esta manera se reponían los acuíferos de poca profundidad que se utilizaban como suministros de agua potable. (Dillon, 2018)

A continuación, se muestran las imágenes en la figura 23 de los métodos seleccionados para este estudio. Considerando el objetivo, la fuente de agua, tipo de suelo, usos de suelo y objetivo. Como se puede observar en la imagen 23 se consideró como objetivo en base a lo desarrollado en este estudio, finalmente se puede considerar algunas series de factores que permite tener una visión más cerca de la selección de los métodos MAR; de inicio se eligió como la fuente de agua principal la precipitación, posteriormente para el sitio, una vez observado, no contiene ríos perenes sino que arroyos efímeros que solo fluye agua en temporadas de lluvia, del cual se pudo calcular el caudal máximo para contar con el volumen en dado caso de diseño para una obra de retención; el tipo de suelo en la zona superficialmente está constituido por suelos finos , estratigráficamente arcillosos con baja permeabilidad, en la plataforma INOWAS permite solamente seleccionar 4 tipos de suelos según el tipo de permeabilidad y de acorde al área se optó por suelos arcillosos poco profundos, el objetivo que delimita la selección esta dado por las condiciones del terreno, debido a que en toda su extensión el predio pertenece a desarrollos habitacionales, la finalidad es acoplar o implementar un sistema MAR de acuerdo a las características favorables, el hecho de seleccionar también un beneficio ecológico INOWAS arroja el resultado similar al

doméstico, de tal manera que la escala se refiere en intensidad al número de persona que serían beneficiadas con estos sistemas, por motivos de que no es considerada toda la ciudad o el Acuífero Chihuahua-Sacramento en su totalidad, sino que es de forma local se eligió una escala pequeña.

TABLERO DOCUMENTACIÓN
alfonso

Instrumentos > T06. Selección del método MAR

FUENTE DE AGUA

- Ríos efímeros
- Ríos perennes
- Represas de almacenamiento / embalse
- Inundaciones / Escorrentías / Agua de lluvia
- Agua de tormenta urbana
- Agua subterránea
- Aguas residuales tratadas (industriales / domésticas / desalación)

TIPO DE SUELO

- Franco arenoso, marga limoso
- Arenas profundas, suelos bien agregados.
- Suelos muy arcillosos
- Suelos poco profundos, suelos arcillosos, suelos bajos en materia orgánica

USO DEL SUELO

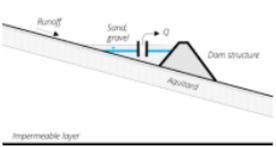
- Residencial
- Industrial
- Parques / Tierras Recreativas
- Tierra agrícola
- Streambed
- Tierras estériles / Tierras montañosas

OBJETIVO

- Capacidad máxima de almacenamiento natural
- Evitar la intrusión de agua salada
- Restauración de aguas subterráneas
- Mejora de la calidad del agua
- Usos agrícolas / Riego
- Doméstico
- Beneficio ecológico

ESCALA TÍPICA

- Pequeño (hogar)

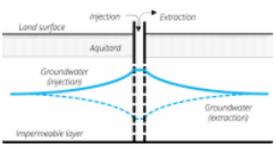


Represas de arena ✓

Las represas de arena son estructuras de embalse construidas sobre el suelo dentro de canales fluviales intermitentes. Durante los eventos de lluvia, la escorrentía de aguas pluviales acumulará arenas y gravas detrás de la estructura de la presa. Esto crea un acuífero artificial aguas arriba de la presa que puede almacenar la escorrentía de aguas pluviales. Los reservorios se llenarán durante los eventos de lluvia y almacenarán el agua en lugar de perderla en la captación. Las represas de arena pueden aumentar la disponibilidad de agua durante las estaciones secas, prevenir la evaporación del agua y proteger el agua de la contaminación.

[Lee mas](#)

Costo: ↓ Zona: ↓

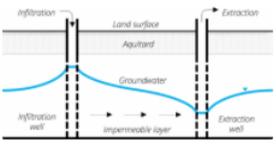


Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR) ✓

Para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR), se conecta un pozo profundo construido al acuífero objetivo y se utiliza tanto para la extracción como para la inyección de agua. Este tipo de MAR se utiliza principalmente cuando hay estratos gruesos y de baja permeabilidad por encima del acuífero objetivo. La mayoría de los sistemas ASR que operan actualmente almacenan agua potable en el acuífero para su recuperación durante los picos de demanda o para transferiría de tiempos de alta a baja disponibilidad (por ejemplo, estación lluviosa a estación seca).

[Lee mas](#)

Costo: ↑ Zona: ↓

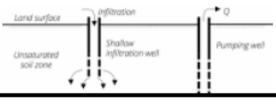


Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR) ✓

Para el almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR), el agua se inyecta en el acuífero a través de un pozo y se extrae mediante otro pozo ubicado a cierta distancia. El paso subterráneo facilita procesos físicos y químicos que mejoran la calidad del agua inyectada. Este tipo de MAR se utiliza principalmente cuando hay estratos gruesos y de baja permeabilidad por encima del acuífero objetivo. Las técnicas de inyección de pozos exigen una alta calidad del agua, ya que el agua recargada se inyecta directamente en el acuífero.

[Lee mas](#)

Costo: ↑ Zona: ↓



Infiltración de pozos, pozos y pozos poco profundos ✓

La infiltración a través de pozos, pozos o pozos poco profundos se suele practicar para recargar un acuífero freático donde no se

Figura 23 Selección de la técnica MAR por fuente de INOWAS



El resultado de la plataforma arroja 4 elementos observados en la figura 23 como selección de sistemas de recarga los cuales se describen más adelante.

5.2.1. Mapa de Idoneidad

El mapeo de idoneidad frecuentemente es de mayor utilidad, ya que tiene influencia sobre la zona de estudio para determinar un tipo de recarga MAR, sin embargo, el enfoque comúnmente se base en el diseño y la funcionalidad de la obra, lo que en ocasiones esto propicia un descuido de la selección del sitio. (Sallwey et al, 2019)

La finalidad de obtener un mapa de idoneidad de la plataforma de INOWAS, es para identificar las posibles áreas de superficie adecuadas, para la recarga de acuíferos mediante la aplicación de alguna técnica MAR.

Para desarrollar el mapa de idoneidad en INOWAS, fue preciso trabajar previamente con un sistema de información geográfica GIS, con datos digitales de cartas topográficas utilizando el software ArcMap en su versión 10.5, un modelo digital de elevación MDE tipo superficie con 5 metros de resolución, en su denominación H13C66e2, el conjunto de datos vectorial edafológico serie II, uso del suelo y vegetación serie VI; en escala 1:250,000, por fuente de INEGI, y de Geología la carta de litología H1310 por medio del Servicio Geológico Mexicano SGM.

El INOWAS, para los mapas de idoneidad, se basa en el análisis de decisiones multicriterio, por sus siglas en inglés MCDA, esto debido a que existe muchas variables para lograr un desarrollo adecuado.

Se ha tomado en cuenta para el análisis, la herramienta de interfaz de consulta de la plataforma INOWAS T04, ya que filtra la información contenida en su base de datos, los criterios de mayor frecuencia utilizados. A continuación, se muestra la imagen de la información alimentada a la base de datos en la plataforma para obtener el mapa de idoneidad en la figura 24.



Instrumentos > T04. Base de datos para mapeo de idoneidad de sitios basado en SIG

View as: Mesa

Database Attributes:

- Parámetros de asignación de restricciones
- Categoría de criterios (específica)
- Categoría de criterios (principal)
- Mapeo de restricciones
- Reglas de decisión
- ID
- Modificaciones en el canal
- Filtración de banco inducida
- Objetivo principal de MAR
- Número de criterios utilizados
- Año de publicación
- Recolección de agua de lluvia y escorrentía
- Análisis de sensibilidad
- Métodos de esparcimiento
- Ubicación del caso de estudio
- Tipo MAR no especificado
- Fuente de agua
- Método de asignación de peso
- Buena, eje, recarga de pozo

Operators: Contar

Drag attributes into row field:

- Criterio original
- Clasificación de importancia de los criterios
- Criterios modificados
- Referencia del documento
- Peso de criterio

Drag attributes into column field:

Criterio original	Clasificación de importancia de los criterios	Criterios modificados	Referencia de documento	Peso de los criterios	Totales
Geología	2	Geología / Litología	Chowdhury, 2010	23	1
Densidad de drenaje	3	Densidad de drenaje / Intensidad de drenaje	Chowdhury, 2010	17,7	1
Pendiente	3	Pendiente	Chowdhury, 2010	18,2	1
Transmisividad del acuífero	4	Transmisividad del acuífero	Chowdhury, 2010	12,6	1
Geomorfología	1	Geomorfología	Chowdhury, 2010	28,5	1
Amortiguador de 100 m del segundo y tercer drenaje	N / A	Amortiguador de 100 m del segundo y tercer drenaje	Chowdhury, 2010	N / A	1
Amortiguador de 100 m de lineamientos	N / A	Distancia a lineamientos / fallas	Chowdhury, 2010	N / A	1
Densidad de línea	N / A	Densidad de línea	Shankar, 2005	N / A	1
Profundidad al lecho de roca	N / A	Espesor del acuífero	Shankar, 2005	N / A	1
Cobertura del suelo (profundidad)	N / A	Profundidad del suelo	Shankar, 2005	N / A	1
Densidad de drenaje	N / A	Densidad de drenaje / Intensidad de drenaje	Shankar, 2005	N / A	1
Pendiente	N / A	Pendiente	Shankar, 2005	N / A	1

Figura 24 Plataforma base de documentación para mapeo de idoneidad del sitio INOWAS

La plataforma ofrece una diversidad de componentes para aplicaciones de criterio, para este proyecto se eligieron cuatro criterios a desarrollar en la plataforma, el peso de los criterios a elegir representa un número recurrente de estudios de investigación tanto reciente como algunos de antigüedad y basado en los datos contenidos en la herramienta se opta por considerar estas variantes, las cuales contemplan; la pendiente de la microcuenca, el suelo y su textura, la cobertura vegetal y la geología del sitio. Figura 25 y 26

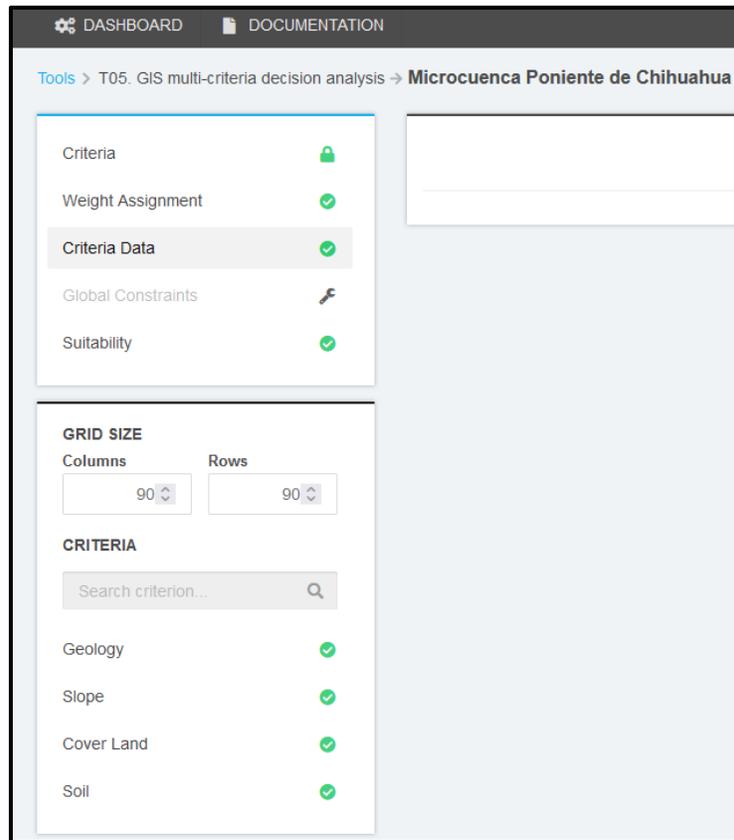


Figura 25 Criterio de selección de cobertura, pendiente suelo y geología

Most Important		Settings	
1	Geology	Name	
2	Slope	Ranking	
3	Soil	Method	
4	Cover Land	Rank reciprocal weight	
Least Important		Resulting Weights	
		Criteria	Sum Weight [%]
		Geology	48.00
		Slope	24.00
		Soil	16.00
		Cover Land	12.00

Figura 26 Criterios de selección para idoneidad del sitio figura 25,26

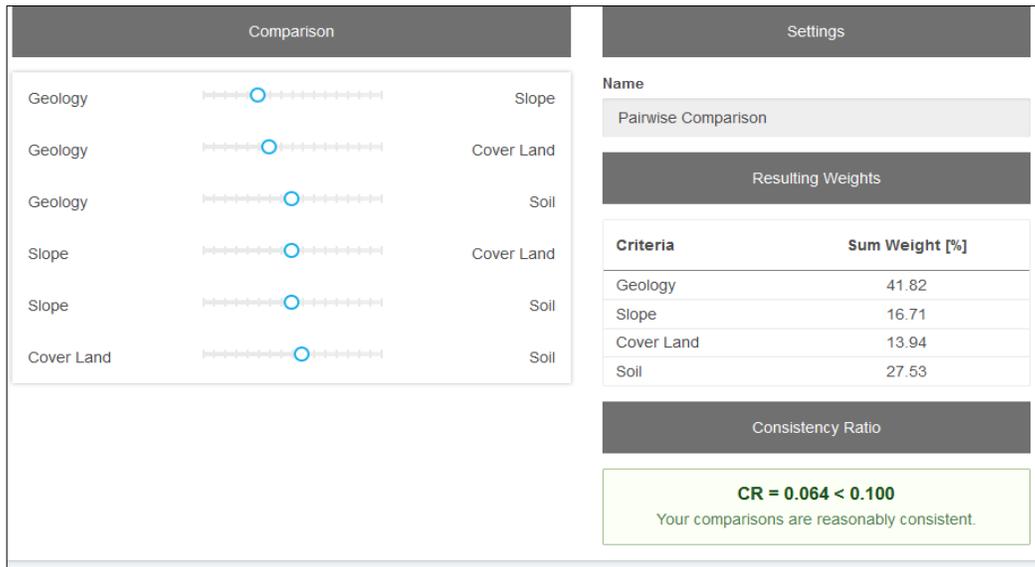


Figura 27 Multicriterio de análisis para decisiones GIS

En este proceso de la plataforma con la herramienta de asignación de peso figura 27, es un método de ponderación disponible, con el cual se logran establecer algunas preferencias, de tal modo que se permita estar dentro de un rango sobre el índice de coherencia, de lo contrario el programa sugiere revalorar los datos posicionados. Para este caso la comparación de las componentes se indica dentro de los parámetros consistentes.

Posteriormente una vez configurados y procesados los datos para la plataforma INOWAS en la siguiente figura 28 se muestran los resultados obtenidos de la idoneidad del sitio.

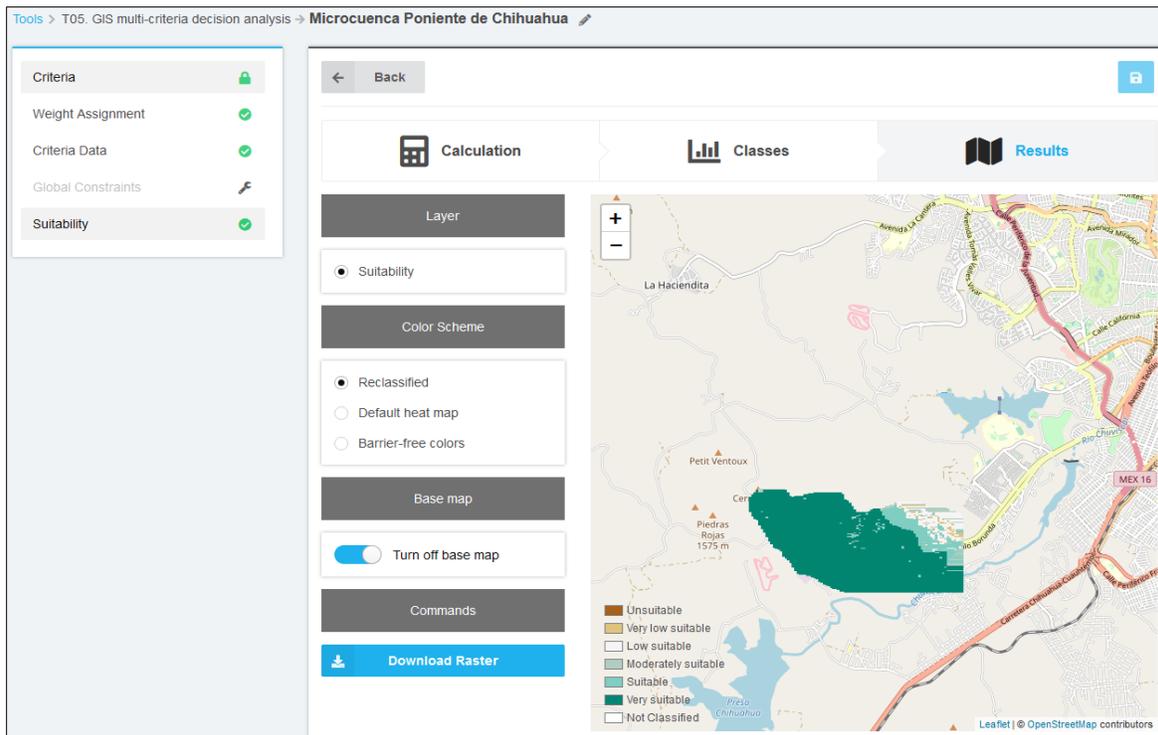


Figura 28 Idoneidad del sitio

Se obtiene el mapa de idoneidad en la figura 28, de acuerdo con las componentes configuradas anteriormente, se observa que la idoneidad del sitio puede ser apropiada según las condiciones dadas.

5.3. La necesidad de la recarga artificial

Debido a diversos factores antropogénicos se hace evidente que exista una demanda de agua en el mundo y en especial en zonas áridas y/o semiáridas, a menudo la sociedad en este tipo de regiones se vale de la recarga natural, sin embargo es insuficiente, por tal motivo se ha llevado una sobreexplotación de los acuíferos lo que implica una disminución de las aguas subterráneas, algunas fuentes superficiales de agua pueden llegar a tener ciertas desventajas, como los son las altas pérdidas por evaporación, la recarga gestionada



de acuíferos tiene varios objetivos, entre ellos de suma importancia es que se pueda lograr un aumento del almacenamiento; al menos mantenerlo equilibrado conforme a la demanda y la disponibilidad del agua a lo largo del año (RIngleb et al, 2016)

En la zona de estudio, aún no se han implementado algún sistema de recarga, como se ha mencionado anteriormente la escasez de lluvia cada vez se presenta con mayor frecuencia arrojando una precipitación promedio anual de 415 mm esto en base a los datos histórico observados en un periodo de tiempo de 60 años del 1960 al 2019, esta situación demerita probar la viabilidad de aplicar alguna técnica MAR.

Cabe señalar que un sistema MAR puede tener variaciones dependiendo las características de la zona, lo que esto implicara en ocasiones un método de tratamiento previo precedente a la recarga y otro posteriormente a su salida, teniendo claro también el tipo de uso final que pueda resultar ya sea doméstico, ecológico u otro uso.

5.3.1. Fuente de agua

La zona de estudio no cuenta con arroyos y/o ríos perennes, el arroyo trascendente que está situado dentro de la microcuenca, es el llamado arroyo Los Temporales presentándose de forma intermitente, por lo que en tiempos de lluvia, la escorrentía superficial se convierte en la única fuente de agua, debido a este tipo de fuente de agua, existe la posibilidad de realizar obras de retención de aguas pluviales en algunas áreas con la finalidad de ser aprovechadas, cabe mencionar que dentro del área existe una planta de tratamiento de aguas residuales, se puede considerar también como fuente, ya que se pudieran contemplar las aguas residuales domestica e industriales para dar un tipo de uso que lleguen a cumplir con los estándares de las normas mexicanas. La planta de tratamiento de agua residual, topográficamente está situada de tal forma que gran parte de los escurrimientos de aguas superficiales convergen cerca de su ubicación, los cuales se pudieran aprovechar para su recolección.



En áreas urbanas tal es el caso del sitio de estudio, una de las fuentes que se pueden implementar es un sistema de recarga llamado cosecha de lluvia, el cual consiste en captar el agua a través de las azoteas en viviendas, lo que requiere de estructuras para desviar el agua hacia algún tipo de pozo existente, o bien una fosa muy bien diseñada, las bases de almacenamiento tienen que considerar materiales que eviten la contaminación de este líquido proveniente de las lluvias. El efecto que produce este tipo de sistemas de recarga de aguas subterráneas es a nivel local, sin embargo, su aplicación a gran escala pudiera elevar ligeramente los niveles del agua y por ende se tiene un suministro de agua subterránea de poca profundidad. (Chairman and Gupta, 2011)

5.4. Hidráulica del acuífero

El acuífero Chihuahua Sacramento siendo semiconfinado, es decir zonas donde puede presentarse un confinamiento y otras no, mediante la observación que se puede realizar, se hace notar que el acuífero tiene una pendiente prominente que va en dirección de Suroeste a Noreste, cubriendo un área aproximada de 1889 km².

Su perfil estratigráfico en términos geológicos, son compuestos en primera instancia de forma general por depósitos aluviales contenidos en el Cuaternario; en su estratigrafía está compuesto por rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico y Paleógeno; en el Paleoceno comprendido por rocas andesitas, ígneas intrusivas y riolíticas; el Eoceno por tobas riolíticas y Oligoceno tobas riolíticas e ignimbritas; esto de acuerdo con la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero. (CONAGUA, 2020)

5.4.1. Calidad del agua

Dentro de zona de estudio se localiza el pozo denominado El Chapo, mismo que ha sido objeto de investigaciones pasadas para determinar algunos parámetros, como la conductividad eléctrica, temperatura, potencial de hidrogeno, entre otros; para determinar la calidad de agua, debe ser preciso realizar mediciones en campo valoradas en laboratorio



que permitan evaluar la calidad del agua para garantizar que se está cumpliendo con las normas mexicanas; como se mencionó debido a exploraciones geofísicas realizadas que abarcan parte del sitio presentan condiciones favorables en las cuales se encuentra agua subterránea con la finalidad de ser explotada.

5.4.2. Elementos del esquema selección de sitios para recarga

5.4.2.1. Represas de arena

Este método consiste en construir una presa de arena, en la cual, se almacena agua superficial de acuerdo con (Borst and Haas, 2006), en donde al agua es retenida y filtrada sobre la arena, algunas de las ventajas de este tipo, es que se logra evaporar menos agua, debido a que la radiación solar es menos directa al infiltrarse el agua de forma más rápida, siempre y cuando las características del suelo lo permitan, por ende, menor contaminación del agua superficial retenida, otra ventaja posible es que no requieren de una extensión de superficie muy grande y de igual forma no requiere mucha fuerza de trabajo lo que mitiga el costo elevado de estos sistemas de recarga gestionada de acuíferos. Por lo tanto, se convierte en una fuente de agua. Figura 29

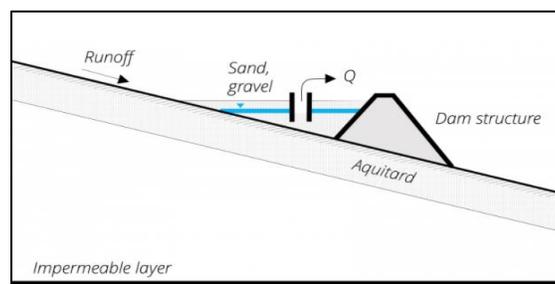


Figura 29 Sistema MAR represas de arena

Dado que la plataforma de INOWAS arroja un sistema de recarga del tipo represas de arena, esta técnica se han utilizado años atrás, por mencionar un ejemplo en el siglo XVIII se construyeron estos sistemas en Arizona EUA y también se desarrollan en África;



recientemente en ciudad Chihuahua denominado los Ojos del Chuvísar se construyó un sistema de recarga similar, una combinación de técnica en la cual consistió realizar una represa con muros de gaviones de mampostería, material granular fino como arena lo cual propicia la infiltración del agua superficial y en la parte inferior del desplante de los gaviones se colocó un tubo ranurado por el cual el agua es inyectada hacia un pozo de abastecimiento, el cual ha tenido resultados positivos.

En la siguiente tabla 17 se resumen sus características y su factibilidad de implementación.

Tabla 17 Alcances de un sistema MAR tipo represas de arena Demau,2014

<i>Escala típica de capacidad del sistema</i>	Pueblo – Ciudad ($\approx 10^4 \text{ m}^3/\text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$).
<i>Geología</i>	Rocas principalmente cristalinas con lechos arenosos.
<i>Topografía</i>	Canales de drenaje natural con pendientes suaves.
<i>Suelos</i>	Cauces de arena.
<i>Fuente de agua</i>	Aguas pluviales.
<i>Pretratamiento</i>	No se utiliza pretratamiento.
<i>objetivo principal MAR</i>	Almacenamiento de agua.
<i>Coste relativo</i>	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema (adaptado de IGRAC, 2007):

Ventajas

- ✓ Bajos costos de construcción.
- ✓ Bajo mantenimiento.



- ✓ Sin interferencia con otros usos del suelo.

Limitaciones

- Posibles conflictos de propiedad.
- Potencial de contaminación del agua.
- Tasas de infiltración relativamente pequeñas.

5.4.2.2. Almacenamiento y recuperación de acuíferos ASR

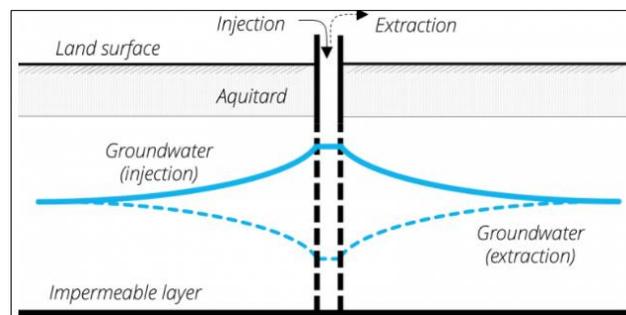


Figura 30 Sistema MAR ASR

El ASR mostrado en figura 30 es una técnica de forma común para suelos con permeabilidad baja o bien impermeables, en la cual consiste en inyectar agua hacia un pozo, destacando que la calidad debe ser mejor que la almacenada en el acuífero, siempre y cuando sea para consumo humano, esto claro que con un posible procedimiento previo de tratamiento que permita liberar e inyectar. (Rahman et al, 2013)

Como bien se menciona la finalidad de este tipo de sistema es para mantener almacenada el agua, y/o equilibrar un suministro, ya que posteriormente de ser recuperado se tiene la posibilidad de realizar una distribución como agua potable e incluso industrial y riego. De las fuentes principales de abastecimiento para esta técnica, suelen ser lluvia, agua potable tratada y aguas residuales tratadas con calidad aceptable. (Antoniou et al, 2012)

La técnica de almacenamiento y recuperación de acuíferos considera algunas ventajas y desventajas, y dentro de lo óptimo está el mejorar la calidad de agua aunque



posiblemente costoso; la variante de heterogeneidad del acuífero señala que se debe a la distribución de los espacios y valores de algunas propiedades como lo es la transmisividad y porosidad, lo que esto puede provocar variaciones en las características litológicas, por lo que suele tener impacto en los sistemas de flujo de agua subterránea, así como en los solutos transportados; por lo tanto puede dar resultado o dar pie a bajos rendimientos de las técnicas ASR. (Guo et al, 2014)

En la siguiente tabla 18 se resumen sus características y su factibilidad de implementación.

Tabla 18 Alcances de un sistema MAR tipo ASR Demau,2014

<i>Escala típica de capacidad del sistema</i>	Aldea – Ciudad ($\approx 10^4$ m ³ /año – superior a 10^6 m ³ /año).
<i>Geología</i>	Acuíferos confinados o no confinados compuestos por rocas no consolidadas.
<i>Topografía</i>	No es relevante para este tipo de tecnología.
<i>Suelos</i>	No es relevante para este tipo de tecnología.
<i>Fuente de agua</i>	Agua de río, agua de lago, agua de lluvia, agua subterránea, etc. Se espera que la alta calidad del agua evite la obstrucción y la contaminación del acuífero.
<i>Pretratamiento</i>	Altas necesidades de pretratamiento. El agua debe tratarse para evitar obstrucciones y cumplir con las normas locales sobre aguas subterráneas.
<i>MAR objetivo principal</i>	Recuperar los niveles freáticos y servir de barrera frente a la intrusión salina.
<i>Coste relativo</i>	Medio bajo.

Ventajas y desventajas del sistema (adaptado de IGRAC, 2007):

Ventajas

- ✓ La obstrucción se remedia parcialmente durante el ciclo de recuperación (extracción de agua).
- ✓ Infiltración de grandes cantidades de agua a un costo relativamente bajo.
- ✓ La infraestructura de pozos no operativos se puede utilizar para reducir los costos. (Pozos que se habían secado)



- ✓ La recarga de agua subterránea no está determinada por las características de la superficie.

Limitaciones

- Diseño complejo, construcción, operación y mantenimiento.
- Se requiere un seguimiento intensivo del rendimiento del sistema.
- Fuente de agua de alta calidad.

5.4.2.3. **ASTR**

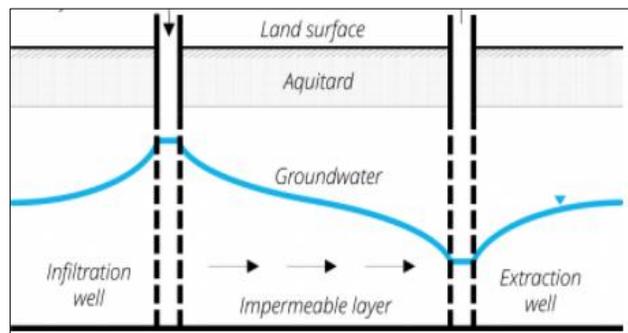


Figura 31 Sistema MAR ASTR

A diferencia de un sistema ASR que se muestra en la figura 31, el almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos ASTR, por sus siglas en inglés, es un método que se basa en la inyección de agua hacia un pozo o varios, con la finalidad de almacenar, sin embargo, existe la condicionante de realizar una recuperación mediante otro o más pozos; generalmente es utilizado para generar un tratamiento de agua adicional en particular para patógenos y algún micro contaminante. (Page et al, 2018)

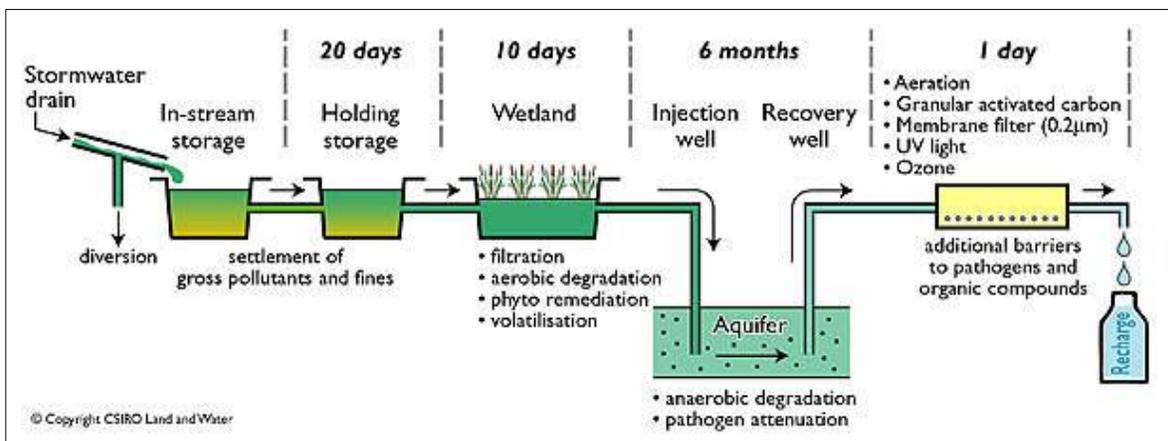


Figura 32 Proceso de desarrollo esquemático de un sistema ASTR fuente Water Technology

En la figura 32 se puede observar de manera esquemática un proceso de un desarrollo de un sistema ASTR aplicado en la ciudad de Salisbury Australia en su primera fase de demostración. En el cual consta de recolectar agua de precipitación, se retiene para su almacenamiento dentro de su proceso conlleva a pasar el agua por humedales como tratamiento natural previo, para posteriormente ser inyectado hacia un pozo distante de otro pozo de recuperación, en cual el tiempo de procesamiento es el mayor, y finalmente el agua es extraída para un tratamiento de mejora de la calidad del agua con la intención de darle un uso final del tipo doméstico. En la tabla 19 se muestran sus características y su aplicación.

Tabla 19 Alcances de un sistema MAR tipo ASTR Demau,2014

<i>Escala típica de capacidad del sistema</i>	Aldea – Ciudad ($\approx 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$ – superior a $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$).
<i>Geología</i>	Acuíferos confinados o no confinados compuestos por rocas no consolidadas.
<i>Topografía</i>	No es relevante para este tipo de tecnología.
<i>Suelos</i>	No es relevante para este tipo de tecnología.
<i>Fuente de agua</i>	Agua de río, agua de lago, aguas residuales tratadas, aguas subterráneas, etc. Se requiere agua de alta calidad para evitar la obstrucción y contaminación del acuífero.
<i>Pretratamiento</i>	El agua debe tratarse para evitar obstrucciones y cumplir con las normas locales sobre aguas subterráneas.
<i>MAR objetivo principal</i>	Tratamiento de las fuentes de agua y recuperación de los niveles freáticos.
<i>Coste relativo</i>	Altura media.



Ventajas y desventajas del sistema (adaptado de IGRAC, 2007):

Ventajas

- ✓ Infiltración de grandes cantidades de agua a un costo relativamente bajo.
- ✓ La recarga de agua subterránea no está determinada por las características de la superficie.
- ✓ Paso subterráneo como paso de tratamiento adicional.

Limitaciones

- Diseño complejo, construcción, operación y mantenimiento.
- Se requiere un seguimiento intensivo del rendimiento del sistema.
- Demandas de alta calidad del agua de la fuente de agua.
- Alto potencial de obstrucción de pozos.

5.4.2.4. Infiltración de pozo a pozo

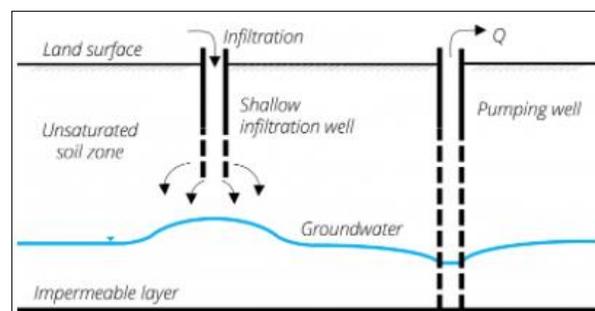


Figura 33 Sistema MAR infiltración de pozo a pozo

Este tipo de métodos que se observa en la figura 33, suelen aplicarse en suelos de forma superficial, presentando valores de permeabilidad baja, además pueden ser aprovechados pozos que han sido abatidos, en estos sistemas de recarga, el flujo es conducido por gravedad; alguna de las condicionantes es que exige que el agua proveniente sea de una calidad alta. INOWAS 2018



En la siguiente tabla 20 se resumen sus características y su factibilidad de implementación.

Tabla 20 Alcances de un sistema MAR tipo infiltración en pozos a pozos poco profundos Demau,2014

<i>Escala típica de capacidad del sistema</i>	Pueblo – Ciudad ($\approx 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$ – $\approx 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$).
<i>Geología</i>	Acuíferos no confinados compuestos por rocas no consolidadas donde está presente una capa superficial de baja permeabilidad.
<i>Topografía</i>	Los terrenos planos pueden estar asociados con una menor erosión y menos obstrucciones por sedimentos.
<i>Suelos</i>	No es relevante para este tipo de tecnología.
<i>Fuente de agua</i>	Agua de río, agua de lago, aguas residuales tratadas, aguas pluviales.
<i>Pretratamiento</i>	Se recomienda el tratamiento del agua para evitar obstrucciones y cumplir con las normas locales sobre aguas subterráneas.
<i>MAR objetivo principal</i>	Recuperar los niveles freáticos.
<i>Coste relativo</i>	Bajo-Medio (la infraestructura existente puede usarse para reducir costos).

Ventajas y desventajas del sistema (adaptado de IGRAC, 2007):

Ventajas

- ✓ Las instalaciones existentes pueden utilizarse para reducir los costos de construcción de nueva infraestructura.
- ✓ En el caso de pozos poco profundos, la recuperación de agua a través de la misma estructura reduce la obstrucción.

Limitaciones

- Demandas de alta calidad del agua de la fuente de agua.



6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

De acuerdo a lo anterior expuesto y gracias al desarrollo de este estudio se puede deducir que la hipótesis planteada en un inicio es confirmada positiva, es decir que, si es posible implementar sistemas de recarga inducida mediante 4 métodos en la zona poniente de Chihuahua, cabe hacer mención que cada proyecto de recarga inducida es particular según sus características, variables, factores y parámetros descritos en este estudio, que finalmente logran impactar sobre el resultado.

Con la metodología empleada sobre las herramientas de análisis como la plataforma de INOWAS que determinan multicriterio de selección, se pudo definir las alternativas adecuadas para las características de la zona.

Dado que esta herramienta realiza el análisis multicriterio, considerando todos los factores y variables que intervienen en la complejidad del flujo del agua, tanto en la zona no saturada como en la saturada, se puede definir que el obtener un mapa de idoneidad del sitio, facilita la definición de los métodos y técnicas MAR, por lo cual ayuda en la definición de un proyecto ejecutivo en dimensiones y costos, así como beneficios potenciales en tiempo de la utilización de un sistema de recarga.

Por lo tanto, el poder determinar la factibilidad como fuente para recarga, en cantidad y calidad en los métodos de recarga y teniendo una herramienta automatizada que valore, permite tener la confiabilidad en los resultados obtenidos, es decir, tener la certidumbre que no se va a generar un impacto negativo que al paso de los años se pueda evidenciar mediante el acuífero.



6.2. Recomendaciones

Derivado del análisis, el método más viable para implementar es el de Represas de Arena, debido a que es una técnica con costo relativamente bajo, es de fácil aplicación o bien su proceso de construcción no es complejo y tiene la ventaja de poder combinarse con otro tipo de sistema funcional para que sea más eficiente, aunque la zona es típicamente urbana, existen áreas que pueden ser acondicionadas para su ejecución. Como segunda alternativa se recomienda el ASR ya que el mismo pozo de inyección puede ser utilizado para recuperación, la técnica recolecta agua en tiempos de lluvia y en su almacenamiento puede ser utilizado en periodos secos, su costo puede variar de medio a alto dado las características del suelo y lejanía de pozos existentes, seguido de un ASTR que la variación es que lleva un segundo pozo o más que es para recuperación lo que implica un mayor costo con mayor infraestructura, ambos pueden ser utilizado con el propósito de sostener áreas verdes o agua potable, requiere un diseño adecuado para evitar que los transportes de solutos obstruyan los pozos, finalmente el método de infiltración pozo a pozo por no ser un método de inyección directa sino que de infiltración lo que implica previamente agua de alta calidad debido a que su estructura puede ser más fácil obstruida.

Dado que los valores son estimados o definidos mediante tablas, es conveniente que, al cálculo de la estimación en sitio, se realicen estudios específicos donde la zona se plantee llevar el método de recarga y con eso poder calibrar los datos en la plataforma.

Aunque las herramientas facilitan y determina la factibilidad de utilización de las técnicas, es importante considerar, que su determinación puede estar sujeta a factores que no se consideraron en el momento, que, en vez de garantizar la ejecución de las mismos, sirven más como una adecuada orientación para toma de decisiones. Por lo que se requiere generar mayor número de datos y un amplio conocimiento de las técnicas MAR desarrollando su potencial para evitar efectos negativos.



Referencias

- Alazard et al. (2016). Investigation of recharge dynamics and flow paths in a fractured crystalline aquifer in semi-arid India using borehole logs: implications for managed aquifer recharge. *Springer*, 35-57.
- Alraggad and Jasem. (2010). Managed Aquifer Recharge (MAR) through Surface Infiltration in the Azraq Basin/Jordan. *Scientific Research*, 1057-1070.
- Antoniou et al. (2012). Hydrogeochemical Patterns, Processes And Mass Transfers During Aquifer Storage And Recovery (Asr) In An Anoxic Sandy Aquifer. *ELSEVIER*, 2435-2452.
- Aparicio, F. J. (1987). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Cuernavaca: LIMUSA S.A. DE C.V.
- Azizur et al. (2013). Hydrogeological analysis of the upper Dupi Tila Aquifer, towards the implementation of a managed aquifer recharge project in Dhaka City, Bangladesh. *Hidrogeology Journal*, 1072-1089.
- Bonilla. (2018). Variación horaria en las mediciones de caudales en la cuenca hidrográfica Jesús María con el método del molinete de copas. *Ciencias Ambientales*, 110-128.
- Bonilla et al. (2016). Application of a GIS Multi-Criteria Decision Analysis for the Identification of Intrinsic Suitable Sites in Costa Rica for the Application of Managed Aquifer Recharge (MAR) through Spreading Methods. *water*, 1-19.
- Borst and Haas. (2006). Hydrology of Sand Storage Dams A case study in the Kiindu catchment, Kitui District, Kenya . *Sand storage dam Kwa Kangesa in the Kiindu catchment*. Kenia, Africa.
- Camino, M. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la Provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*.
- Campos Aranda. (2010). *Introducción A La Hidrología Urbana*. San Luis Potosí: Daniel Francisco Campos Aranda.
- Campos Aranda, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí: Universitaria Potosina.
- Chairman and Gupta. (2011). *Rain Water Harvesting And Artificial Recharge*. New Delhi: Central Ground Water Board.
- CONAGUA. (2018). *Atlas Del Agua En Mexico*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2020). *Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado De Chihuahua*. Ciudad de México: CONAGUA.
- Custodio & LLamas. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega.
- D. e. (2018). Sixty Years Of Global Progress In Managed Aquifer Recharge. *Springer*, 1-30.



- Dillon et al. (2010). Managed Aquifer Recharge: Rediscovering Nature As A Leading Edge Technology. *Water Science and Technology*, 2338-2345.
- Dillon, e. a. (2018). Advances in multi-stage planning and implementing managed aquifer recharge for integrated water management. *Springer International Publishing AG*, 145-151.
- Escalante. (2006). La Gestión De La Recarga De Acuíferos En España: El Proyecto DINA MAR. *Tierra Y Tecnología*, 37-44.
- Escalante et al. (2014). Economic Assessment of Opportunities for Managed Aquifer Recharge Techniques in Spain Using an Advanced Geographic Information System (GIS). *Water*, 2021-2040.
- F. Escalante et al. (2018). La Recarga Gestionada De Los Acuíferos Como Una Técnica Polivalente Y Efectiva De Adaptación Al Cambio Climático. *RUMBO 20.30* (pp. 1-27). España: CONAMA.
- FAO. (2016). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2014*. Roma: FAO.
- Fetter. (2001). *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall.
- Flores et al. (2012). Efecto Del Estrés Hídrico Sobre El Crecimiento Y Eficiencia Del Uso Del Agua En Plántulas de Tres Especies Arbóreas Caducifolias. *Tierra Latinoamericana*, 343-353.
- Gómez, M. (2007). *Hidrología Urbana*. Barcelona: flumen.
- González y Mora. (2013). Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración. *GEOS*, 332-349.
- Guo et al. (2014). Simulated Effects Of Aquifer Heterogeneity On Asr System Performance. *Springer*.
- H13-10. (n.d.). Carta Geológico-Minera. *Servicio Geológico Mexicano*. Chihuahua, Chihuahua, México: SE.
- Heno et al. (2021). Stormwater Harvesting In Ephemeral Streams: How To Bypass Clogging And Unsaturated Layers. *Springer*, 1813-1830.
- Hidalgo et al. (2020). Evapotranspiración e intercambio de energía en un bosque templado de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 35.
- IMPLAN. (2013). *Plan De Desarrollo Urbano Del Centor De Población Chihuahua Visión 2040*. Chihuahua: Instituto Municipal De Planeación.
- IMTA. (2017). *Manejo De La Recarga De Acuíferos: Un Enfoque Hacia Latinoamérica*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua.
- J. Sallwey et al. (2018). Suitability Maps For Managed Aquifer Recharge: A Review Of Multi-Criteria Decision Analysis Studies. *NRC Research Press*, 138-150.
- Kalantari et al. (2010). Site Selection And Cost-Benefit Analysis For Artificial Recharge in The Baghmalek Plain, Khuzestan Province, Southwest Iran. *Springer*, 761-773.
- Linsley, K. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.



- Murillo. (2009). Turbidez Y Sólidos En Suspensión De Las Aguas De Escorrentia Susceptibles De Ser Utilizadas En La Recarga Artificial Del Acuífero Granular Profundo Subyacente A La Ciudad De San Luis Potosi México. *Instituto Geológico y Minero de España*, 169-184.
- NOM-011-CONAGUA-2015. (n.d.). Conservación Del Recurso Agua Que Establece Las Especificaciones Y El Método para Determinar La Disponibilidad Media Anual De Las Aguas Nacionales. *Diario Oficial De La Federación*. México: CONAGUA.
- NOM-014-CONAGUA-2003. (n.d.). REQUISITOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS CON AGUA RESIDUAL TRATADA. *Diario Oficial de la Federación*. México: CONAGUA.
- NOM-015-CONAGUA-2007. (n.d.). Infiltración Artificial De Agua A Los Acuíferos.- Características Y Especificaciones De Las Obras Y Del Agua . *Diario Oficial de la Federación*. México: CONAGUA.
- P.Dillon et al. (2009). *Managed Aquifer Recharge: An Introduction*. Australia: National Water Commission.
- Page et al. (2018). Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management. *WATER*, 1-16.
- Palma and Cruickshank. (2014). Managed Aquifer Recharge As a Key Element in Sonora River Basin Management, México. *American Society of Civil Engineers.*, 1-10.
- Palma et al. (2018). The Development Of A Managed Aquifer Recharge Project With Recycled Water For Chihuahua, México. *Springer*, 371-382.
- Palma Nava et al. (2014). Inventario De La Recarga Artificial En México. *AMH*.
- Peña et al. (2016). Recarga Artificial de Acuíferos en Alta Montaña. Las Amunas de Santa Eulalia. *Sociedad Geológica del Perú*, 1-4.
- Peter and Clark. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Ottawa Canada: CRC Press.
- Rahman et al. (2013). Hydrogeological analysis of the upper Dupi Tila Aquifer, towards the implementation of a managed aquifer-recharge project in Dhaka City, Bangladesh. *Springer*, 1071-1089.
- Reyes et al. (2009). Problemática Del Agua En Chihuahua: Una Propuesta. *CULCYT*, 35-41.
- Ringleb et al. (2016). Assessment of Managed Aquifer Recharge through Modeling—A Review. *Water*, 1-31.
- Sallwey et al. (2019). Suitability Mapping for Managed Aquifer Recharge: Development of Web-Tools. *water*, 1-11.
- Stefan and Ansems. (2017). Web-Based Global Inventory Of Managed Aquifer Recharge Applications. *Springer*, 10.
- un-igrac.org. (n.d.). *igrac*. Retrieved from International Ground Resources Assessment Centre: <https://un-igrac.org/>



Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos*. México D.F.: ALFAOMEGA.
Villon Béjar, M. (2002). *Hidrología*. Lima,Peru: Villón.