

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**ZONAS POTENCIALES DE RECARGA: ESTUDIO DE CASO
RH34 CUENCAS CERRADAS DEL NORTE, CHIHUAHUA,
MÉXICO.**

POR:

ING. DENNIS EVELIO GÁCITA PÉREZ

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. MIGUEL ÁNGEL MÉNDEZ ALVARADO

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

JUNIO DE 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Zonas potenciales de recarga: estudio de caso RH-34 cuencas cerradas del norte, Chihuahua, México. Tesis presentada por Ing. Dennis Evelio Gácita Pérez como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez

Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes

Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez

Coordinador(a) Académico

M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado

Director(a) de Tesis

Mayo 2025

COMITÉ

M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado

Dr. Humberto Silva Hidalgo

Dr. Adán Pinales Munguía

Dr. Alfredo Granados Olivas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

28 de mayo de 2025.

ING. DENNIS EVELIO GÁCITA PÉREZ
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de estudio de caso para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **“Zonas Potenciales de Recarga: Estudio de Caso RH34 Cuencas Cerradas del Norte, Chihuahua, México.”**.

Índice de Contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

1.2.2. Objetivos específicos

1.3. Justificación

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



+uach



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 2: Descripción del área de estudio

2.1 Ubicación físico - geográfica del área de estudio

2.1.1. Vías de comunicación

2.2. Climatología de la zona

2.3. Edafología

2.4. Usos de suelos y vegetación

2.5. Regiones fisiográficas

2.6. Geología

2.7. Hidrografía

2.8. Geomorfología

2.8.1. Patrones de drenaje

2.8.2. Pendientes

Capítulo 3: Fundamentación Teórica

3.1. Ciclo del agua

3.2. Generalidades sobre la recarga de acuíferos

3.2.1. Tipos de recarga

3.2.2. Divisiones características del suelo según la saturación

3.2.3. Parámetros que intervienen en la recarga

3.2.4. Áreas de recarga y descarga

3.3. Litología

3.3.1. Generalidades

3.3.2. Rocas ígneas

3.3.3. Rocas sedimentarias

3.3.4. Rocas metamórficas

3.4 Lineamientos (LD)

3.4.1. Generalidades

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

- 3.4.2. Análisis de los lineamientos a partir el Modelo Digital de Elevación
- 3.5. Densidad de drenaje (D_d)
 - 3.5.1. Definición de cuenca hidrográfica y generalidades
 - 3.5.2. Patrones de drenaje
 - 3.5.3. Análisis de la D_d
- 3.6. Uso de suelo y vegetación
 - 3.6.1. Modelo de *Random Forest*
 - 3.6.2. Ventajas de Random Forest
- 3.7. Análisis de las pendientes a partir del Modelo de elevación del relieve
 - 3.7.2. Generalidades de los modelos de elevación del relieve
 - 3.7.3. Pendientes y disección vertical del relieve
- 4. Metodología de la investigación
- 5. Resultados y discusión
 - 5.1. Análisis de las diferentes litologías
 - 5.2. Análisis de la densidad de lineamientos
 - 5.3. Densidad de drenaje
 - 5.4. Uso de suelos y vegetación
 - 5.5. Análisis de las pendientes y la D_v
 - 5.6. Evaluación de las zonas potenciales de recarga



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencias
- Glosario
- Curriculum Vitae

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

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 Dios por siempre guiarme en la vida.

A mis abuelos Orlando León Pérez Jorge y Aida Justa Llanes Pina, los que a lo largo de los años me han inculcado el valor de los estudios.

A mi esposa Lorelys Fernández Sánchez que sin ella no hubiese sido posible obtener estos resultados.

A mi familia por apoyarme incondicionalmente.

Agradecimientos

Mi agradecimiento especial a SECIHTI, por apoyarme durante todo el proceso de los estudios de la maestría, sin su respaldo hubiese sido imposible cumplir este sueño.

A todos los profesores de la Maestría de Ingeniería en Hidrología, los cuales sin dudas han agregados valiosos valores humanos y profesionales en mi persona.

A mi director de tesis y tutor Miguel Ángel Méndez Alvarado, por su apoyo incondicional durante el trayecto de la maestría y la elaboración de este caso de estudio.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua, en especial al coordinador de la maestría: Miguel Ángel González Núñez, por darme esta maravillosa oportunidad y confiar en mí.

A México y Chihuahua, por acogernos como hijos más de esta bella tierra.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar el potencial de recarga de acuíferos en la Región Hidrológica RH-34 “Cuencas Cerradas del Norte”, localizada en el norte del estado de Chihuahua, México, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multivariado de cinco componentes hidrogeológicos clave: litología, densidad de drenaje, pendiente, uso de suelo y vegetación, y lineamientos estructurales. La metodología empleada consistió en la recolección, clasificación y ponderación de capas temáticas rasterizadas, las cuales fueron integradas en un modelo espacial que permitió identificar y cartografiar las zonas con mayor capacidad de recarga hídrica.

Los resultados obtenidos revelan que un 11% del área total presenta condiciones óptimas para la recarga natural del acuífero, concentrándose en zonas de piedemonte con características litológicas y geomorfológicas favorables. Por otro lado, se identificó que el 13% del territorio posee un potencial nulo de recarga, principalmente en zonas montañosas o urbanizadas, donde las pendientes pronunciadas o la impermeabilidad del suelo limitan la infiltración. El modelo generado constituye una herramienta técnica de gran utilidad para la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico en la región, especialmente en un contexto de sobreexplotación de acuíferos y cambio climático. La investigación concluye que el enfoque metodológico empleado es replicable en otras regiones con problemáticas similares, y destaca la necesidad de integrar el conocimiento científico con estrategias de manejo territorial para preservar las fuentes subterráneas de agua. Asimismo, se recomienda el desarrollo de políticas públicas enfocadas en la conservación de las zonas de recarga, el uso racional del agua y la implementación de tecnologías de monitoreo hidrológico.

Índice de Contenido

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Índice de Tablas.....	VIII
Índice de Figuras.....	IX
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Justificación	5
Capítulo 2: Descripción del área de estudio	6
2.1 Ubicación físico - geográfica del área de estudio	6
2.1.1. Vías de comunicación.....	8

2.2. Climatología de la zona	9
2.3. Edafología.....	11
2.4. Usos de suelos y vegetación	16
2.5. Regiones fisiográficas.....	18
2.6. Geología.....	20
2.7. Hidrografía.....	22
2.8. Geomorfología.....	25
2.8.1. Patrones de drenaje	26
2.8.2. Pendientes	27
Capítulo 3: Fundamentación Teórica.....	29
3.1. Ciclo del agua	29
3.2. Generalidades sobre la recarga de acuíferos.....	30
3.2.1. Tipos de recarga.....	30
3.2.2. Divisiones características del suelo según la saturación.....	31
3.2.3. Parámetros que intervienen en la recarga	31
3.2.4. Áreas de recarga y descarga	32
3.3. Litología.....	33
3.3.1. Generalidades	33
3.3.2. Rocas ígneas	34
3.3.3. Rocas sedimentarias.....	35
3.3.4. Rocas metamórficas.....	37

3.4 Lineamientos (LD).....	40
3.4.1. Generalidades	40
3.4.2. Análisis de los lineamientos a partir el Modelo Digital de Elevación	42
3.5. Densidad de drenaje (D_d).....	43
3.5.1. Definición de cuenca hidrográfica y generalidades.....	43
3.5.2. Patrones de drenaje	45
3.5.3. Análisis de la D_d	47
3.6. Uso de suelo y vegetación	48
3.6.1. Modelo de <i>Random Forest</i>	49
3.6.2. Ventajas de Random Forest	50
3.7. Análisis de las pendientes a partir del Modelo de elevación del relieve	51
3.7.2. Generalidades de los modelos de elevación del relieve.....	51
3.7.3. Pendientes y disección vertical del relieve	53

4. Metodología de la investigación.....	55
5. Resultados y discusión.....	58
5.1. Análisis de las diferentes litologías	59
5.2. Análisis de la densidad de lineamientos	61
5.3. Densidad de drenaje.....	63
5.4. Uso de suelos y vegetación.....	63
5.5. Análisis de las pendientes y la Dv	66
5.6. Evaluación de las zonas potenciales de recarga	68
Conclusiones.....	70
Recomendaciones	72
Referencias	73
Glosario.....	77
Curriculum Vitae	79

Índice de Tablas

Tabla 1 Disposición geopolítica de cada uno de los municipios que conforman la RH-34. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos del INEGI.....	7
Tabla 2 Clasificación de los materiales componentes de las rocas sedimentarias. Modificado de: (Gallegos J. A., 1995).....	35
Tabla 3 Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño del clasto. Modificado de: Tarbuck & Lutgens, 2005.	36
Tabla 4 Diferentes tipos de drenaje existentes. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.	45
Tabla 5 Valores reclasificados de la Dd en función del aporte a la recarga de aguas subterráneas. Modificado de Kumar Singh, Zeddies, Shankar, & Griffiths, 2019.....	47
Tabla 6 Influencia de los diferentes usos de suelo en función de la recarga potencial de agua subterránea Modificado de Kumar Singh, Zeddies, Shankar, & Griffiths, 2019.....	48
Tabla 7 Ejemplo de tabla de ponderación para cada una de las capas analizadas Modificado de Méndez Alvarado, Gómez Sánchez, Silva Hidalgo, & Pinales Munguía, 2022.	56
Tabla 8 Ponderación de cada una de las componentes analizadas.	58

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	6
Figura 2 Regiones hidrológicas colindantes con el área de investigación. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del SIATL.....	8
Figura 3 Distribución de los diferentes climas, así como la configuración de isoyetas presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	10
Figura 4 Unidades de suelos presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	12
Figura 5 Usos de suelos y vegetación presentes en al RH-34. Elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 en Google Earth Engine.	17
Figura 6 Regiones fisiográficas presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	19
Figura 7 Mapa geológico del área de investigación. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM).....	21
Figura 8 Cuencas hidrográficas y principales cursos fluviales de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	24
Figura 9 Ejemplo de cómo los esfuerzos tensionales han alargado y fracturado la corteza en numerosos bloques. El movimiento a lo largo de esas fracturas ha inclinado los bloques produciendo alineaciones montañosas paralelas denominadas montañas limitadas por fallas. Los bloques hundidos (grabens) forman cuencas, mientras que los bloques elevados (horst) se erosionan y originan una topografía montañosa accidentada, tal y como ocurre en gran parte del territorio del área de estudio. Tomado de: Tarbuck & Lutgens, 2005.	25
Figura 10 Comportamiento de las pendientes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.....	28
Figura 11 Diagrama explicativo de las diferentes componentes ciclo hídrico. Fuente: Tomado del USGS, 2024.	29
Figura 12 Zonas del perfil de suelo según el grado de saturación. Fuente: Tomado del Proyecto de educación ambiental: “Cambio Climático”.	31

Figura 13 Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea. Tomado de: Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea: un paradigma, del autor Dr. Marcos Adrián Ortega Guerrero.	33
Figura 14 Serie de reacción de Bowen de los minerales constituyentes de las rocas ígneas. Tomado de: www.studymaster.com.	35
Figura 15 Ejemplo de metamorfismo de contacto e hidrotermal produciendo una zona de alteración denominada aureola. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	38
Figura 16 Existencia de un metamorfismo regional debido a la colisión de dos placas tectónicas. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005)	38
Figura 17 Metamorfismo dinámico en una zona de fallas por el rumbo. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	39
Figura 18 Ejemplo de falla normal donde se aprecia el escarpe de falla resultante en una cadena montañosa. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.....	40
Figura 19 Bloque diagrama que evidencia el comportamiento de las fallas con desplazamiento horizontal. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.....	41
Figura 20 Diagrama que evidencia el comportamiento de una falla inversa. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.	41
Figura 21 Procedimientos para delimitar fallas y fracturas a partir del sombreado del relieve. Modificado de: Gallegos et al. 2008)	42
Figura 22 Representación gráfica de una cuenca hidrológica. Obtenido de: Enciclopedia Colaborativa Cubana de la Ciencia (ECURED).....	43
Figura 23 Estructura jerárquica de una cuenca. Obtenido de: Global Water Partnership-Sociedad Geográfica de Lima (2011).....	43
Figura 24 Secciones divisorias del cauce principal de una cuenca. Tomado de: http://kalipedia.com/klpgeogra_17.Kes#	44
Figura 25 Árboles de decisión de un sistema Random Forest. Tomado de https://interactivechaos.com/	49
Figura 26 Representación esquemática de los modelos de rejillas regulares (a) y los triángulos irregulares (b). Tomado de: Villanueva, 2020.....	51
Figura 27 Ejemplo de un modelo de elevación desarrollado a partir de una red de triángulos irregulares (TIN) Tomado de: Gutiérrez, 2016.....	52
Figura 28 Ejemplo de malla resultante en la generación de la superficie del relieve. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, 2008	53

Figura 29 Esquema representativo del cálculo de pendiente.	53
Figura 30 Ventana empleada por el software para determinar las derivadas de las matrices de elevación. Tomado de: Villanueva, 2020.....	54
Figura 31. Sobreposición de cada una de las celdas de las componentes rasterizadas analizadas con anterioridad. Tomado de Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2016.	55
Figura 32 Diagrama de flujo que evidencia la secuencia del procedimiento a emplear en la realización de la investigación.	57
Figura 33 Ponderación de las litologías según sus características hidrológicas. Elaboración propia	60
Figura 34 Densidad de fallas reclasificadas. Elaboración propia.	62
Figura 35 Densidad de la red de drenaje reclasificada en 5 clases. Elaboración propia.	64
Figura 36 Usos de suelos ponderados según la posibilidad de infiltración.	65
Figura 37 Análisis de la pendiente del terreno y la Dv. Elaboración propia.	67
Figura 38 Áreas potenciales de recarga de la RH - 34. Elaboración propia.	69

Capítulo 1: Introducción

La recarga artificial o natural de las fuentes de aguas subterránea constituye uno de los principales mecanismos de conservación del ciclo hidrodinámico de los acuíferos. A nivel global se han determinado diferentes estrategias con la finalidad de aumentar efectividad de este procedimiento. Freeze & Cherry, (1979) establecieron que la recarga de aguas subterráneas se produce cuando el agua se infiltra desde la zona no saturada hacia la saturada, alejándose progresivamente del nivel freático.

Existen múltiples factores que afectan la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea en una zona determinada, dentro de los que destacan la forma del relieve (geomorfología), las litologías presentes, usos de suelos y vegetación, grado de fracturamiento y clima (Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2016). Con el transcurso de los años, y el desarrollo de la ciencia y técnica, se han mejorado diversas técnicas que posibilitan localizar áreas factibles para la recarga de aguas subterráneas, a partir del empleo de sensores remotos y softwares de información geográfica. Actualmente el empleo de los sensores remotos ha sustituido con creces las investigaciones de campo debido a la factibilidad del empleo de estas herramientas y la confiabilidad de los resultados obtenidos en diversas áreas. (Li, Abdelkareem, & Al-Arifi, 2023).

Las regiones áridas en el planeta cubren alrededor de un 35 % de la superficie de este, teniendo por característica un ambiente carente de agua. Esto sin lugar a duda provoca un alto grado de competitividad por el recurso hídrico, siendo el agua subterránea, la principal fuente de agua en estas regiones (Kariyawasam, Basnayake, Wanniarachchi, Sarukkalige, & Rathnayake, 2022).

El estado de Chihuahua, en especial la Región Hidrológica 34 denominada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como Cuencas Cerradas del Norte, se caracteriza por la presencia de un clima desfavorable para la ocurrencia de precipitaciones, lo que a su vez conlleva a tasas de evaporación elevadas. Esto provoca la sobreexplotación del agua subterránea al suplir las demandas socioeconómicas y ambientales en el área, denotando un marcado descenso en los niveles piezométricos de los acuíferos presentes en esta región. Por esta razón, resulta vital la definición de zonas factibles para la aumentar la recarga, ya sean

medios naturales o inducidos, lo que posibilitará la recuperación del nivel freático en la zona manteniendo el equilibrio hidrodinámico de los acuíferos subyacentes a la RH34.

1.1. Antecedentes

La determinación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas mediante sistemas de información geográfica (GIS) ha experimentado importantes avances en los últimos años, lo que la convierte en un elemento crucial en la gestión sostenible de los recursos hídricos. El enfoque integral de SIG actualmente facilita la integración de datos espaciales y temporales de diferentes fuentes, lo que permite un análisis multidimensional y detallado de posibles sitios de recarga de aguas subterráneas. Estos permiten recopilar y analizar información de topografía, uso de la tierra, geología e hidrología para comprender los factores que afectan la infiltración y el almacenamiento del agua.

En el año 2006 Shaban *et al.*, abordaron la recarga de agua desde la superficie terrestre hacia las zonas subterráneas en el Líbano Occidental, en un área de aproximadamente 5,000 km². La investigación se centró en la importancia de este proceso dentro del ciclo hidrológico y la necesidad de una gestión comprensiva que integrara datos espaciales y factores contribuyentes para la evaluación del potencial de recarga (PR) de manera efectiva. Establecieron en su investigación los siguientes factores: lineamientos y densidad de frecuencia de drenajes, características litológicas del terreno, dominios kársticos presentes en la zona y el uso de la tierra y cobertura vegetal. La determinación de estos factores se realizó mediante la aplicación de teledetección utilizando imágenes satelitales (Landsat 7 ETM y SPOT) y fotos aéreas, procesadas con software especializados como ERDAS Imagine y Arc View de ESRI. El empleo de estas herramientas permitió la combinación de datos espaciales y temáticos lo que posibilitó evaluar el potencial de recarga de aguas subterráneas en el área de estudio.

Yeh *et al.*, (2015) analizaron el potencial de recarga de aguas subterráneas en la cuenca del río Hualian, Taiwán, utilizando un enfoque de Sistemas de Información Geográfica (GIS). Se identificaron y evaluaron cinco factores clave que influyeron en la recarga: litología, uso del suelo, lineamientos, drenaje y pendiente. A través de este análisis, se determinó que aproximadamente el 1.2% del área de estudio poseía un excelente potencial de recarga, mientras que el 11.6% y el 11.7% se clasificaron como buenas y moderadas,

respectivamente. Por otro lado, el 45.6% del área se consideró con un pobre potencial de recarga. Los resultados indicaron que las zonas con mayor capacidad de recarga se concentraron en el área del valle Huatung, donde se observó una distribución favorable de estratos gravosos y tierras agrícolas con alta capacidad de infiltración. Además, se destacó que la concentración de drenaje en esta región también contribuyó a la recarga del sistema de aguas subterráneas. En contraste, las regiones intermedias mostraron menor importancia en términos de recarga, debido a la presencia de esquistos y pizarra fracturada. El estudio subrayó la importancia de comprender las características y el uso de los recursos hídricos en la cuenca, dado que la mayor parte del agua superficial se utilizó para fines agrícolas, mientras que el agua subterránea se destinó a usos domésticos e industriales. En conclusión, el enfoque integrado utilizado en este estudio proporcionó una visión clara sobre las áreas con potencial de recarga de aguas subterráneas, lo que podría ser útil para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

Kabeto *et al.*, (2022) aplicaron la metodología enunciada en los casos de estudio anteriores, analizando factores como: la litología, el uso del suelo, la pendiente y la densidad de drenaje, para identificar áreas con alta disponibilidad de agua subterránea. Los resultados indicaron que el 61.27% del área estudiada presentaba un alto potencial de recarga, con una coincidencia del 87.61% entre los datos de pozos y las zonas identificadas. El estudio destaca la efectividad de las metodologías GIS en la integración de múltiples criterios para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos. Además, resalta la importancia de estas herramientas en la planificación sostenible del agua, especialmente en regiones vulnerables a la escasez hídrica. Este enfoque proporciona una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de manejo de agua subterránea, contribuyendo a la sostenibilidad y seguridad hídrica en contextos similares.

En el estado de San Luis Potosí, México; Uc Castillo *et al.*, (2022) abordaron la delineación de zonas de potencial de agua subterránea (GWPZs) en una cuenca semiárida de esta entidad; utilizando enfoques de teledetección, sistemas de información geográfica (GIS) y el proceso analítico jerárquico (AHP). Se destacó la importancia de la geología y el índice de humedad topográfica en la infiltración de agua, así como el impacto del uso del suelo, especialmente la minería y la urbanización, en la dinámica hídrica de la región. Además, se señaló que el 84% del suministro de agua proviene de acuíferos, lo que resalta la necesidad

de una gestión sostenible para mitigar la sobreexplotación y mejorar la disponibilidad de recursos hídricos en el área.

A través de un proceso de reclasificación y asignación de valores de potencial de recarga Méndez y otros autores, generaron un mapa que categoriza las áreas del acuífero Meoqui – Delicias en función de su capacidad para contribuir a la recarga; destacando la importancia de una gestión sostenible del recurso hídrico en un contexto de aridez y alta demanda de extracción de agua subterránea. Los resultados del estudio se plasmaron en cinco categorías: nula, baja, moderada, buena y excelente. Este mapa se elaboró a partir de la superposición de capas de datos reclasificados, donde cada capa recibió un valor inicial y un peso asignado, afectado por un factor de influencia que reflejó la interacción entre los componentes. La investigación reveló que las áreas con mayor capacidad de recarga se localizan en las zonas de pie de monte, donde la combinación de estratos de grava y drenaje favorece la infiltración de agua (Méndez Alvarado, Gómez Sánchez, Silva Hidalgo, & Pinales Munguía, 2022).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el potencial de recarga de acuíferos mediante el análisis en GIS de cinco componentes hidrogeológicos para la Región Hidrológica RH34: “Cuencas Cerradas del Norte” y la distribución espacial de la capacidad potencial de recarga mediante un mapa para el Noroeste del Estado de Chihuahua.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Analizar las firmas espectrales de imágenes satelitales Landsat 8 de la RH34 para determinar los diferentes usos de suelos (USV).
- b) Identificar las unidades edafológicas presentes en el área de estudio.
- c) Determinar las principales fallas y fracturas existentes en la región para denotar los principales rasgos físicos del relieve que posibiliten enmarcar áreas factibles para la recarga.
- d) Analizar la densidad de corrientes en la zona.

- e) Realizar un mapa de disección vertical del relieve que posibilite exponer las diferentes estructuras morfológicas.
- f) Elaborar un mapa litológico de las diferentes unidades geológicas existentes en la zona de estudio.
- g) Asignar ponderaciones de influencia a los componentes de: geología, USV, lineamientos, geomorfología, edafología y densidad de drenaje que permitan demarcar las zonas potenciales de recarga.

1.3. Justificación

La porción norte del estado de Chihuahua, debido a su condición climática árida y semiárida, depende del agua subterránea para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de la región. Dentro de las principales actividades, destaca la rama agrícola, teniendo la principal demanda del recurso hídrico con aproximadamente una asignación de un 97% de este (Manzanares Rivera, 2016).

Actualmente 11 de los acuíferos conformantes de la Región Hidrológica 34 presentan una descarga promedio mayor a la recarga media anual, encontrándose estos en déficit (CONAGUA, Gerencia de aguas subterráneas, 2024). Sin dudas, esta sobreexplotación constituye una problemática que amenaza la economía y sociedad de la región. Por esta razón resulta vital emplear nuevas técnicas, mediante el uso de GIS, que permitan localizar zonas factibles y contribuir así con la generación de nuevos conocimientos acerca de la recarga de estos.

Capítulo 2: Descripción del área de estudio

2.1 Ubicación físico - geográfica del área de estudio

La Región Hidrológica 34 “Cuencas Cerradas del Norte” se ubica en la porción más septentrional de la República Mexicana (**Figura 1**), entre los paralelos $27^{\circ}59'56''$ y los $31^{\circ}47'10''$ de latitud norte y los meridianos $109^{\circ}01'27''$ y $104^{\circ}48'47''$ de longitud oeste. La misma se localiza más específicamente en la parte norte del estado de Chihuahua, abarcando además una pequeña franja de la parte noreste del estado de Sonora. La zona ocupa un área aproximada de $88,981 \text{ km}^2$. Cabe destacar la colindancia de la zona con los Estados Unidos de América al norte, lo cual resalta el interés binacional del área investigada.

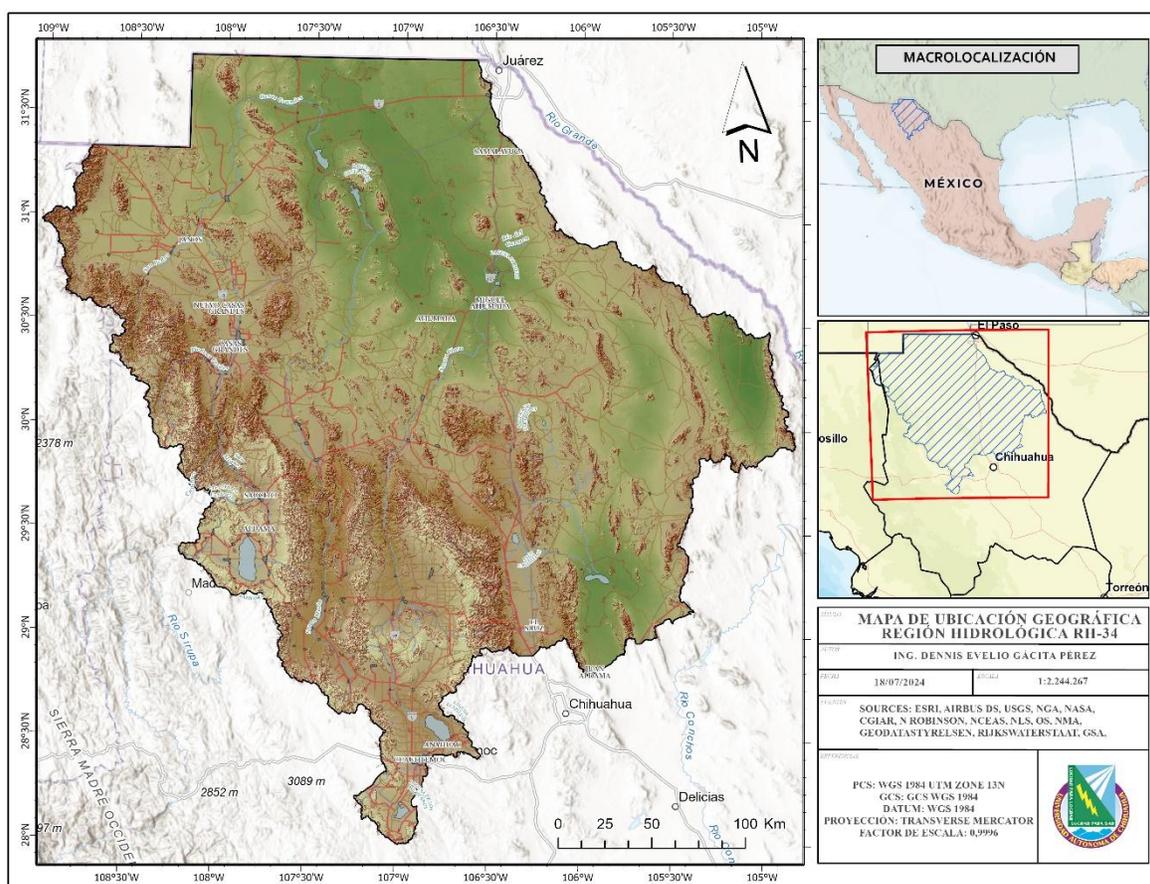


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.

Geopolíticamente comprende 27 municipios del estado de Chihuahua y 1 municipio del estado de Sonora. La **Tabla 1** muestra cada uno de los municipios comprendidos, así como, el área y porción que representa de la extensión total del municipio.

Tabla 1 Disposición geopolítica de cada uno de los municipios que conforman la RH-34. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos del INEGI.

Nombre del municipio	Área ocupada en la cuenca (km²)	Área total del municipio(km²)	
Galeana	1,674.48	1,674.48	100.00%
Ascensión	12,877.23	12,877.23	100.00%
Ahumada	16,880.05	16,880.05	100.00%
Nuevo Casas Grandes	2,636.12	2,636.12	100.00%
Ignacio Zaragoza	2,867.20	2,867.20	100.00%
Buenaventura	7,903.98	7,903.98	100.00%
Bachíniva	936.53	936.54	100.00%
Gómez Farías	866.64	866.64	100.00%
Namiquipa	4,837.38	4,847.93	99.78%
Janos	7,119.19	7,449.02	95.57%
Cuauhtémoc	3,324.05	3,614.13	91.97%
Casas Grandes	3,169.46	3,740.89	84.72%
Juárez	2,565.43	3,567.85	71.90%
Chihuahua	4,538.17	8,368.82	54.23%
Coyame del Sotol	6,218.85	11,645.74	53.40%
Riva Palacio	1,186.56	2,285.86	51.91%
Cusihuirachi	765.20	1,594.66	47.99%
Aldama	4,319.81	9,229.72	46.80%
Guadalupe	2,005.24	6,010.72	33.36%
Matachí	98.77	718.48	13.75%
Madera	1,198.19	8,766.87	13.67%
Agua Prieta	390.01	3,943.07	9.89%
Temósachi	260.37	4,322.54	6.02%
Carichí	146.08	2,583.83	5.65%
Guerrero	171.15	5,722.89	2.99%
Ojinaga	57.98	6,754.93	0.86%
San Francisco de Borja	6.45	1,310.67	0.49%
Gran Morelos	0.14	485.44	0.03%

La RH - 34 limita al norte con Estados Unidos de América, al oeste con la RH-09 “Sonora Sur”. Los flancos sur y este colindan con la RH-24 “Bravo Conchos”. La **Figura 2** muestra la disposición administrativa mencionada anteriormente.

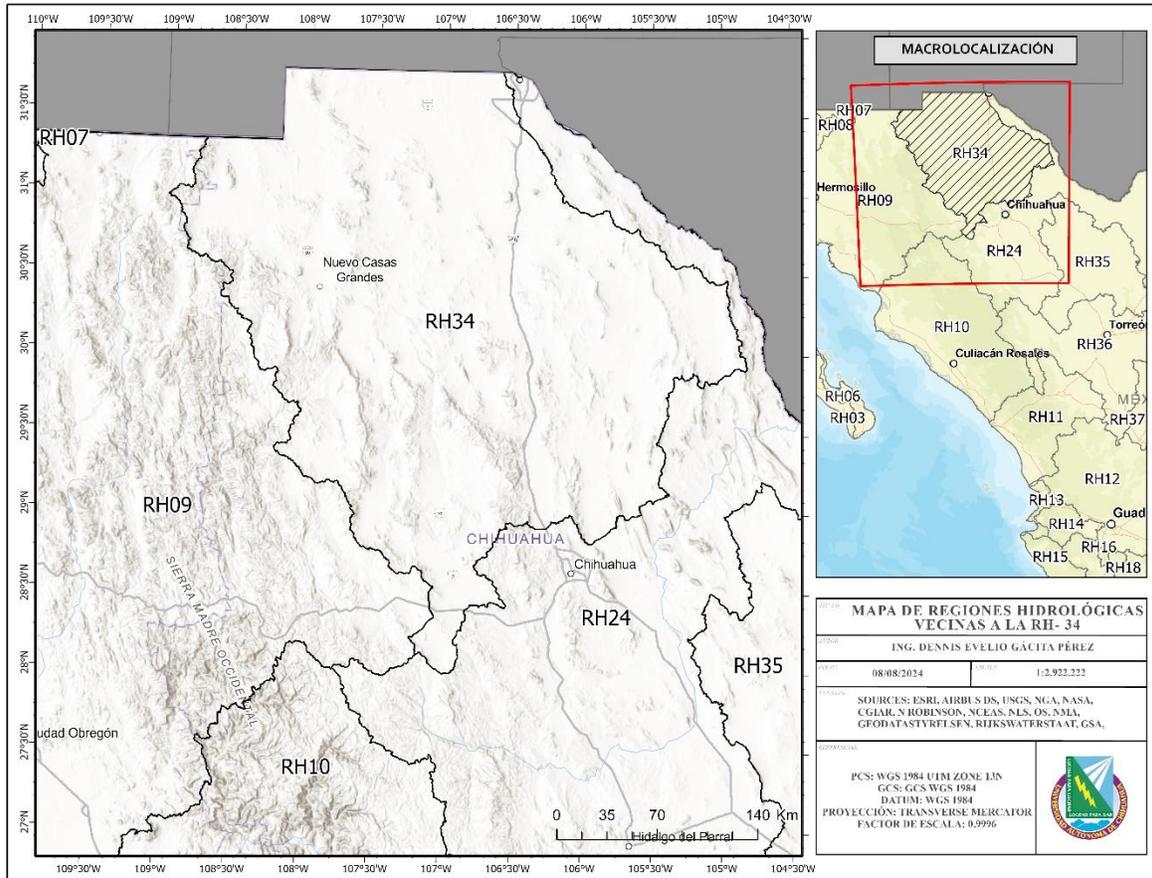


Figura 2 Regiones hidrológicas colindantes con el área de investigación. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del SIATL.

2.1.1. Vías de comunicación

Entre las principales rutas de acceso se encuentran la Carretera Federal número 45, la cual cruza la zona de sur a norte uniendo la capital del estado y a Ciudad Juárez. Al norte del área de investigación destaca la Carretera Federal número 2, esta vialidad se extiende de este a oeste enlazando Ciudad Juárez – Janos – Agua Prieta, este último asentamiento perteneciente a Sonora.

2.2. Climatología de la zona

Aproximadamente un 75% del área se posiciona bajo el dominio de un clima extremadamente seco con un régimen de precipitaciones que alcanza apenas los 200 mm en la porción este, aumentando los valores en consecuencia a la cercanía a la Sierra Madre Occidental. Es en esta última zona, donde rige un clima más fresco con características de semifrío y templado, debido a la existencia de un piso altitudinal mayor.

El tipo de clima Muy seco (BW), presenta cuatro subtipos de climas, denominados Muy secos templados [BWkw, BWkw (x'), BWkw (w), BWkw (x')], que se identifican por la presencia de una evaporación en mayor cuantía con respecto a la precipitación. La baja humedad obedece principalmente de la insuficiente precipitación y la temperatura. Están clasificados como muy extremos, por su oscilación térmica media anual mayor a los 14°C.

Las clasificaciones de clima seco y semiseco (BS), presentan tres subcategorías [BSokw, BS1k''w (w), BS1kw (x'), BSok''w]. Las temperaturas en el año promedian valores entre los 12 y 18 °C, llegando en invierno hasta los -3 °C. Las precipitaciones en invierno rondan valores comprendidos entre 5 y los 10.2 % de las lluvias anuales, incentivadas fundamentalmente por la llegada de frentes fríos a la región.

Por último, el clima templado (C) se encuentra dominando zonas de la Sierra Madre Occidental con las siguientes subcategorías [Cb' (w1) x', C (w0) (w) a, C (w0) x'a]. Estos son climas semifrío subhúmedo, con la ocurrencia de veranos frescos y prolongados. La temperatura media en el año alcanza un valor de 12 °C, mientras que la mínima puede llegar a descender hasta -20 °C en invierno.

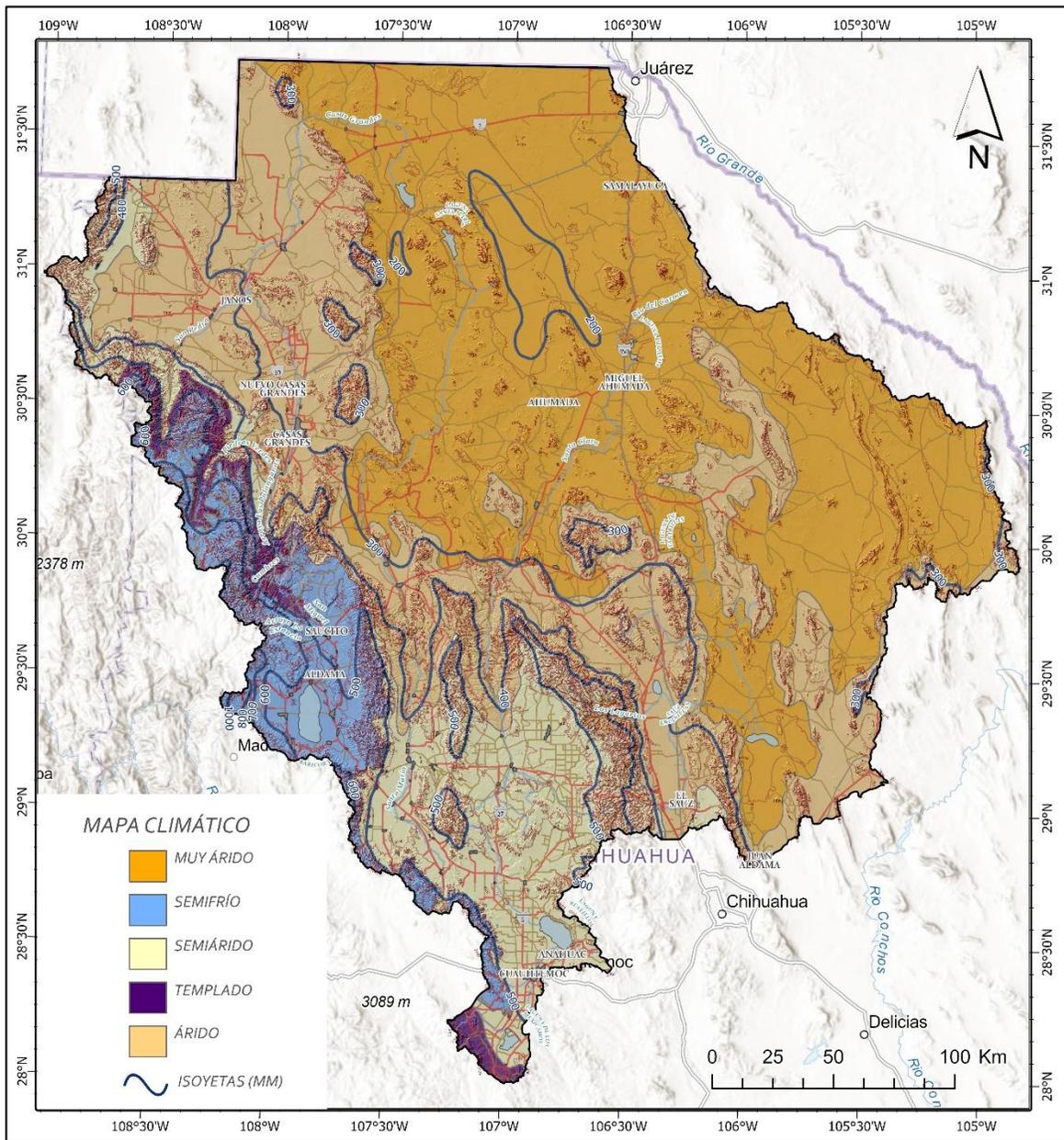


Figura 3 Distribución de los diferentes climas, así como la configuración de isoyetas presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.

2.3. Edafología

Según el conjunto de datos vectoriales de edafología escala 1:250,000 publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la zona de estudio se encuentran presente 14 unidades de suelos (*Figura 4*).

Aerosol

Corresponden a los más expandidos en la zona, ocupando un área de 24,643.4 km² representado un 27.7 % del área de estudio. Según INEGI, 2004; estos se caracterizan por localizarse en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Se componen generalmente por una capa superficial de color claro debido a la baja concentración de materia orgánica. Subyaciendo la capa principal puede existir un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial; con presencia en algunos casos de cristales de yeso o cal. Generalmente son de baja susceptibilidad a la erosión, exceptuando zonas con pendientes pronunciadas.

Regosol

Es el segundo grupo de suelo de mayor extensión, localizándose fundamentalmente en la porción norte del área de estudio. Esta unidad de suelo ocupa un área de 20,741.1 km², correspondiendo al 23.3 % de la zona. Los regosoles son suelos de formación reciente, generalmente resultado del depósito de detritos de roca y arena acarreadas por el agua; de ahí que se localicen principalmente al pie de las sierras. La consecuente sequedad y dureza del suelo es desfavorable para la germinación y el establecimiento de las plantas. El agua, al no poder penetrar el suelo, se desplaza por la superficie provocando erosión (SEMARNAT, 2024).

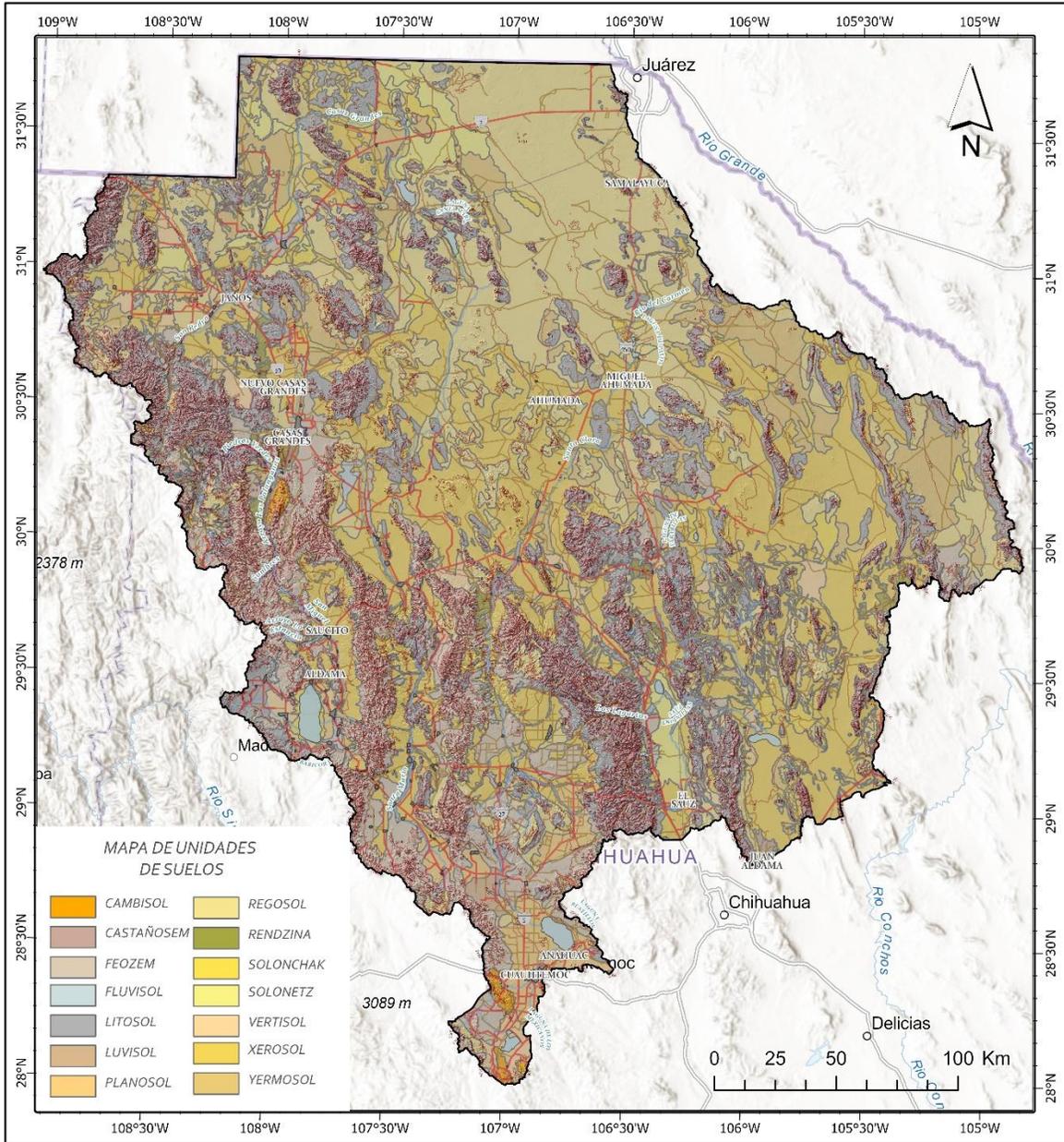


Figura 4 Unidades de suelos presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.

Litosoles

Los litosoles o leptosoles se extienden por 16,652.8 km², lo cual representa un 18.7% de la zona de interés. Se caracterizan por su poco desarrollo, llegando alcanzar espesores máximos de 10 cm. En los principales sistemas montañosos se encuentran estos suelos, en lugares donde las pendientes y la constante acción de procesos erosivos imponen una restricción a la formación del suelo (SEMARNAT, 2024).

Feozem

Los suelos de tipología Feozem se localizan fundamentalmente hacia la porción suroccidental del área, hacia las inmediaciones de la Sierra Madre Occidental. Estos ocupan un 13.0% del área con 11,589.8 km². La característica principal de estos es la presencia de un horizonte mólico o mullido en la parte superior del perfil que se caracteriza por un color oscuro. Generalmente presentan espesores que rondan los 18 cm. Normalmente son suelos muy bien estructurados (estructura granular y nuciforme) (Hernández Jiménez, y otros, 2012).

En menor cuantía aparecen dispersos en la región suelos de tipo Cambisol, Castañosem, Fluvisol, Luvisol, Planosol, Rendzina Solonchak, Solonetz, Vertisol y Yermosol.

Cambisol

Se ubican en pequeñas franjas al sur del área. Los Cambisoles son suelos con una diferenciación marcada de horizontes; se hallan en una etapa de transición de un suelo joven a un suelo maduro con un horizonte B árgico, nátrico, espódico o ferrálico (Fernández Pozo & García Navarro, 1999). Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Por lo general, estos suelos son buenos con fines agrícolas, siendo usados intensamente.

Castañosem

Esta tipología de suelo se localiza en forma de franja al norte de la ciudad de Juan Aldama. Según INEGI (2015), son suelos de clima árido o semiárido, con una capa superficial gruesa, negra o muy oscura y rica en carbono orgánico, fértiles en magnesio,

potasio y carbonatos en el subsuelo. Se emplean en la agricultura de riego o temporal y en el cultivo de pastizales.

Fluvisol

El término fluvisol deriva del vocablo latino "fluvius" que significa río, haciendo alusión a que estos suelos están desarrollados sobre depósitos aluviales. Se encuentran en cimas y en laderas abruptas como los Regosoles y son suelos de derivados de aluviones recientes. Contiene menos del 18% de arcilla y más del 65% de arena. El material original lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre o marino. Se encuentran en áreas periódicamente inundadas, a menos que estén protegidas por diques, de llanuras aluviales, abanicos fluviales y valles pantanosos. Aparecen sobre todos los continentes y cualquier zona climática (SEMARNAT, 2024).

Luvisol

Se localizan en una porción al noroeste de la ciudad de Cuauhtémoc en las inmediaciones de la Carretera Federal 5. Suelen tener coloraciones rojizas, grises o pardos claros. Generalmente son susceptibles a la erosión, fundamentalmente los que presentan un alto contenido de arcilla y los situados en pendientes fuertes. Los Luvisoles son habitualmente fértiles para el empleo en la agricultura. Son el quinto grupo de suelos más extendido sobre la República Mexicana, teniendo su distribución principal en superficies de bosques de pino en la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2015).

Planosol

El suelo de tipo Planosol se ubica en los alrededores de las ciudades de Cuauhtémoc y Anáhuac. Presentan un horizonte caracterizado por presentar una textura gruesa sobreyaciendo un subsuelo denso y de textura más fina. Se hallan generalmente en tierras llanas de pastizales que durante algún periodo del año están cubiertas por agua. En temporada de sequía suelen aparecer manchas de coloración rojiza en estos. Son poco fértiles, comúnmente con arbustos dispersos, siendo susceptibles a la erosión (INEGI, 2015).

Rendzina

Corresponden a suelos arcillosos de escasa profundidad que se encuentran en climas semiáridos, tropicales y templados. Generalmente el estrato superior contiene materia orgánica abundante, lo que define su fertilidad y coloración oscura. Usualmente sobre yace sobre rocas o materiales de origen sedimentarios como son calizas y otras rocas carbonatadas (Rodríguez, 2021).

Solonchak

Suelos con un alto grado de salinidad debido a encontrarse en ambientes con elevadas tasas de evapotranspiración. Las sales son apreciadas cuando el suelo se encuentra en estado seco y en la mayoría de los casos, estas precipitan en la superficie dando lugar a la formación de una incrustación de sales. Estas disminuyen la absorción de agua por las plantas interfiriendo el metabolismo del nitrógeno por estas (INEGI, 2015).

Solonetz

Se ubican al norte del asentamiento urbano El Sauz y la laguna Santa María. Según INEGI (2015), estos son fuertemente alcalinos, presentando altos niveles de sodio o magnesio ligados a arcillas. Presentan una estructura columnar o prismática debido a la formación de capas endurecidas en el subsuelo. Se desarrollan en zonas con incidencia de un clima seco.

Vertisol

Se encuentran dispersos en las porciones sur y oeste de la región. Tienen su génesis en grietas anchas presentes en condiciones de sequía debido a la acumulación de arcillas expansibles y otros materiales. Pueden ser empleados en la agricultura siempre que se les aplique un buen programa de labranza y drenaje, debido a su alta capacidad de retención de humedad y sus propiedades de intercambio mineral con las plantas (INEGI, 2015).

Yermosol

Las mayores extensiones de este se ubican en la porción occidental de la zona, en forma de parches de dimensiones variables. Es característico de zonas áridas del planeta, de

ahí su nombre Yermo, que significa desolado. Pueden contener capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna porción del subsuelo. La capa superficial de los Yermosoles es pobre en humus, de ahí sus coloraciones claras. Puede ser empleado para la agricultura en zonas donde se puede aplicar el. Los rendimientos esperados suelen ser bastante altos cuando se dispone de este recurso y buena tecnología (INEGI, 2015).

2.4. Usos de suelos y vegetación

El mapa correspondiente al uso de suelo y vegetación (*Figura 5*) denota la presencia de 7 tipologías de usos de suelos en el área. Entre los principales asentamientos urbanos (color negro) resaltan al sur del área la ciudad de Cuauhtémoc, así como su corredor comercial. Los cuerpos de agua en la región se encuentran representados por la Laguna Bustillos, Laguna de los Mexicanos y Sauz Encinillas. Se debe destacar que el mapa correspondiente fue elaborado empleando imágenes satelitales Landsat 8 con fecha 11 de junio del 2024, por lo que muchos cuerpos de agua de la región se encontraban en estado seco debido a no comenzar aun la época de lluvias.

Las áreas dedicadas a la agricultura ocupan un área aproximada de 5,790.5 km². Estas se encuentran distribuidas fundamentalmente en las inmediaciones de Cuauhtémoc, conformando las diferentes zonas de campos Menonitas. Otras zonas de cultivo se ubican distribuidas por toda el área de estudio.

Hacia los márgenes ponientes se aprecian zonas con existencia de una cobertura boscosa, estas áreas coinciden con elevaciones significativas, pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Avanzando hacia el este, comienza una transición hacia pastizales y matorrales, encontrándose estos últimos en mayor proporción. Las zonas desprovistas de vegetación se localizan fundamentalmente en la porción centro norte y hacia la parte oriental del área del estudio. Estas zonas coinciden con el desierto de Samalayuca y en ciertos casos con cuerpos de aguas que han quedado despojados del líquido producto a la sequía.

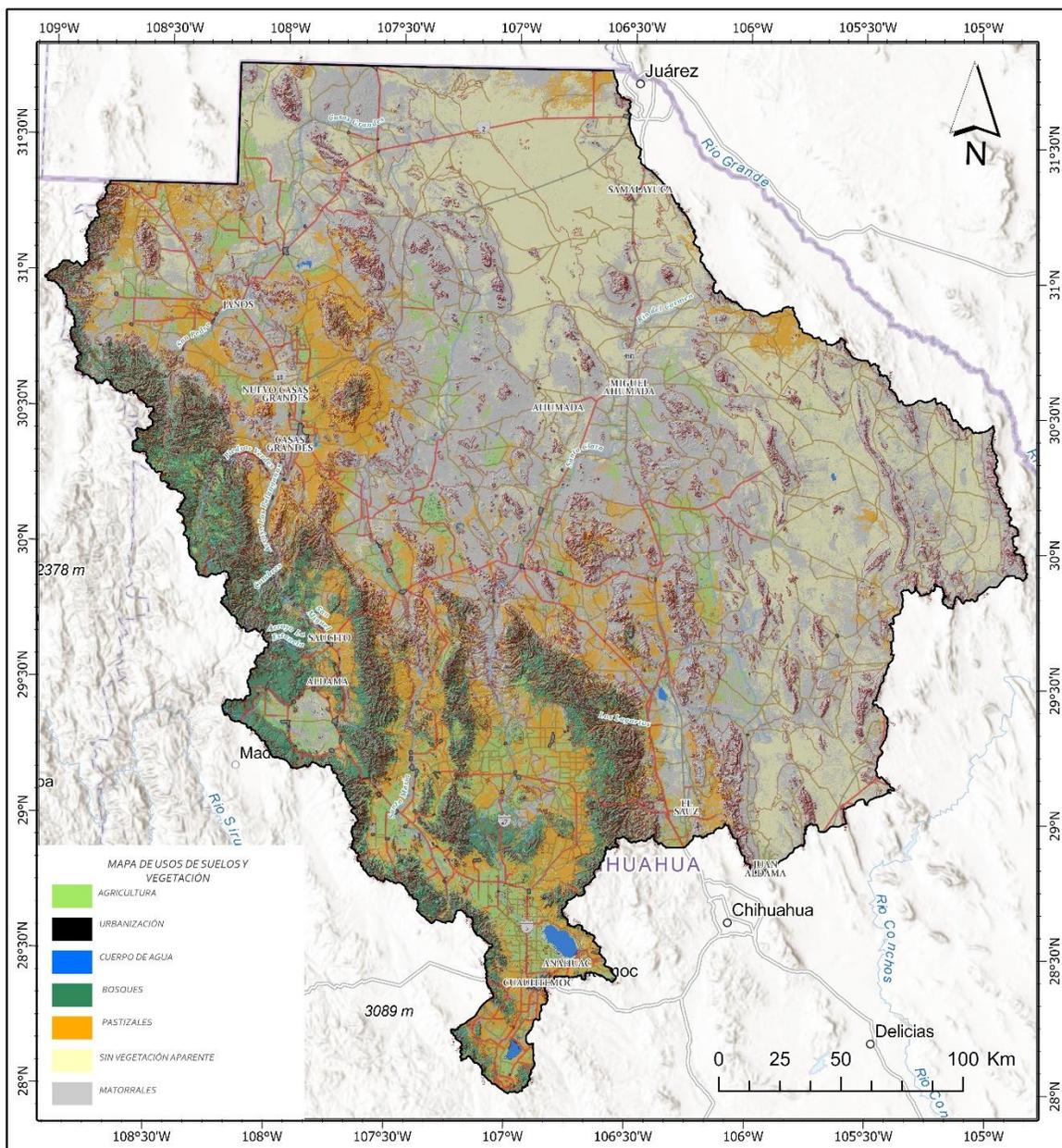


Figura 5 Usos de suelos y vegetación presentes en el RH-34. Elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 en Google Earth Engine.

2.5. Regiones fisiográficas

La región fisiográfica Sierra Madre Occidental (*Figura 6*) se encuentra dispuesta en la parte oeste del área ocupando una extensión de 23, 603 km², lo que representa un 26.5 % de la totalidad. Esta región se compone fundamentalmente por rocas de origen ígneo las cuales originalmente conformaban una meseta, la cual ha sido erosionada con el transcurso del tiempo. Esto ha dado lugar a la formación de un relieve irregular constituido por picos, barrancas y mesetas.

Geográficamente queda dispuesta con una orientación Noreste – Sureste, teniendo su inicio al norte de la República Mexicana en los límites con Estados Unidos de América hasta los límites del río Santiago en el estado de Nayarit. Su altura media es de 2 - 250 msnm, constituyendo una barrera geográfica natural (INEGI, 2008).

La región de Sierras y Llanuras del Norte ocupan una extensión territorial de 65,378 km², lo cual representa un 73.5 % del total de la zona de investigación. Esta constituye la parte norte de la Altiplanicie Mexicana. Queda delimitada geográficamente por las Sierras Madres Oriental y Occidental. Es una amplia área de llanos llamados bolsones y sierras bajas que se continúa en las grandes planicies norteamericanas. Políticamente estas sierras ocupan parte de los estados de Chihuahua y Coahuila. Esta provincia enclavada en un ambiente árido y semiárido se extiende hasta parte de los EE.UU. Sus sierras bajas y abruptas quedan separadas entre sí por grandes bajadas y llanuras; son frecuentes las cuencas endorreicas o bolsones, algunos de ellos salinos, a veces con desarrollo de lagos temporales.

En esta provincia se localiza una parte de la cuenca del río Conchos, afluente del Bravo, y en su centro, el Bolsón de Mapimí. A 50 km al sur de Ciudad Juárez encontramos uno de los campos de dunas (de arena) más extensos del país, el de Samalayuca. Al sur de esta provincia se extiende la Laguna de Mayrán Bolsón de Coahuila y más al sur se continúa la antigua región lacustre de los bolsones de Viesca, así como una pequeña zona de dunas, la de Bilbao (Martínez, 2023).

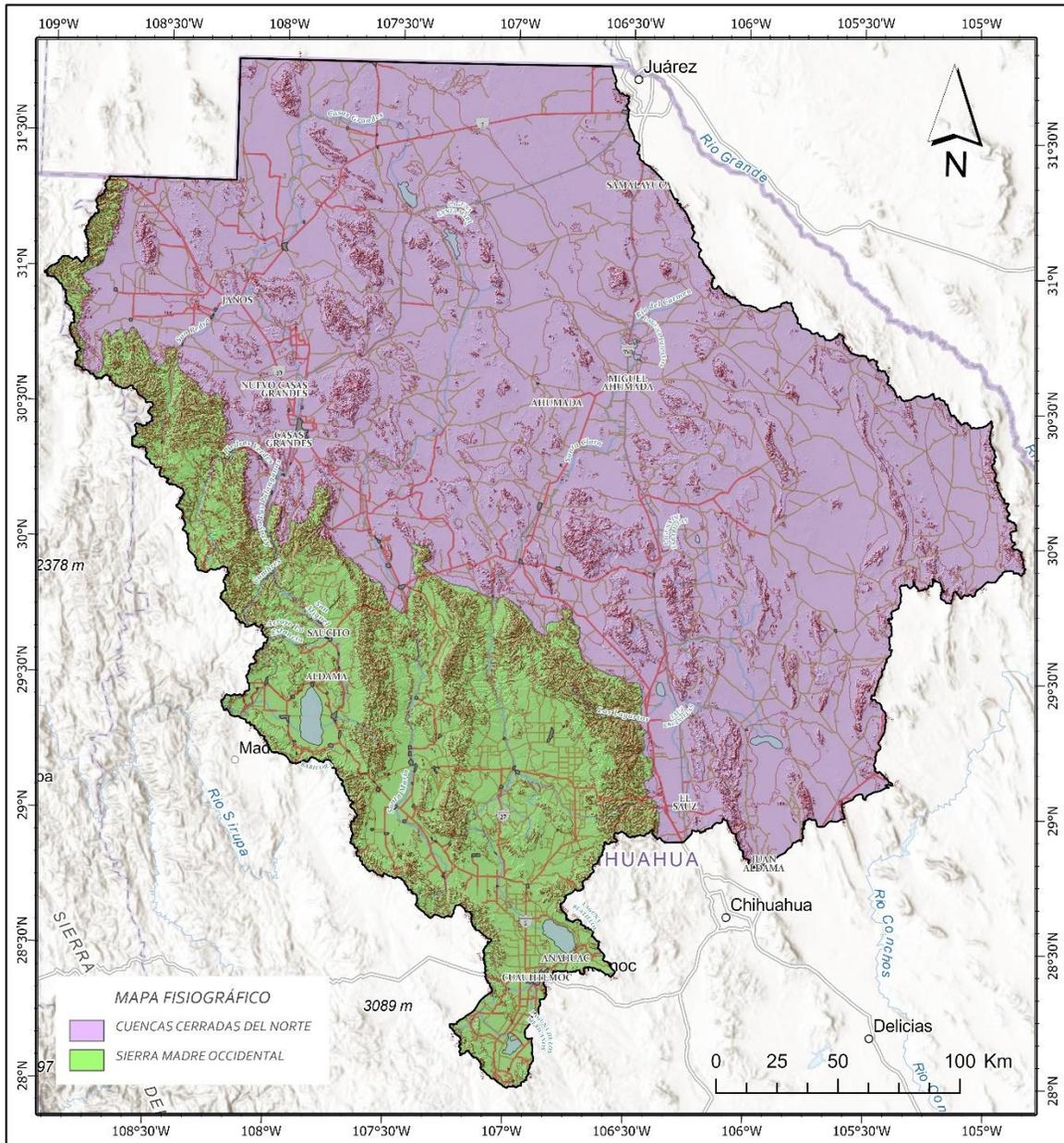


Figura 6 Regiones fisiográficas presentes en el área. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.

2.6. Geología

La Región Hidrológica 34 Cuencas Cerradas del Norte, presenta una geología sumamente variada que refleja su compleja evolución tectónica y sedimentaria a lo largo de millones de años. En esta región, se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que datan desde el Precámbrico hasta el Cenozoico, formando un mosaico geológico significativo, tal y como se aprecia en la **Figura 7** (SGM, 2020). Las rocas ígneas, en particular los granitoides y dioritas, son predominantes en las áreas montañosas, como la Sierra Madre Occidental. Esta cadena montañosa, que se extiende a lo largo del occidente del estado, es el resultado de intensos procesos tectónicos y volcánicos que dieron lugar a grandes cuerpos intrusivos de granito y diorita. Estas rocas ígneas emergieron de intrusiones magmáticas en el subsuelo y se han expuesto debido a la erosión.

Las formaciones sedimentarias de la región abarcan una amplia gama de depósitos, principalmente de origen cretácico y terciario. Estas incluyen areniscas, limolitas y lutitas, que se han acumulado en ambientes diversos, desde cuencas continentales hasta antiguos mares que cubrían parte de la región. La deposición de estos sedimentos se produjo en condiciones que variaron desde ambientes de llanura aluvial hasta ambientes marinos marginales. En el Cenozoico, se formaron depósitos aluviales y fluviales que reflejan un cambio en las condiciones ambientales y climáticas, evidenciando una transición hacia un clima más seco y árido.

En cuanto a las rocas metamórficas, la región presenta mármoles y esquistos que se formaron en contextos de contacto con cuerpos ígneos y bajo condiciones de alta presión y temperatura. Estos metamorfismos son el resultado de procesos tectónicos regionales que afectaron a las rocas originales, transformándolas en unidades con características nuevas y complejas. La influencia tectónica en la región es notable, especialmente debido a la presencia de la Sierra Madre Occidental, que ha experimentado una actividad volcánica y tectónica significativa. La elevación de la sierra ha creado un relieve montañoso que ejerce una fuerte influencia en la distribución geológica y los procesos erosivos en la región. Las cuencas intramontanas de la región, resultado del hundimiento local de la corteza, han dado lugar a cuencas cerradas donde el agua no drena hacia el océano.

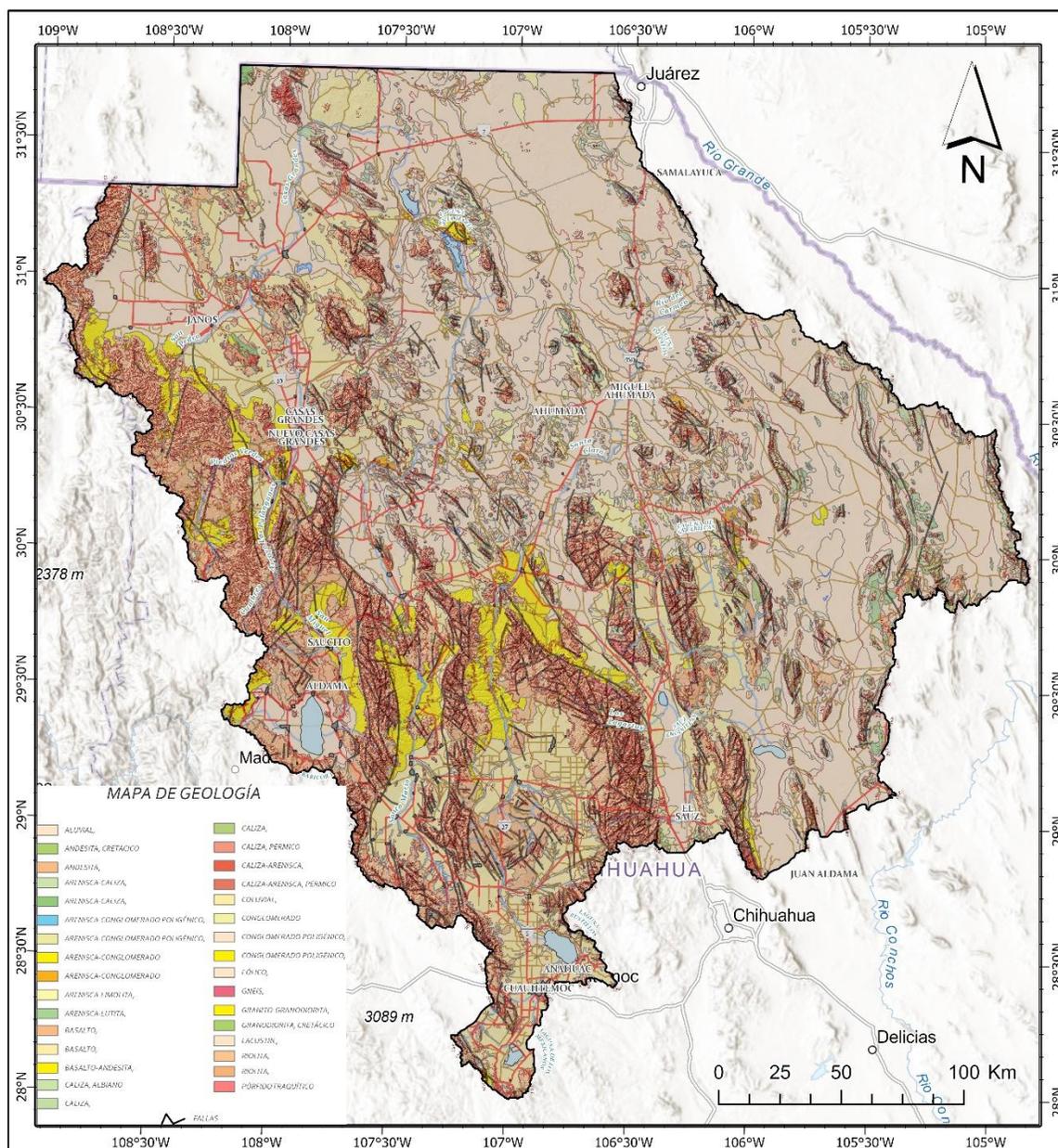


Figura 7 Mapa geológico del área de investigación. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Estos sistemas de cuencas cerradas son cruciales para entender el comportamiento hidrogeológico local, ya que afectan la disponibilidad y distribución de los recursos hídricos. La región alberga acuíferos importantes, pero la disponibilidad de agua es limitada y depende de la recarga por precipitaciones esporádicas, que son insuficientes en comparación con la demanda de agua. En términos de recursos minerales, la región es rica en metales preciosos y básicos, como plata, plomo, zinc y cobre, lo que ha impulsado una significativa actividad minera histórica y continua. Además, los depósitos de materiales no metálicos, como arena, grava y caliza, también son importantes para la economía local. La diversidad geológica de la Región Hidrológica 34 Cuencas Cerradas del Norte no solo proporciona valiosos recursos naturales, sino que también presenta desafíos para la gestión de los recursos hídricos y la sostenibilidad ambiental en la región. (INEGI I. N., 2003).

2.7. Hidrografía

La Región Hidrológica 34: “Cuencas Cerradas del Norte” se encuentra conformada por cinco cuencas hidrográficas (*Figura 8*), siendo estas:

- **RH-34A Cuenca Arroyo el Carrizo y otros.** Según INEGI (2003), en su interior se encuentran cuerpos lacustres muy azolvados, por lo que muchos están en proceso de extinción. La laguna Encinillas es el cuerpo de agua más importante y es considerada perenne, aunque se debe agregar que debido a los efectos de la sequía extrema en la entidad su área de ha visto reducida considerablemente. Las corrientes principales que alimentan dicha laguna son los arroyos Los Prietos, Las Playas, La Campana, El Sauz y El Potrero.
- **RH-34B Río del Carmen.** Esta cuenca limita al Este con al RH-34A, al norte con la RH-24 Río Bravo – Ciudad Juárez (I), al oeste con la RH-34C y al sur con la RH-34E. Presenta generalmente una pendiente de media a moderada. El río Santa Clara, que nace al sur del área, constituye el principal curso fluvial de la cuenca siendo embalsado en la presa las Lajas y continuando rumbo hasta desembocar en la Laguna Los Patos, habiendo recorrido 285 km.

- **RH-34C Río Santa María.** La cuenca constituye una franja alargada semejante a la RH-34B, con un área aproximada de 21,379 km², queda limitada en sus márgenes este y oeste por las RH-34C y 34D respectivamente. Limita la norte con los Estados Unidos de América, mientras que lo hace con la RH-34E hacia el sureste. El principal curso fluvial de esta cuenca lo constituye el río Santa María, el cual con una longitud aproximada de 351.5 km fluye de sur a norte desembocando en la Laguna Santa María.

- **RH-34D Río Casas Grandes.** Se posiciona en el extremo oriental del área, ocupando una superficie de 25,307 km². La corriente superficial de mayor importancia la constituye el río Casas Grande. En la parte sur de la cuenca se localiza la Laguna Babícora, constituida por varias corrientes dispuestas en un patrón de drenaje de tipo radial. Las características de permeabilidad del suelo en partes aledañas a la laguna ocasionan que algunas corrientes se pierdan y desaparezcan antes de llegar a la misma, por lo que la red de drenaje se encuentra poco integrada (INEGI I. N., 2003).

- **RH-34E Laguna Bustillos y de los Mexicanos.** Se ubica en la porción sur del área de investigación. Limita norte con la RH-34A y RH-34B, mientras que al oeste lo hace con la RH-34C. La configuración orográfica de la cuenca posibilita la existencia de lagunas como son los cuerpos de aguas Bustillos y de los Mexicanos.

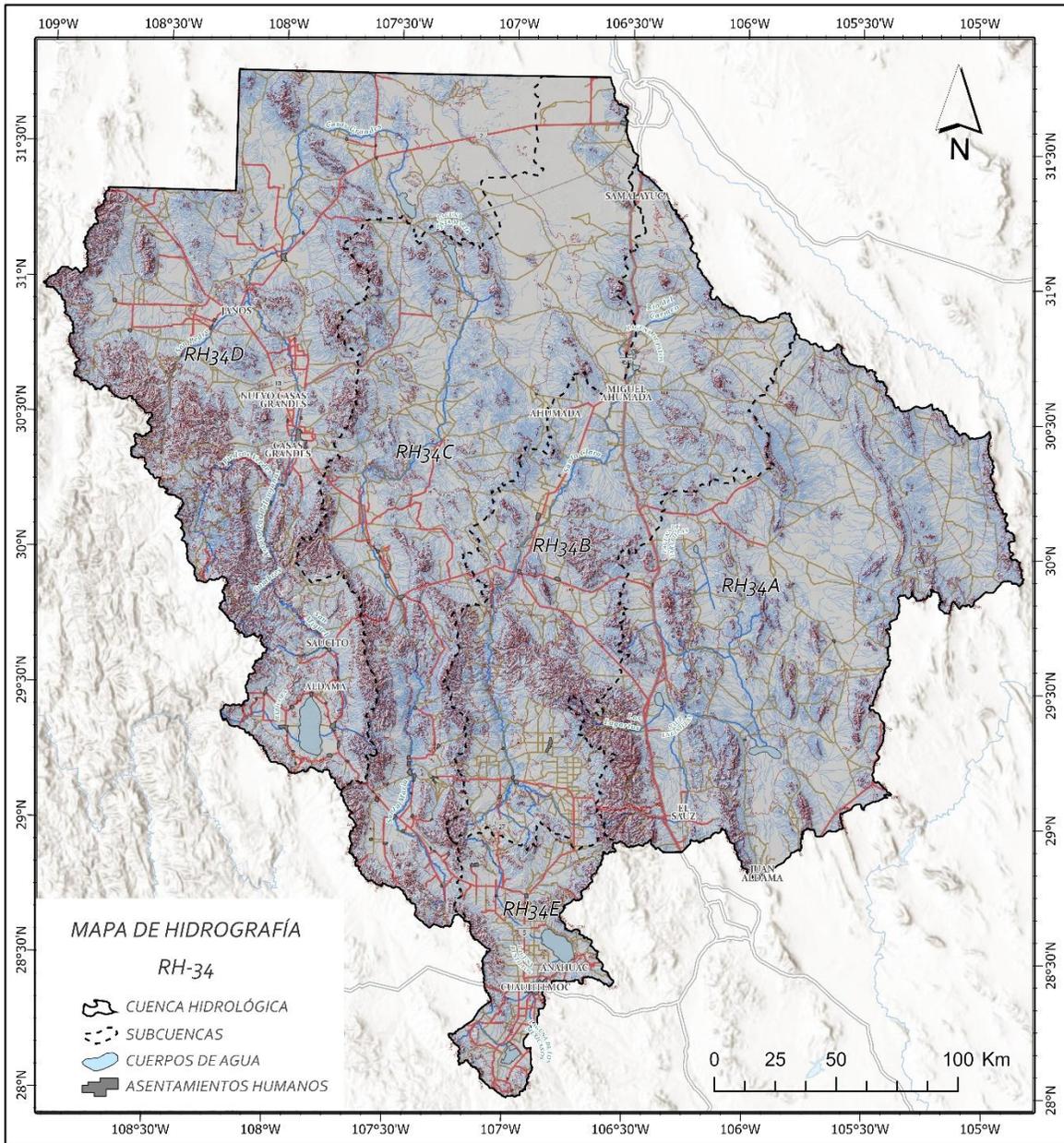


Figura 8 Cuencas hidrográficas y principales cursos fluviales de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte. Fuente: Elaboración propia a partir de insumos obtenidos del INEGI.

2.8. Geomorfología

La geomorfología se encuentra caracterizada por un relieve volcánico piroclástico de mesetas que cubren arbitrariamente a topofomas de montañas cretácicas, que hoy en día se encuentran afectadas por procesos tectónicos y erosivos. Estas se encuentran seccionadas por valles, en los que se han depositado sedimentos de origen aluvial (**Figura 9**). Algunos de estos valles pueden contener sedimentos lacustres en las zonas más bajas del relieve. Las montañas y mesetas en la zona se caracterizan por presentar numerosos escarpes y profundos cañones labrados por la acción de los agentes erosivos, esto se evidencia debido a la existencia de una discontinuidad de la pendiente en los sedimentos clásticos, lo que parece la presencia de un proceso rejuvenecimiento de la superficie terrestre. Sin embargo, en algunas ubicaciones, sobre todo en los valles y porciones áridas, se encuentra en una etapa de madurez (CONAGUA, 2024).

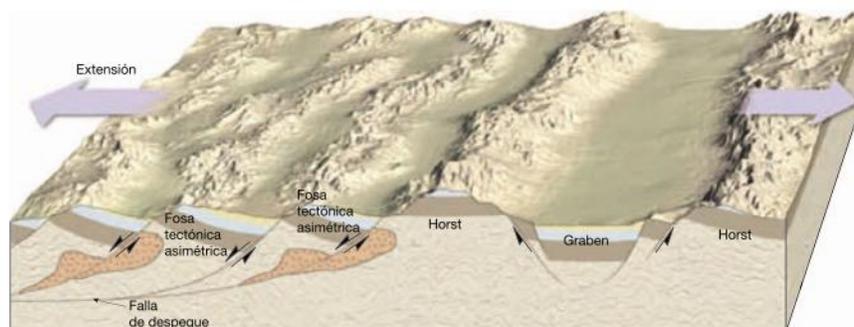


Figura 9 Ejemplo de cómo los esfuerzos tensionales han alargado y fracturado la corteza en numerosos bloques. El movimiento a lo largo de esas fracturas ha inclinado los bloques produciendo alineaciones montañosas paralelas denominadas montañas limitadas por fallas. Los bloques hundidos (grabens) forman cuencas, mientras que los bloques elevados (horst) se erosionan y originan una topografía montañosa accidentada, tal y como ocurre en gran parte del territorio del área de estudio. Tomado de: Tarbuck & Lutgens, 2005.

2.8.1. Patrones de drenaje

El drenaje se encuentra condicionado fundamentalmente por la acción de los factores geológicos en unión al clima imperante en el área. A continuación, se exponen cada uno de los patrones de drenaje presentes en el área con una descripción de los principales rasgos geomórficos.

Radial

Este patrón de drenaje se desarrolla fundamentalmente al norte del área, teniendo por génesis la existencia de formas del relieve compuestas por cerros aislados con pendientes pronunciadas. Está presente en el cerro Las Higueras y en Sierra la Ranchería.

Dendrítico

Aparece principalmente en zonas montañosas que comprenden parte de la Sierra Madre Occidental. Este patrón manifiesta la presencia de rocas con características homogéneas frente al proceso erosivo, sin influencia de un control estructural que la defina.

Paralelo

Este tipo de drenaje aparece en los sedimentos de pie de monte y las laderas de las diferentes sierras y valles. Generalmente presentan una dirección preferencia E – W siguiendo la configuración de las diferentes estructuras del relieve.

Centrípeto

Se caracteriza por la fluencia de diferentes corrientes hacia un punto bajo en el relieve que generalmente es una laguna o cráter. Este patrón se localiza en los principales cuerpos de agua de la región tales como: Laguna Bustillos, Los Mexicanos, Encinillas y Laguna de Babícora.

2.8.2. Pendientes

La zona de estudio presenta una pendiente preferencial en la dirección occidente-oriental (*Figura 10*). La pendiente general en dirección norte-sur es de relativa menor importancia, situación que es un reflejo del control estructural de la zona debido a la acción del tectonismo. Este control se refleja, además, en las características de la distribución particular de la pendiente del terreno en los tres principales elementos fisiográficos de la zona de estudio. Existe una predominancia de un relieve plano hacia los valles de porción noroccidental, con pendientes suaves que presentan valores comprendidos entre 0 – 5°. Esta topografía se ve interrumpida por la alternancia de las sierras, con valores de pendientes que pueden alcanzar más de 45° clasificando el relieve como muy escarpado.

La superficie terrestre en la Sierra Madre Occidental presenta un relieve irregular con pendientes variables, encontrándose en esta porción del área las mayores elevaciones. La variabilidad espacial de las pendientes en esta zona está condicionada fundamentalmente por la acción de la tectónica, el vulcanismo y las litologías. Estos procesos conceden a la sierra un aspecto de bloque segmentado por fallas y grietas. Estas estructuras tectónicas al actuar como zonas de debilidad estructural son aprovechadas por los principales ríos para establecer sus cauces, permitiendo una mayor erosión de los valles.

Capítulo 3: Fundamentación Teórica

3.1. Ciclo del agua

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) el ciclo del agua describe como se encuentra distribuido el preciado líquido en la Tierra y su movimiento a través de los diferentes medios componentes del planeta (**Figura 11**). El agua se almacena en la atmósfera, en la superficie terrestre y debajo del suelo, pudiendo ser un líquido, un sólido o un gas. El agua líquida puede ser dulce o salada (salada). Esta se mueve entre los lugares donde está almacenada pudiendo ser: a gran escala a través de las cuencas, la atmósfera y debajo de la superficie de la Tierra, o escalas muy pequeñas. Las actividades humanas pueden modificar este ciclo, afectando su almacenamiento, movimiento y calidad.

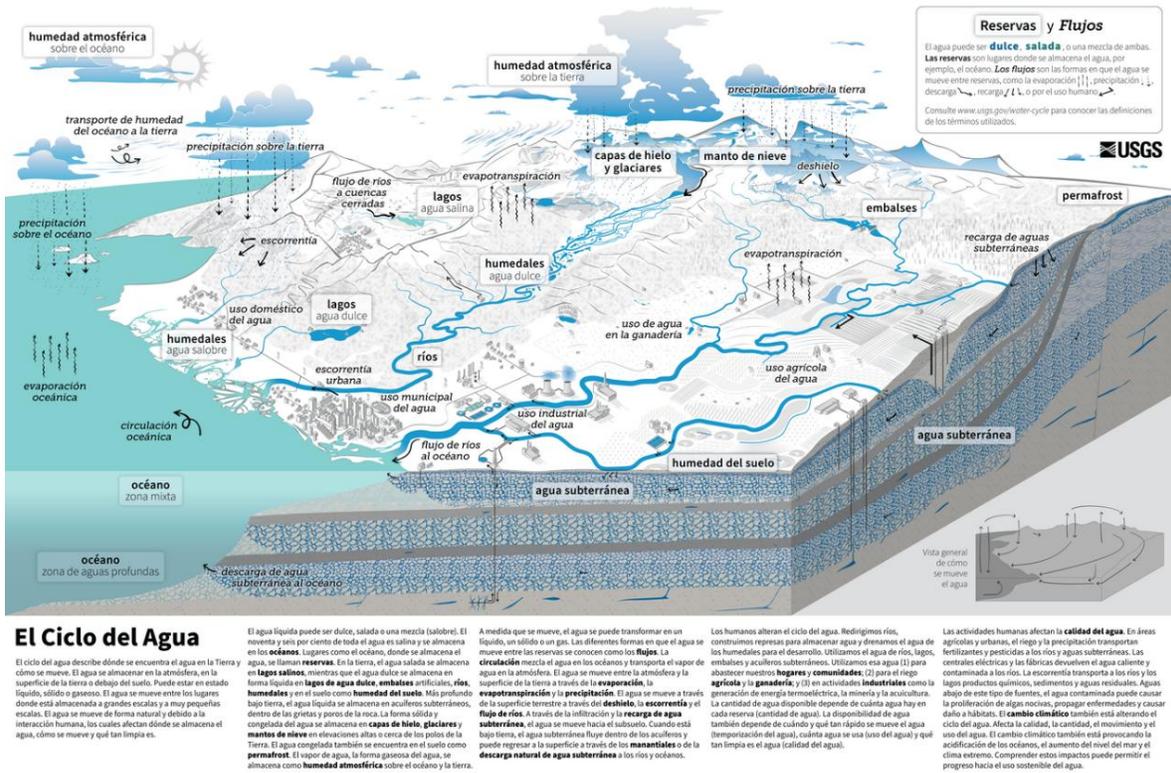


Figura 11 Diagrama explicativo de las diferentes componentes ciclo hídrico. Fuente: Tomado del USGS, 2024.

3.2. Generalidades sobre la recarga de acuíferos

El agua subterránea constituye una de las etapas fundamentales del ciclo del agua, ocupando los diversos espacios vacíos de las formaciones geológicas. La recarga se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada en donde esta pasa a conformar las reservas subterráneas. Existen dos maneras fundamentales en los que puede ocurrir este fenómeno: debido al desplazamiento descendente del agua por la acción de la fuerza de gravedad y mediante un movimiento horizontal del flujo debido a la existencia de diferentes características hidráulicas de los diferentes paquetes litológicos (Balek, 1988).

3.2.1. Tipos de recarga

Este fenómeno puede ocurrir de forma natural debido a la precipitación, a la interacción con las aguas superficiales: mediante ríos y lagos; o mediante transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos. Puede ocurrir también de forma artificial producto a: regadíos en la agricultura, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner, 1990; Samper, 1997 en: Vélez Otálvaro, 2004).

Según Lerner (1990) existen cinco tipos de recarga, los cuales se exponen a continuación:

1. **Recarga directa o recarga difusa**, proveniente del agua lluvia.
2. **Recarga concentrada o indirecta**, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
3. **Flujos laterales**, procedentes de otros acuíferos.
4. **Retorno de riegos**, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.
5. **Recarga Urbana**, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

3.2.2. Divisiones características del suelo según la saturación

La zona saturada está limitada en la parte superior por la superficie freática (sometida a la presión atmosférica) en la que el agua llena completamente todos los vacíos existentes entre los materiales del suelo. La zona no saturada, está situada entre la superficie freática y la superficie del terreno (*Figura 12*).

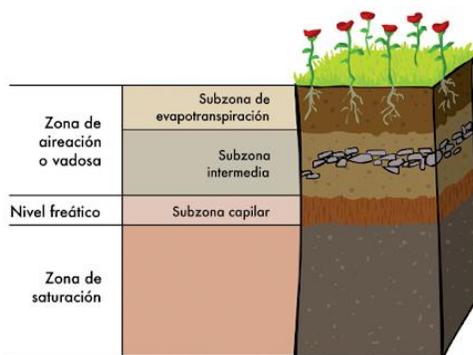


Figura 12 Zonas del perfil de suelo según el grado de saturación. Fuente: Tomado del Proyecto de educación ambiental: "Cambio Climático".

En la zona no saturada se encuentran las siguientes subzonas:

- **Subzona sometida a evapotranspiración:** comprendida entre la superficie del terreno y los extremos de las raíces de la vegetación. Puede tener espesor muy pequeño cuando no hay vegetación, o alcanzar grandes profundidades cuando la vegetación es abundante.

- **Subzona intermedia:** sus características son totalmente similares a la zona anterior y está situada debajo de ella.

- **Subzona capilar:** es la región de transición a la zona saturada y su parte inferior está también saturada.

3.2.3. Parámetros que intervienen en la recarga

Rushton en el año 1988 estableció los principales factores que intervienen en la recarga, los cuales se enumeran a continuación:

1. Factores superficiales: topografía; precipitación, donde interviene la magnitud, intensidad, duración, y distribución espacial de las lluvias; la escorrentía; el patrón de cosechas y la evapotranspiración.

2. Riego: horarios; pérdidas en canales; cantidad de agua empleada en la preparación de las tierras para cultivos.

3. Ríos: densidad de cursos fluviales y caudales de los mismos que fluye por los ríos que fluyen dentro del área de estudio.

4. Zona superior del suelo: tipo de suelo, espesor y propiedades hidráulicas y variaciones de las características según la extensión lateral y la profundidad; longitud de la zona de raíces. Capacidad que tiene el sustrato de agrietarse al secarse o de hincharse al aumentar la humedad.

5. Zona no saturada entre el suelo y el acuífero: propiedades hidráulicas de la zona no saturada.

6. Acuífero: tipo de acuífero, así como habilidad de este para admitir agua, variación de las condiciones con el tiempo.

3.2.4. Áreas de recarga y descarga

Para realizar un manejo sostenible de los sistemas “acuífero – cuenca”, resulta fundamental conocer las áreas de recarga o descarga (*Figura 13*). Esto permitirá además definir las zonas vulnerables a la contaminación. Existen 3 tipos de flujos principales en una cuenca, en dependencia de la escala de influencia: regional, intermedio y local. En un sistema de flujo regional, el agua viaja más distancias y con frecuencia descarga en ríos principales, grandes lagos o el océano. Un sistema de flujo intermedio tiene una o más crestas y valles entre su recarga y el área de descarga. Sin embargo, a diferencia del sistema de flujo regional, no ocupa los lugares más altos de la topografía y los más bajos de la cuenca al mismo tiempo. Los sistemas de flujo regionales están en la parte superior de la organización jerárquica, y todos los otros sistemas de flujo están dentro de ellos. (Sophocleous, 2000 en: Vélez Otálvaro, 2004).

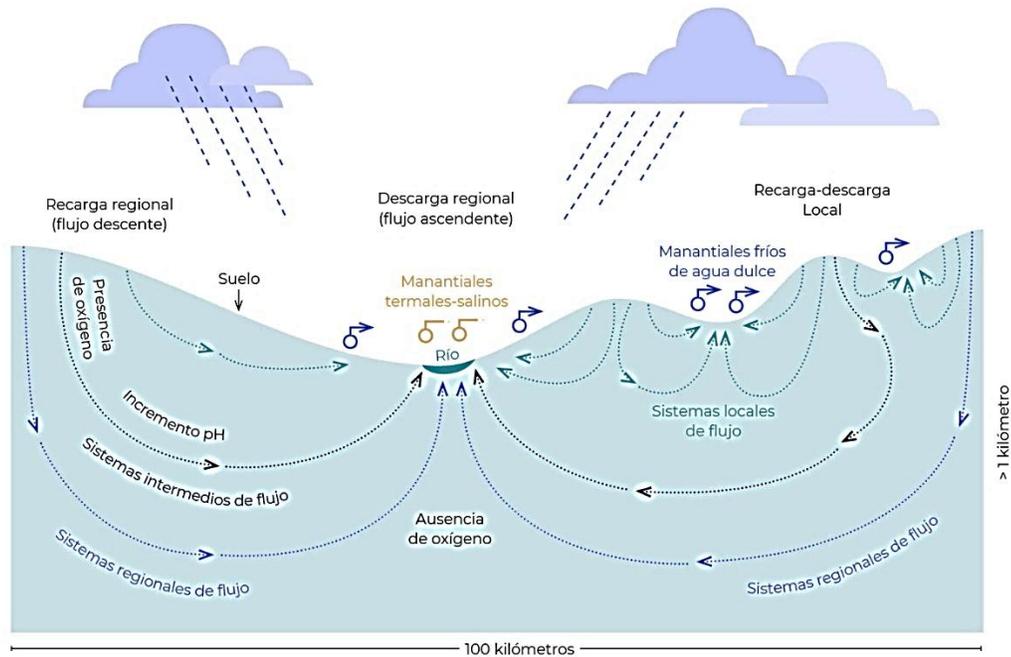


Figura 13 Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea. Tomado de: *Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea: un paradigma*, del autor Dr. Marcos Adrián Ortega Guerrero.

3.3. Litología

3.3.1. Generalidades

Una roca no es más que una agrupación inorgánica de uno o varios minerales originados en forma natural por procesos geológicos endógenos o exógenos. Según su origen se clasifican en 3 tipos: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Bowen & Schairer, 1956 en: Orozco - Centeno, Branch Bedoya, & Jiménez - Builes, 2014).

La litología desempeña un rol fundamental en la existencia y distribución del agua subterránea (Yeh, et al., 2016). El valor de influencia de la litología en cuestiones de recarga se propone con base en la composición mineral, alteraciones y grado de meteorización. Las rocas más proclives a los efectos del intemperismo presentan altos índices de infiltración y bajos valores de escorrentía (Selvam, et al., 2015).

3.3.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas se originan por el enfriamiento y la solidificación de roca fundida, magma, proveniente del manto en el interior de la Tierra. Según su génesis se clasifican en rocas ígneas intrusivas o plutónicas y rocas efusivas o volcánicas. Las primeras se forman en zonas profundas de la corteza, a altas presiones que inhiben el escape de gases acompañantes, esto permite la formación de cristales de tamaño considerable. Los núcleos de muchas montañas se encuentran conformados por rocas ígneas que se originaron de esta forma. Sólo la elevación y la erosión posteriores dejan expuestas estas rocas en la superficie.

En cambio, las volcánicas se tienen su origen a partir del magma que fluye hacia la superficie terrestre aprovechando la existencia de planos de debilidad o al ser expulsado el material por un volcán (Williams, et al., 1982, en Orozco - Centeno, Branch Bedoya, & Jiménez - Builes, 2014). Un ejemplo de rocas formadas bajo estas condiciones la constituyen los basaltos. Estos presentan color verde oscuro a negro siendo rica en minerales silicatados que contienen una cantidad significativa de hierro y magnesio. El basalto constituye una de las principales rocas constituyentes de la corteza oceánica, así como volcanes en forma de escudo y puntos calientes.

La serie de reacción de Bowen explica lo que sucede en un magma a medida que este se enfría, indicando el orden de separación de los silicatos en un proceso que sigue dos cursos independientes pero simultáneos, uno continuo, y otra discontinua (**Figura 14**). Al final, cristalizan los feldespatos alcalinos, la moscovita y el cuarzo. Las reacciones continuas se inicia con el feldespato cálcico (anortita) y terminan con el sódico (albita), mientras las discontinuas empiezan con los olivinos, continúan con los clinopiroxenos y ortopiroxenos, luego con la hornblenda y finalmente con la biotita. Esta serie además de explicar la diferenciación magmática expone la estabilidad de los diferentes minerales constituyentes bajo condiciones exógenas o de la superficie terrestre, efectos de la meteorización. Siendo últimos minerales en cristalizar los más estables frente a la acción de los agentes exógenos.

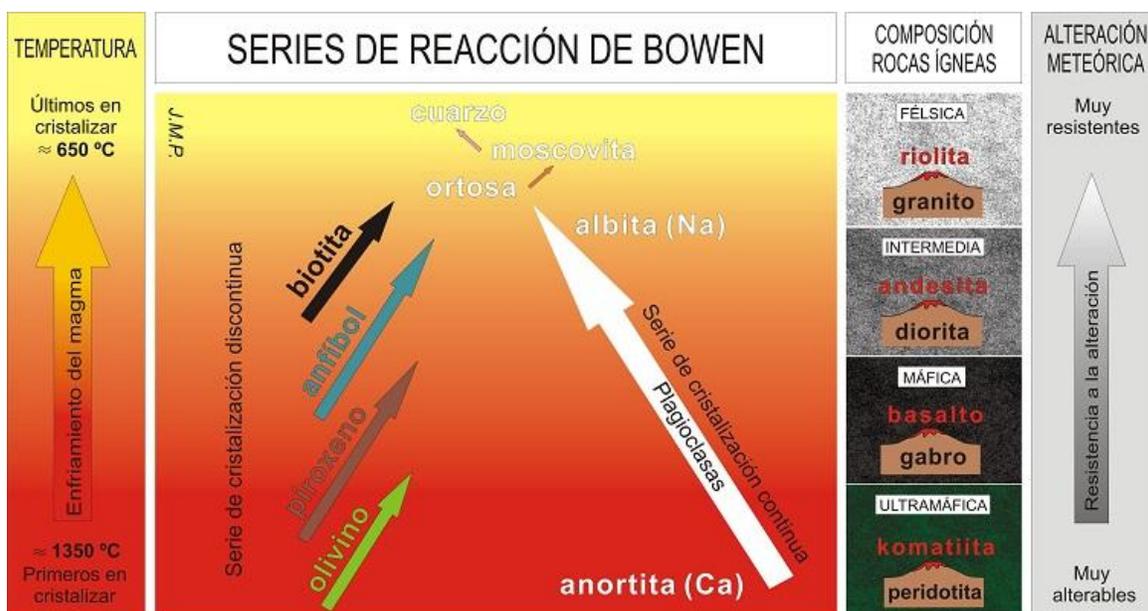


Figura 14 Serie de reacción de Bowen de los minerales constituyentes de las rocas ígneas. Tomado de: www.studymaster.com.

3.3.3. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias tienen su origen debido a la acumulación de sedimentos y partículas de rocas preexistentes que han sido afectadas por el fenómeno de la meteorización, ya sean de origen ígneo, metamórfico o incluso sedimentario (**Tabla 2**). También se pueden formar debido a la acumulación de material de origen biológico, o por la precipitación de sustancias químicas o bioquímicas (Orozco - Centeno, Branch Bedoya, & Jiménez - Builes, 2014).

Tabla 2 Clasificación de los materiales componentes de las rocas sedimentarias. Modificado de: (Gallegos J. A., 1995).

Materiales sedimentarios	
Detríticos	Integrados fundamentalmente por partículas que han sufrido un proceso de transportación en estado sólido.
Precipitados o químicos	Compuestas fundamentalmente por sustancias que han precipitado en una disolución.
Orgánicos	Compuestas por restos de organismos vivos.

Los constituyentes fundamentales de las rocas sedimentarias detríticas son los minerales arcillosos y el cuarzo. Los minerales arcillosos son el producto más cuantioso de la meteorización química de los silicatos, fundamentalmente los feldespatos. Las arcillas son minerales de grano muy pequeño con estructuras cristalinas laminares. El otro mineral común, el cuarzo, resulta ser muy abundante debido a su extrema dureza y resistencia a la meteorización química. Entre las rocas fundamentales que tienen por composición detritos resaltan: las lutitas, areniscas, las brechas y conglomerados; su clasificación está dado en relación con el tamaño del grano que las compone (*Tabla 3*) (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Tabla 3 Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño del clasto. Modificado de: Tarbuck & Lutgens, 2005.

Tamaño (mm)	Nombre del clasto	Nombre del sedimento	Roca detrítica
256 - 64	Bloque	Grava	Conglomerado o brecha
64 - 2			
2 - 1/16	Grano	Arena	Arenisca
1/16 - 1/256	Gránulo	Limo	Limolita
< 1/256	Partícula	Arcilla	Lutita

Las lutitas se componen por partículas del tamaño de las arcillas y limos, siendo una de las rocas sedimentarias más abundantes. Generalmente se forman en ambientes relativamente tranquilos donde no existen corrientes turbulentas que imposibiliten su sedimentación tales como: lagos, llanuras de inundación de ríos y cuencas oceánicas profundas. Las areniscas constituyen las rocas sedimentarias más abundantes después de las lutitas. Estas se originan debido al proceso de meteorización y transporte de materiales constituidos fundamentalmente por cuarzo.

Los conglomerados y brechas se conforman fundamentalmente por gravas en ambientes muy turbulentos o de pronunciada pendiente. La diferencia fundamental es que los clastos constituyentes de las brechas presentan bordes angulosos, mientras que en los conglomerados estos son redondeados. Lo anterior se debe a que el material conformante de estas rocas previamente puede haber sufrido o no un proceso de transporte el cual les confiere estas características.

Las rocas sedimentarias químicas se originan cuando precipita el material disuelto en el agua. Diferente a las rocas detríticas, que se clasifican según el tamaño de las partículas, las rocas sedimentarias químicas se distinguen según su composición mineral. La principal roca característica de este grupo es la caliza, representando un 10% del total de las rocas sedimentarias. Esta se compone principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) formándose por procesos inorgánicos o bioquímicos.

3.3.4. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas, se forman debido a la acción de agentes físicos como son cambios en la presión y la temperatura, usualmente a grandes profundidades con respecto a la superficie terrestre. Debido a la magnitud de estos agentes se producen cambios en la mineralogía y las estructuras de los minerales constituyentes (Orozco - Centeno, Branch Bedoya, & Jiménez - Builes, 2014). Los procesos metamórficos suelen progresar de manera incremental, comenzando por cambios ligeros (metamorfismo de bajo grado) a cambios considerables (metamorfismo de alto grado).

En el metamorfismo de grado alto, suelen desaparecer rasgos como los planos de estratificación, los fósiles y las vesículas que constituyen la roca original previo a someterse a estos procesos. Cuando las rocas en zonas profundas, donde pueden existir grandes temperaturas, son sometidas a presiones se deforman lentamente produciendo una gran variedad de texturas y estructuras a gran escala como los pliegues.

Los principales ambientes donde ocurren los procesos metamórficos son los siguientes (Tarbuck & Lutgens, 2005):

- Cuando una cámara magmática o cuerpo intrusivo penetra las rocas circundantes, dando lugar *al metamorfismo de contacto o térmico (Figura 15)*. El principal agente físico en este ambiente es la temperatura, produciendo un aumento en el interior de la roca de caja o huésped que rodea la intrusión ígnea.
- El *metamorfismo hidrotermal* produce alteraciones químicas en la composición de las rocas debido a la interacción de estas con un agua caliente enriquecida en elementos químicos que se desplazan a través de las fracturas de las rocas. Generalmente este metamorfismo puede estar asociado a fenómenos ígneos, los

cuales generan el calor necesario para producir la circulación de los fluidos a través de las fisuras de las rocas.

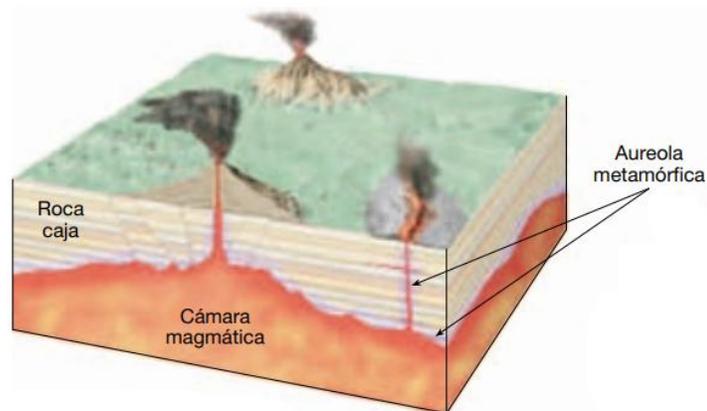


Figura 15 Ejemplo de metamorfismo de contacto e hidrotermal produciendo una zona de alteración denominada aureola. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005)

- El *metamorfismo regional* (**Figura 16**) ocurre cuando grandes volúmenes de rocas son sometidos a grandes presiones y esfuerzos dirigidos durante la formación de montañas (orogénesis). El metamorfismo regional, produce la mayor cantidad de rocas metamórficas, teniendo lugar en los límites convergentes, donde las placas de la corteza terrestre chocan entre sí. Este tipo de metamorfismo puede albergar los dos casos descritos con anterioridad debido a la amplitud de la zona que puede abarcar.



Figura 16 Existencia de un metamorfismo regional debido a la colisión de dos placas tectónicas. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005)

- El *metamorfismo de choque* se produce debido al impacto a grandes velocidades de meteoritos sobre la superficie de la Tierra. Debido a la gran velocidad, la energía

cinética que acompaña el bólide se convierte en calor produciendo alteraciones en las rocas de la zona de impacto.

- La deposición vertiginosa de grandes volúmenes de material en cuencas sedimentarias puede originar un *metamorfismo de enterramiento*. Esto se debe al surgimiento de una presión confinante y el calor geotérmico estimulan la recristalización de los minerales, alterando la textura y la mineralogía de la roca.
- El *metamorfismo dinámico* (**Figura 17**) tiene lugar a lo largo de zonas de fallas y fracturas donde la propia energía cinética liberada por el movimiento de las rocas las pulveriza y tritura dando origen a una roca poco consistente denominada brecha de falla. Durante estos procesos generalmente la presión aumenta según la cercanía a la falla, mientras que las temperaturas son bajas. En estas condiciones, generalmente la recristalización en el protolito (roca original) es mínima, solo aclarar que el tamaño de los granos tiende a disminuir ocurriendo además cierta orientación preferencial en la orientación de los cristales.

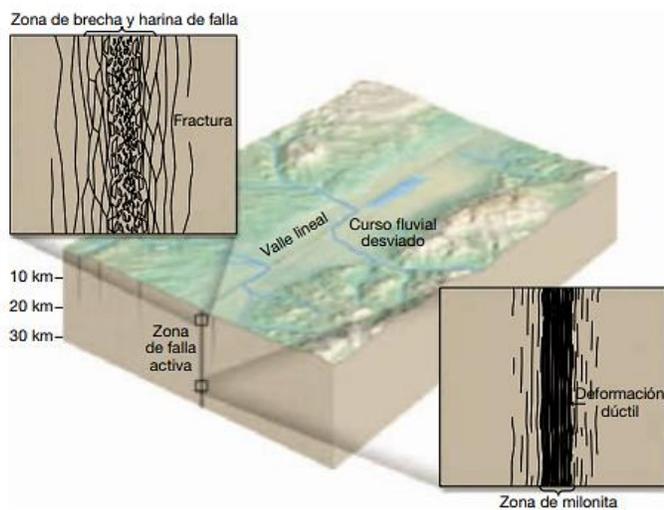


Figura 17 Metamorfismo dinámico en una zona de fallas por el rumbo. Tomado de: (Tarbuck & Lutgens, 2005)

3.4 Lineamientos (LD)

3.4.1. Generalidades

Las fracturas en la corteza terrestre que han experimentado un desplazamiento significativo se denominan fallas o zona de fracturas (Bates y Jackson, 1980 en: Tarbuck & Lutgens, 2005). Existen tres tipos de fallas según el movimiento con respecto al ángulo de buzamiento de estas:

- **Fallas normales:** Son aquellas las cuales el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de muro (*Figura 18*). La mayoría de las fallas normales presentan buzamientos de alrededor de 60° , el cual generalmente tienden a disminuir con la profundidad. Sin embargo, algunas fallas con desplazamiento vertical pueden llegar a tener buzamientos mucho menores, siendo en algunos casos casi horizontal.

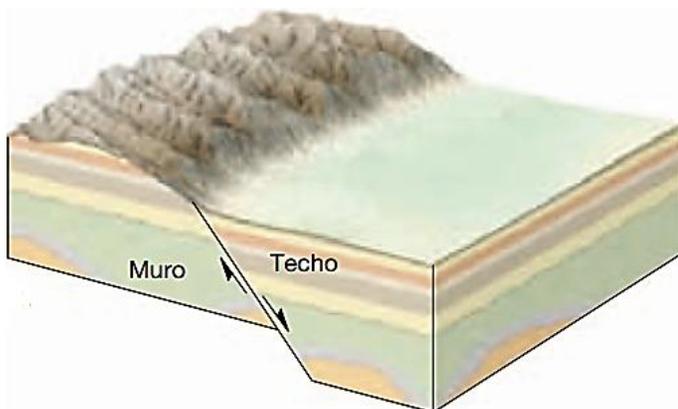


Figura 18 Ejemplo de falla normal donde se aprecia el escarpe de falla resultante en una cadena montañosa. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.

- **Fallas inversas y cabalgamientos:** son las cuales el bloque de techo se desplaza hacia arriba con respecto al bloque de muro (*Figura 19*). Generalmente las fallas inversas tienen buzamientos superiores a 45° mientras que los cabalgamientos presentan valores inferiores a los 45° . Debido a que el bloque de techo se sobre el bloque de muro, estos sistemas de fallas evidencian un acortamiento cortical. Mientras que las fallas normales aparecen en entornos tensionales, los cabalgamientos son resultado de fuertes esfuerzos compresivos.

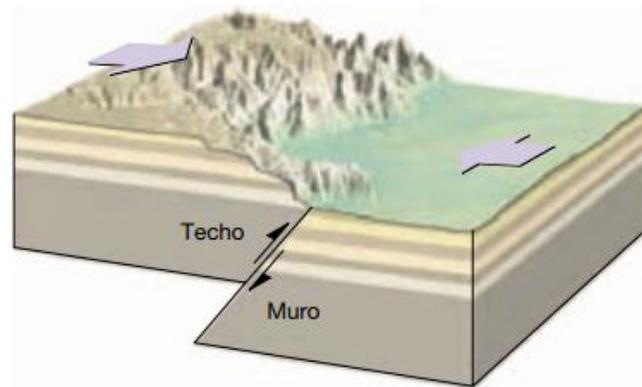


Figura 19 Diagrama que evidencia el comportamiento de una falla inversa.
Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.

- Fallas de desplazamiento horizontal:** Debido a sus dimensiones y a su forma lineal, estas presentan una traza visible a grandes distancias. En lugar de una fractura única a lo largo de la cual tiene lugar el movimiento, las fallas de desplazamiento horizontal están compuestas por un sistema de fracturas paralelas cuya extensión puede ser de varios kilómetros. Sin embargo, los desplazamientos recientes suelen ocurrir a lo largo de una franja de apenas los cientos de metros de ancho, llegando a desplazar lateralmente ríos e incluso caminos y carreteras. (*Figura 20*).

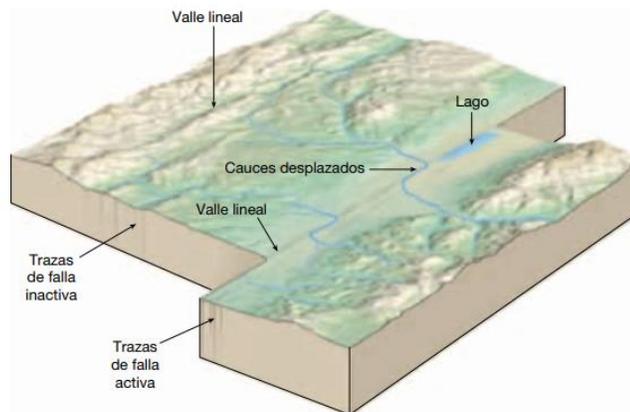


Figura 20 Bloque diagrama que evidencia el comportamiento de las fallas con desplazamiento horizontal. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.

3.4.2. Análisis de los lineamientos a partir el Modelo Digital de Elevación

Gallegos *et al.*, 2008, plantean utilizar modelos de elevación digital del relieve con la finalidad de crear mapas de relieve sombreado (*shaded relief maps*) con un ángulo de iluminación de 45° de la horizontal y tres diferentes azimuts de incidencia luminosa: 120°, 240° y 360°, lo cual posibilita resaltar los diferentes lineamientos y morfoestructuras presentes en el relieve. Se consideran lineamientos reproducibles sólo los obtenidos en al menos dos mapas de relieve sombreado (**Figura 21**).

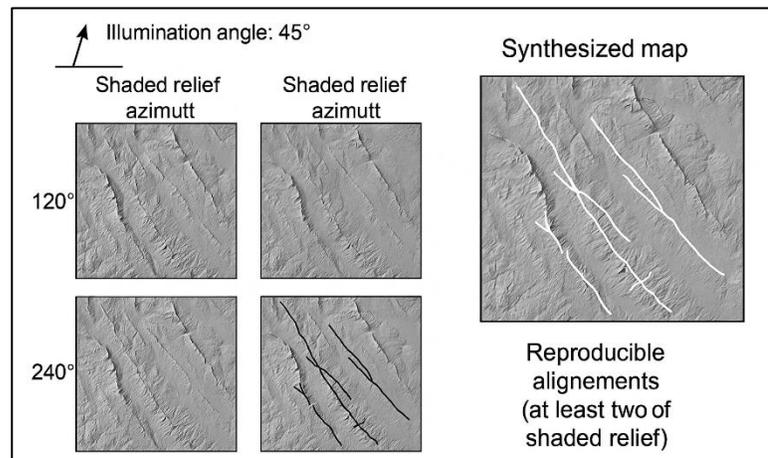


Figura 21 Procedimientos para delimitar fallas y fracturas a partir del sombreado del relieve. Modificado de: Gallegos *et al.* 2008)

Los lineamientos posibilitan la infiltración directa del agua superficial hacia el acuífero. Varios académicos han resaltado la conexión entre los lineamientos y la presencia de agua subterránea haciendo énfasis en como la densidad de lineamientos afecta la producción de los pozos (Li, et al., 2023).

Mengistu *et al.*, 2023 proponen analizar esta variable a partir de la interpretación realizada por Yeh *et al.*, 2016. Dicha metodología propone tener en cuenta la longitud total de los lineamientos verificados divididos por el área unitaria. Lo expresado anteriormente queda plasmado en la siguiente ecuación:

$$L_D = \sum_i^n \frac{L_i}{A_i}$$

Donde ***L_i*** indica la longitud total de lineamientos (km), y ***A_i*** representa al área unitaria (km²).

3.5. Densidad de drenaje (D_d)

3.5.1. Definición de cuenca hidrográfica y generalidades

Una cuenca hidrográfica nos es más que aquella superficie del terreno delimitada por parteaguas en las que varias corrientes de aguas confluyen hacia un punto de cierre o salida (**Figura 22**). Las cuencas se encuentran conformadas por un complejo sistema de entramado de ríos y arroyos los cuales conducen sus cauces hacia uno principal el cual generalmente da su nombre a la cuenca (IMTA, 2019).

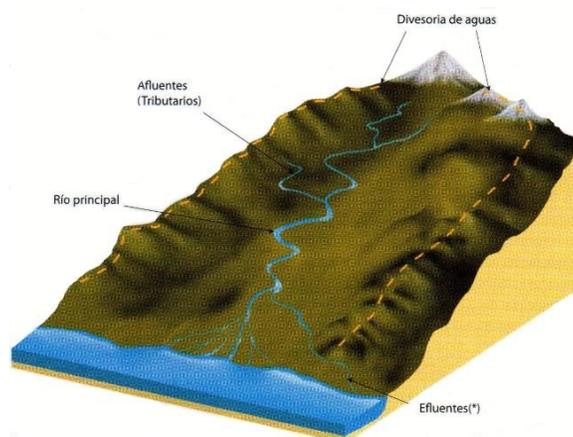


Figura 22 Representación gráfica de una cuenca hidrológica. Obtenido de: Enciclopedia Colaborativa Cubana de la Ciencia (ECURED).

Dentro de una cuenca, puede haber una o más subcuencas y múltiples microcuencas (**Figura 23**). Una cuenca se define como una región que excede las 50,000 ha, mientras que una subcuenca se define como una zona de dimensiones entre 5,000 y 50,000 ha. Por último una microcuenca queda comprendida por ser una cuenca con dimensiones entre 5,000 y 500 ha.

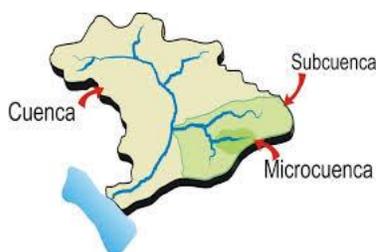


Figura 23 Estructura jerárquica de una cuenca. Obtenido de: Global Water Partnership-Sociedad Geográfica de Lima (2011).

Además de la subdivisión anterior, las cuencas se clasifican según la dinámica hidrológica en 3 porciones distintas a lo largo de una cuenca (**Figura 24**):

1. **Zona de captación o parte alta de la cuenca:** Son aquellas áreas cercanas a los parteaguas en la porción más elevada de la cuenca. Es en esta zona donde ocurren los primeros escurrimientos. En esta porción existe una dominancia de los procesos erosivos influenciada por un control litológico y del relieve.
2. **Zona de almacenamiento o cuenca media:** La constituye una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja. En esta zona confluyen las aguas captadas en las partes altas, manteniendo el río principal un cauce definido. En esta porción de la cuenca prevalecen los procesos de transporte influenciados por la erosión y sedimentación.
3. **Zona de descarga o cuenca baja:** No es más que aquella porción de la cuenca donde el río principal desemboca a ríos mayores, estuarios o humedales. La sedimentación es el proceso imperante en esta zona de la cuenca.

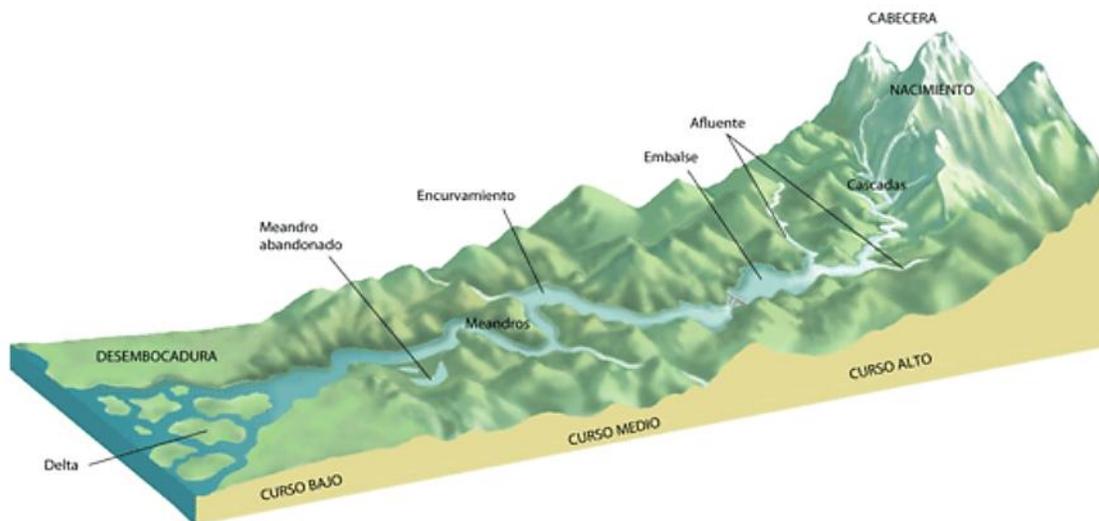
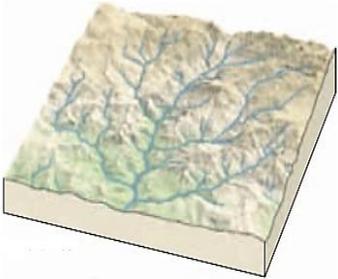
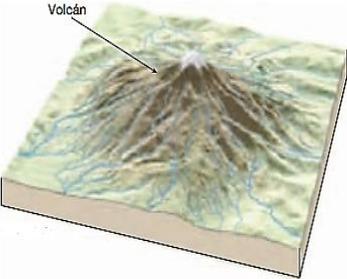
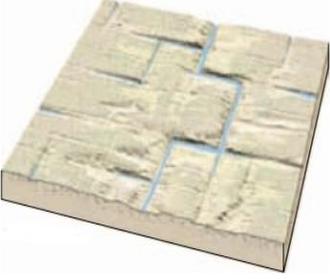


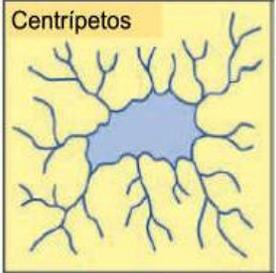
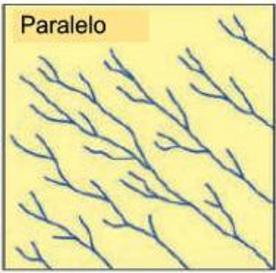
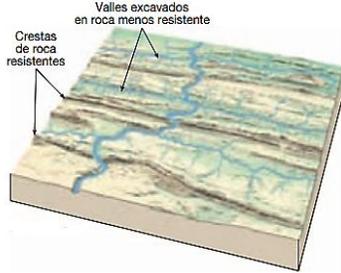
Figura 24 Secciones divisorias del cauce principal de una cuenca. Tomado de:
http://kalipedia.com/klpgeogra_17.Kes#

3.5.2. Patrones de drenaje

Los sistemas de drenaje se encuentran conformados por una red interconectada de corrientes las cuales componen un patrón de drenaje. Los patrones de drenaje pueden variar en función del tipo de terreno sobre el que se desarrollan, siendo la litología un factor decisivo. A continuación, se exponen los principales tipos (**Tabla 4**):

Tabla 4 Diferentes tipos de drenaje existentes. Tomado de Tarbuck & Lutgens, 2005.

<p>Dendrítico</p>	<p>Se caracteriza por la presencia de una ramificación irregular de cursos fluviales tributarios la cual se asemeja a la ramificación de un árbol. Este modelo es característico de zonas donde el sustrato rocoso subyacente es generalmente uniforme.</p>	 <p>Este diagrama muestra un relieve con una red de ríos que se ramifican de manera irregular y orgánica, similar a las ramas de un árbol, sobre un terreno con una topografía suave y uniforme.</p>
<p>Radial</p>	<p>Este modelo se desarrolla en fundamentalmente en conos volcánicos o elevaciones de tipo domo. Ocurre cuando las corrientes divergen desde una zona central hacia los laterales.</p>	 <p>Este diagrama muestra un cono volcánico central con ríos que fluyen radialmente hacia afuera desde su base. Una etiqueta 'Volcán' apunta al punto central de origen de las corrientes.</p>
<p>Rectangular</p>	<p>El modelo de drenaje rectangular ocurre cuando el sustrato rocoso se encuentra afectado por una serie de diaclasa y fallas. Debido a que esas estructuras geológicas son erosionadas con más facilidad debido a la existencia de planos de debilidad.</p>	 <p>Este diagrama muestra un terreno con una red de ríos que fluyen en ángulos rectos, siguiendo los patrones de fallas y diaclasas que crean bloques rectangulares en el paisaje.</p>

<p>Centrípeto</p>	<p>En este patrón de drenaje las corrientes fluyen hacia un punto central del relieve el cual presenta una cota inferior. Generalmente se encuentra asociado a cuerpos de aguas de cuencas cerradas.</p>	 <p>Centrípetos</p> <p>Este diagrama muestra un patrón de drenaje en forma de estrella sobre un fondo amarillo. Las líneas azules representan ríos que convergen desde los bordes hacia un punto central azul oscuro, representando un punto de acumulación de agua en una cuenca cerrada.</p>
<p>Paralelo</p>	<p>Se desarrolla cuando existe una marcada pendiente del relieve. Generalmente ocurre en regiones con accidentes geográficos paralelos y alargados como es el caso de los sistemas de sierras y valles del estado. Las corrientes tributarias usualmente forman líneas paralelas siguiendo el rumbo de la pendiente de la superficie.</p>	 <p>Paralelo</p> <p>Este diagrama muestra un patrón de drenaje con líneas azules que fluyen en direcciones paralelas y similares, representando un sistema de drenaje que sigue una pendiente constante.</p>
<p>Enrejado</p>	<p>Este modelo se desarrolla en zonas donde la litología se compone de alternancias entre rocas resistentes y menos resistentes. Se encuentra bien desarrollado en zonas de los Apalaches donde existe la presencia de pliegues.</p>	 <p>Valles excavados en roca menos resistente</p> <p>Crestas de roca resistentes</p> <p>Este diagrama tridimensional muestra un terreno con estratos horizontales. Las crestas de roca resistentes se elevan, mientras que los valles se han excavado en las capas de roca menos resistente, creando un patrón de drenaje enrejado.</p>

3.5.3. Análisis de la Densidad de drenaje (D_d)

La cuantificación de la longitud total de todos los cursos fluviales en un área determinada se conoce como densidad de drenaje, definiendo la cercanía entre sí de estos cuerpos de agua (Li, Abdelkareem, & Al-Arifi, 2023). Las zonas con una mayor D_d estarán vinculadas a áreas con una alta tasa de infiltración de aguas hacia el subsuelo.

Esta variable queda definida por Greenbaum, 1985 indicando la longitud total de los drenajes en un área determinada. Aplicando la siguiente expresión se tiene que:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}{A}$$

Donde $\sum_{i=1}^{i=n} S_i$ representa la longitud total de drenajes (km) y A área (km²).

Kumar Singh, et al., 2019 proponen asignar diferentes clases en correspondencia al rango de valores entre los que la D_d se encuentre. (*Tabla 5*)

Tabla 5 Valores reclasificados de la D_d en función del aporte a la recarga de aguas subterráneas.

Modificado de Kumar Singh, Zeddies, Shankar, & Griffiths, 2019.

Valores de D_d (km/km ²)	Contribución a la recarga potencial de agua subterránea
< 0.5	Muy baja
0.5 - 1	Baja
1.0 – 1.5	Media
1.5 – 2.0	Alta
> 2.0	Muy Alta

3.6. Uso de suelo y vegetación

El uso del suelo y la cobertura vegetal en un factor crucial en la recarga de las aguas subterráneas (Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2015). Este componente afecta directamente la evapotranspiración y por consiguiente la escorrentía y la recarga de las aguas subterráneas (Jinno et al., 2009; Adhikari et al., 2020 en: Mengistu, Chang, Kim, Kim, & Chung, 2022). Su interpretación se basa fundamentalmente a partir del análisis de imágenes satelitales. La **Tabla 6** resume los posibles tipos de suelos y su relación con la infiltración de aguas.

*Tabla 6 Influencia de los diferentes usos de suelo en función de la recarga potencial de agua subterránea
Modificado de Kumar Singh, Zeddies, Shankar, & Griffiths, 2019.*

Uso del suelo	Contribución a la recarga potencial de agua subterránea
Asentamientos humanos	Muy baja
Bosques	Baja
Pastizales, matorrales y arbustos	Media
Terrenos desprovistos de vegetación	Alta
Cuerpos de agua	Muy alta

3.6.1. Modelo de *Random Forest*

Para la obtención de las diferentes unidades de suelo se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 las cuales fueron procesadas empleando Google Earth Engine, mediante métodos estadísticos y de *machine learning* basados en la aplicación del algoritmo de *Random Forest*.

Un modelo de *Random Forest* se compone de varios árboles de decisión individuales. Cada árbol es entrenado con una muestra ligeramente distinta del conjunto de datos, generada mediante un proceso conocido como *bootstrapping* (**Figura 25**). Con el objetivo de realizar nuevas predicciones a partir de observaciones, se combinan las salidas de todos los árboles que componen el modelo. Muchos enfoques predictivos crean modelos globales, donde una sola ecuación se aplica a todo el espacio muestral. Sin embargo, en situaciones donde hay múltiples predictores que interactúan de manera compleja y no lineal, dificulta encontrar un único modelo global que represente adecuadamente la relación entre las variables.

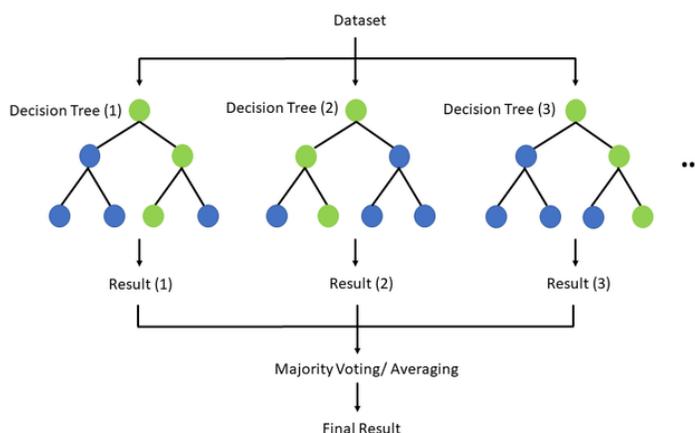


Figura 25 Árboles de decisión de un sistema *Random Forest*. Tomado de <https://interactivechaos.com/>

Los métodos estadísticos y algoritmos de *machine learning* basados en árboles abarcan diversas técnicas supervisadas no paramétricas que segmentan el espacio predictor en regiones más simples, facilitando así la gestión de esas interacciones. Esta particularidad es lo que les otorga gran parte de su eficacia. Los métodos fundamentados en árboles han sido reconocidos como estándar en el ámbito predictivo debido a sus excelentes resultados frente a una variedad considerable de problemas (Rodrigo, 2024).

3.6.2. Ventajas de Random Forest

Random Forest es un algoritmo de aprendizaje automático altamente eficaz y versátil que ofrece numerosas ventajas, como la precisión, la reducción de la varianza, la escalabilidad y la aplicabilidad en múltiples dominios. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, como la complejidad del modelo, el tiempo de entrenamiento y el uso de memoria, y la sensibilidad a la correlación entre características. Es importante tener en cuenta estas ventajas y limitaciones al seleccionar y aplicar este modelo en diferentes tareas de aprendizaje automático. En todo caso, la aplicabilidad multidisciplinar de este método hace que haya sido utilizado en una amplia variedad de campos y problemas, incluyendo, pero no limitado (Trevor , Tibshirani, & Friedman, 2009). Por ejemplo, en la clasificación y regresión en la medida que *Random Forest* es aplicable tanto a problemas de clasificación como de regresión, incluyendo la clasificación de imágenes, la detección de fraude, la predicción de precios de vivienda y la predicción de enfermedades.

En ciencias naturales ha sido utilizado para identificar genes relevantes y sus interacciones en la expresión genética y la susceptibilidad a enfermedades, así como en análisis de datos ecológicos. El algoritmo se ha empleado en la modelización de la distribución de especies y en la predicción de la abundancia de especies en función de variables ambientales (Cutler, y otros, 2007). Una aplicación con un interés especial en ciencias sociales es el reconocimiento de patrones, siendo aplicado en el reconocimiento de patrones en imágenes y en la clasificación de textos. Por último, ha mostrado una utilidad elevada en estrategias de aprendizaje activo, en las que se seleccionan iterativamente ejemplos de entrenamiento con el objetivo de mejorar la precisión del modelo (Cohn, Ghahramani, & Jordan, 1996).

3.7. Análisis de las pendientes a partir del Modelo de elevación del relieve

3.7.2. Generalidades de los modelos de elevación del relieve

El modelo de elevación del relieve constituye una representación numérica de las diferentes elevaciones topográficas, siendo representado por una variable continua cuantitativa la cual queda definida en la siguiente función:

$$Z = f(x, y)$$

Donde **Z** constituye la cota topográfica y las variables **x** y **y** las diferentes coordenadas de cada una de las elevaciones. Generalmente los valores de **x** e **y** se referencian en un sistema de coordenadas plano, regularmente un sistema de proyección cartográfica (Albireo, 2024).

Como se mencionó anteriormente la unidad básica de información de los modelos de elevación la constituyen los diferentes puntos definidos por la triada de coordenadas, estos puntos pueden seguir dos patrones principales atendiendo a la estructuración de los datos (*Figura 26*):

- Modelos de triángulos irregulares (TIN) (*b*).
- Modelos de rejillas regulares (DEM) (*a*).

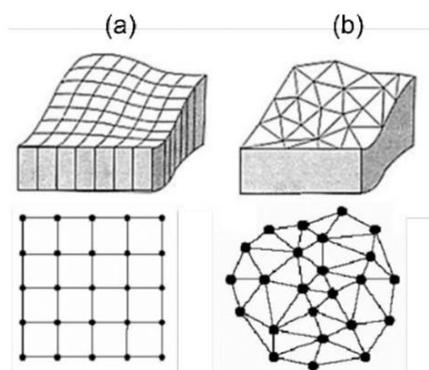


Figura 26 Representación esquemática de los modelos de rejillas regulares (a) y los triángulos irregulares (b). Tomado de: Villanueva, 2020.

Los modelos de triángulos irregulares (TIN) (**Figura 27**) basan su fundamento en la generación de una red de triángulos irregulares en los cuales sus vértices definen las diferentes morfologías del relieve. Generalmente estos modelos se emplean en el diseño de obras lineales.

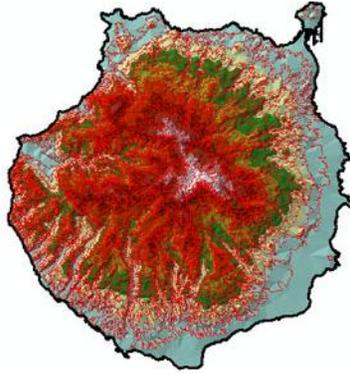


Figura 27 Ejemplo de un modelo de elevación desarrollado a partir de una red de triángulos irregulares (TIN) Tomado de: Gutiérrez, 2016.

Los modelos basados en rejillas regulares (**Figura 28**) se elaboran a partir de la superposición de una malla sobre el relieve la cual a partir de la altitud media de cada celda va a conformar la superficie del relieve. La definición de los datos no es lo suficientemente flexible como para permitir relaciones topológicas, que en cambio se estructuran en una malla. Aunque la estructura es sencilla, generalmente tiene una mala relación costo-calidad, excepto en terrenos llanos. Esta matriz regular es usualmente muy empleada en la construcción de modelos digitales de elevación debido a su sencillo acomodo informático (Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. , 2008).

Los modelos digitales se pueden obtener a partir de sensores remotos como son los satélites, plataformas aerotransportadas o técnicas topográficas tradicionales basadas en el posicionamiento GPS/GNNS, siendo los primeros una alternativa rápida y precisa, aunque muchas veces puede verse dificultada su accesibilidad debido a costos y a limitaciones tecnológicas (Xiaoye, 2008 en: Villanueva, 2020).

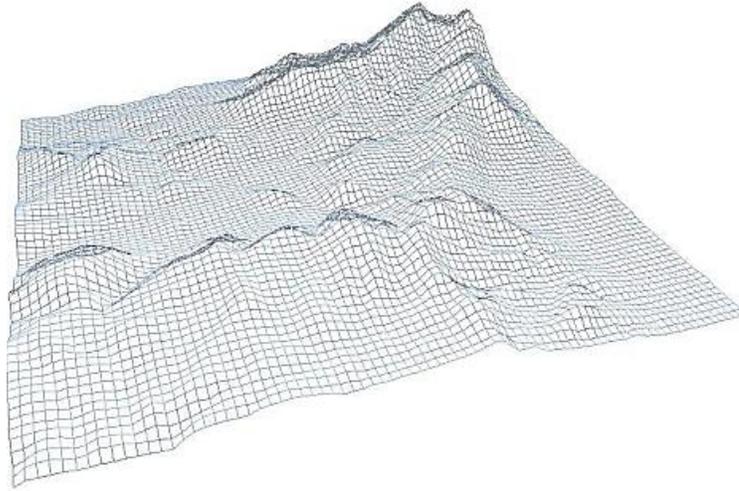


Figura 28 Ejemplo de malla resultante en la generación de la superficie del relieve. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, 2008

3.7.3. Pendientes y disección vertical del relieve

La pendiente constituye un indicador de la inclinación del terreno. El valor de la pendiente aumenta con el aumento de la inclinación. La pendiente se determina tomando la tangente de la superficie. La tangente es el resultado de dividir el cambio de altitud vertical por la distancia horizontal (**Figura 29**).

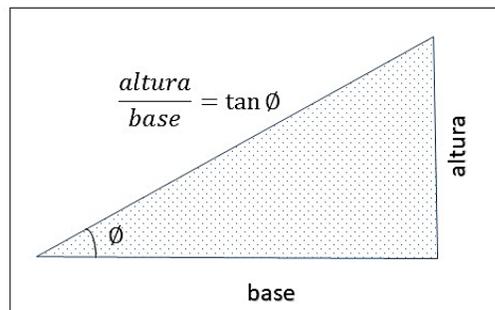


Figura 29 Esquema representativo del cálculo de pendiente.

En GIS las pendientes se calculan mediante una ventana de 3 x 3 celdas tal y como se muestra en la **Figura 30**. Dicha ventana representa la elevación de las 8 celdas adyacentes

que encierran a la celda de columna i y fila j . Esta ventana se traslada continuamente sobre el mapa con la finalidad de determinar la pendiente.

$Z_{i-1, j+1}$	$Z_{i, j+1}$	$Z_{i+1, j+1}$
$Z_{i-1, j}$	$Z_{i, j}$	$Z_{i+1, j}$
$Z_{i-1, j-1}$	$Z_{i, j-1}$	$Z_{i+1, j-1}$

Figura 30 Ventana empleada por el software para determinar las derivadas de las matrices de elevación. Tomado de: Villanueva, 2020

Generalmente valores altos de pendientes incrementan la velocidad de los escurrimientos superficiales, produciendo una disminución en la capacidad de recarga. En tanto, valores de pendientes bajos amplían el período de contacto agua-suelo, posibilitando una mayor tasa de infiltración al manto subterráneo (Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2015).

Por otra parte, la disección vertical (D_v) denota las zonas del relieve que han sufrido de mayor intensidad de levantamientos tectónicos, por lo que los agentes erosivos en estas condiciones intensifican su actividad hasta alcanzar su nivel erosional (Lamadrid Marón & Horta Carbajal, 1977). Las zonas del relieve con una mayor disección vertical del relieve estarán relacionadas a las partes del paisaje con mayores pendientes, ocurriendo así una mayor erosión en las laderas y por ende un mayor escurrimiento (Siddiqui, 2014). La siguiente fórmula agrupa lo especificado anteriormente.

$$D_v = \frac{(H_{max} - H_{in})}{A}$$

Donde H_{max} y H_{min} corresponden a las alturas máximas y mínimas del relieve, mientras A corresponde al área de la cuadrícula en km^2 . Generalmente se toma como área de la celda un 1 km^2 (Lamadrid Marón & Horta Carbajal, 1977), pero Siddiqui (2014) recomienda que esta sea lo suficientemente amplia como para abarcar dos crestas o valles fluviales contiguos. Lo anterior posibilitará obtener un verdadero relieve interno y por lo tanto develar así las morfoestructuras del relieve.

4. Metodología de la investigación

La determinación de zonas de recarga factibles en la RH34 parte de la secuencia de trabajo propuesta por Shaban et al. 2006. Esta ha sido modificada por varios autores entre los que destaca los trabajos de Yeh, et al., 2016, Kumar Singh, et al., 2019, entre otros.

En primera instancia se procederá a recopilar la información espacial existente, procedente del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y al Servicio Geológico Mexicano (SGM). Además, se obtendrá información referente a la hidrología a través de las páginas de consulta de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Se generarán planos bases para cada una de las componentes enunciadas en la fundamentación teórica (**Figura 31**). A partir del filtrado y depuración de datos de las capas base, se concebirá una clasificación y asignación de pesos teniendo los estudios de otros la relación entre cada una de las variables. Posteriormente los datos serán reclasificados en formato **RÁSTER**, ya que este formato permite generar cálculos y análisis de grandes extensiones a través del álgebra de mapas (ESRI, 2016).

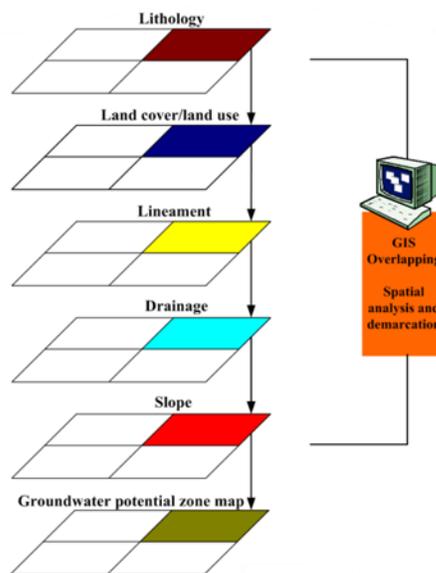


Figura 31. Sobreposición de cada una de las celdas de las componentes rasterizadas analizadas con anterioridad.

Tomado de Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2016.

Yeh, Cheng, Lin, & Lee, 2016, proponen emplear la siguiente formulación para la determinación de la recarga potencial:

$$P_r = \sum w_i * r_i \quad (1)$$

Donde w_i es el factor de peso y r_i es la tasa de factor. Los subíndices i se refieren a las características individuales de cada uno de los componentes. La **Tabla 7** muestra un ejemplo del procedimiento a seguir con la finalidad de obtener los diferentes potenciales de recarga para cada una de las componentes.

Tabla 7 Ejemplo de tabla de ponderación para cada una de las capas analizadas Modificado de Méndez Alvarado, Gómez Sánchez, Silva Hidalgo, & Pinales Munguía, 2022.

Componente	Categoría	Valor inicial	Factor de influencia	Potencial de recarga
Variable analizada	1	5	X	5X
	2	3		3X
	3	2		2X

	i	1		1X

En la imagen a continuación (*Figura 32*) se aprecia de manera simplificada la secuencia de pasos a seguir en la investigación:

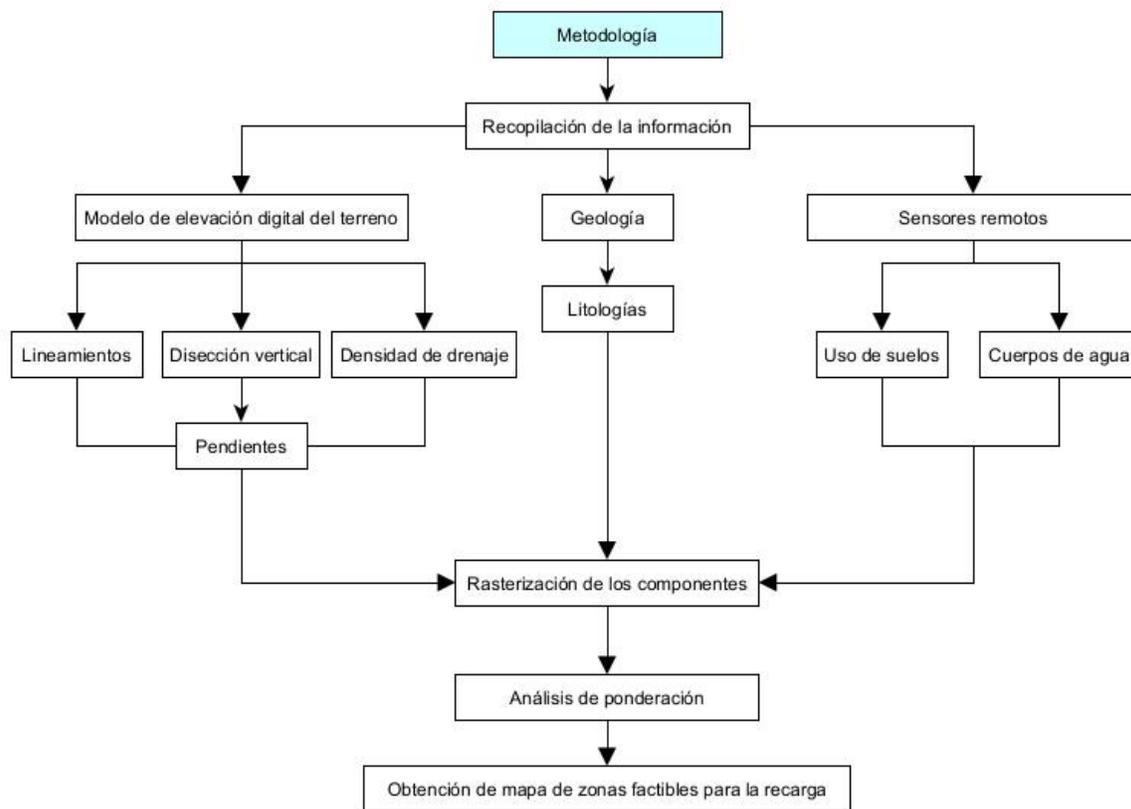


Figura 32 Diagrama de flujo que evidencia la secuencia del procedimiento a emplear en la realización de la investigación.

5. Resultados y discusión

Una vez procesadas las cinco variables, estas fueron analizadas y catalogadas con un potencial de recarga, el cual fue asignado mediante la reclasificación, modificando el peso inicial a partir de la multiplicación de un factor de influencia. La **Tabla 8** muestra de forma resumida cada uno de los potenciales de recarga de las componentes.

Tabla 8 Ponderación de cada una de las componentes analizadas.

Componente	Subcategoría	Peso	Factor de influencia	Potencial de recarga (valor ponderado)
Geología	Aluvial	10	3	30
	Arenas	9		27
	Sedimentarias	6		18
	Metamórficas	5		15
	Ígneas intrusivas	3		9
	Ígneas extrusivas	2		6
Fallas (km x km ⁻²)	0.0 - 0.1	2	2	4
	0.1 - 0.2	4		8
	0.2 - 0.3	6		12
	0.3 - 0.4	8		16
	0.4 - 0.5	10		20
Densidad de drenaje (km x km ⁻²)	2.5 - 3.7	10	1.5	15
	1.9 - 2.5	8		12
	1.4 - 1.9	6		9
	0.8 - 1.4	4		6
	0.0 - 0.8	2		3
Uso de suelo y vegetación	Cuerpo de agua	10	2.5	25
	Agrícola	9		22.5
	Bosque	7		17.5
	Suelo desnudo	5.5		13.75
	Arbustivo	5		12.5
	Herbácea	4		10
	Urbano	2		5

Componente	Subcategoría	Peso	Factor de influencia	Potencial de recarga (valor ponderado)
Relación Pendiente - intensidad de Disección Vertical	0 - 4.2° Planicie poco diseccionada	10	1.5	15
	4.2 - 11.6° Planicie muy diseccionada	8		12
	11.6 - 20.5° Lomerío poco diseccionado	6.5		9.75
	20.5 - 30.9° Lomerío muy diseccionado	4		6
	30,9 - 75,7° Montañas	2		3

5.1. Análisis de las diferentes litologías

A partir del procesamiento de los datos obtenidos del SGM se clasificaron las litologías en 6 clases dependiendo de las características hidráulicas: extrusivas, intrusivas, metamórficas, sedimentarias, arenas y materiales aluviales (*Figura 33*).

Los depósitos aluviales presentan un peso asignado de 30, siendo estos las rocas más propicias para la infiltración de aguas hacia el subsuelo. Este tipo de material se encuentra diseminado fundamentalmente en la zona occidental y centro norte, coincidiendo en algunas zonas con cuerpos de agua que han sufrido un fuerte proceso evaporativo y en áreas de pie de monte, donde las corrientes descendentes de las laderas de las montañas propician la acumulación y sedimentación de clastos de diversos tamaños; estos propician la infiltración de agua hacia el subsuelo.

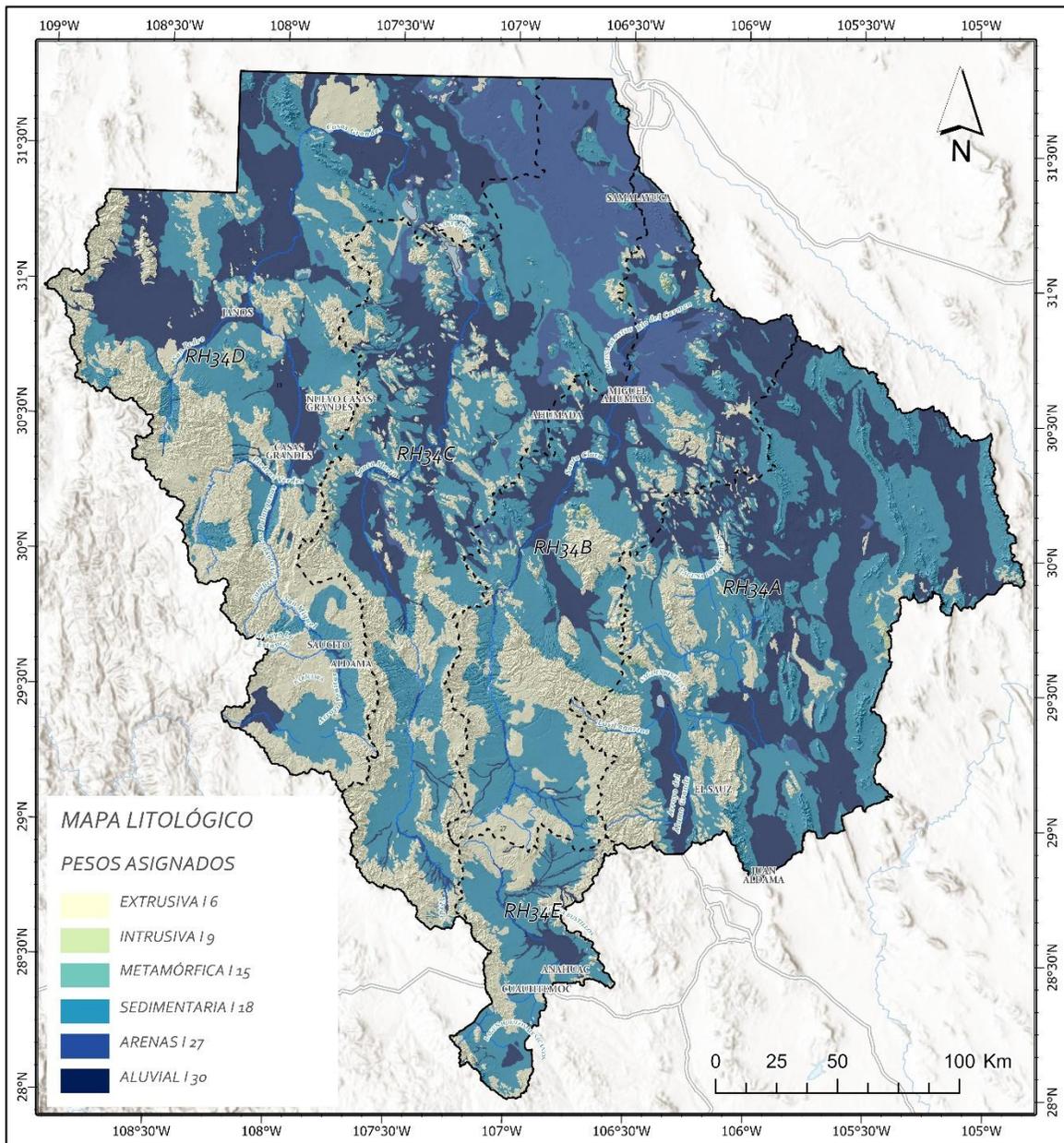


Figura 33 Ponderación de las litologías según sus características hidrológicas. Elaboración propia

Las arenas, con un valor ponderado de 27, se localizan al norte. Estas coinciden en fundamentalmente con los médanos de Samalayuca, y áreas circundantes. Esta litología ha tenido por génesis procesos de meteorización y erosión de rocas preexistentes, las cuales, a partir de agentes exógenos como el aire, tienden a formar suelos no consolidados como las dunas. Las arenas debido a lo antes descrito presentan un alto grado de permeabilidad favoreciendo los procesos de infiltración. Los valles intraserranos se encuentran bajo el dominio de rocas sedimentarias, tales como calizas, conglomerados y arcillas; las cuales guardan gran relación con los principales ríos del área debido a los procesos de arrastre y deposición de los sedimentos.

Las sierras y montañas del área de estudio están conformadas principalmente por rocas ígneas, estas presentan un fuerte grado de agrietamiento debido a los procesos tectónicos que han afectado a estas litologías durante los procesos orogénicos. La infiltración está determinada fundamentalmente por la extensión y profundidad de las fallas.

Las rocas metamórficas presentan un valor ponderado de 15, encontrándose en puntos aislados del área. Estas rocas, fundamentalmente en el caso de los filosilicatos (esquistos), actúan como excelentes rocas almacenando y transmitiendo el agua, debido a la acción sobre estas de procesos metamórficos los cuales modifican el protolito confiriendo propiedades hidráulicas idóneas para los procesos antes descritos, así como la formación de una porosidad secundaria.

5.2. Análisis de la densidad de lineamientos

Las diferentes fallas existentes se obtuvieron a partir de los datos brindados por las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (*SGM*). Además, estas se complementaron a partir de la superposición de imágenes de sombreado del relieve desde diferentes ángulos. El análisis de los resultados evidencia como la zona sur del área alberga los valores máximos correspondientes a esta variable, alcanzando rangos entre 0.4 y 0.5 km/km² en los márgenes ponientes del cuerpo de agua Sauz Encinillas en la RH 34 A (*Figura 34*). También aparecen valores altos en las zonas de parteaguas de las regiones B, C y D, debido estas áreas a coincidir con zonas serranas que presentan un alto grado de agrietamiento debido a las características propias del macizo geológico y la influencia del tectonismo. Estos grupos de fallas se extienden fundamentalmente de norte a sur.

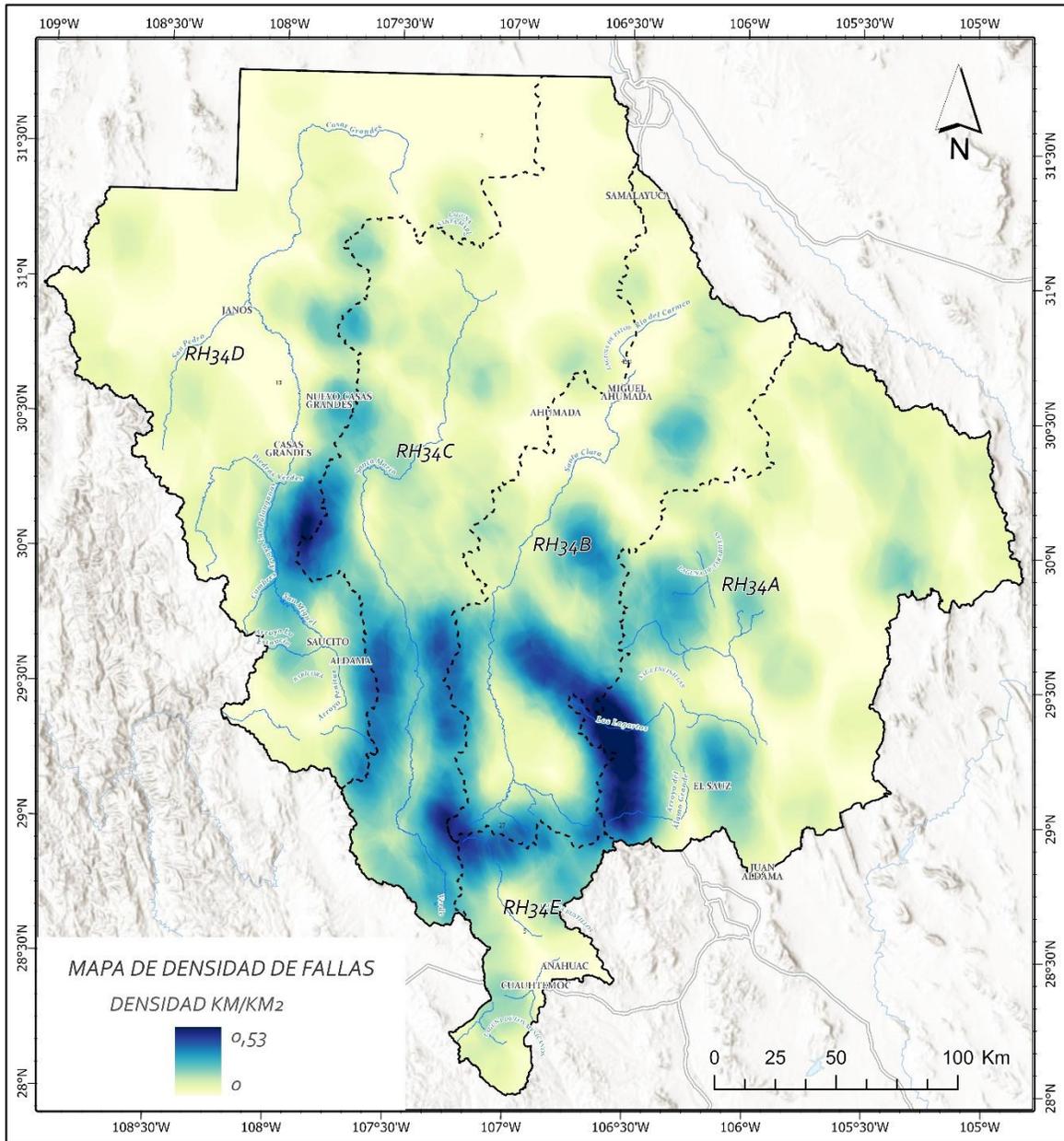


Figura 34 Densidad de fallas reclasificadas. Elaboración propia.

5.3. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje del área presenta valores que oscilan entre 0 a 3.7 km/km² (*Figura 35*). Los mayores valores se asocian fundamentalmente a zonas elevadas del relieve donde se unen varios afluentes de los principales cursos fluviales del área, estas evidencian excelentes áreas para la recarga de los acuíferos mediante procesos de percolación. Al norte, de las regiones C y D existe una porción con una densidad baja de corrientes, coincidiendo fundamentalmente con Médanos de Samalayuca. Para el análisis de esta componente se aplica un factor de influencia de “1.5” reclasificando la densidad de drenaje en 5 clases.

5.4. Uso de suelos y vegetación

Los cuerpos de agua junto a las zonas agrícolas ocupan los valores máximos de ponderación, 25 y 23 respectivamente (*Figura 36*). Las zonas agrícolas en muchas ocasiones debido al retorno de riego posibilitan una recarga indirecta, contribuyendo a la infiltración de agua desde la superficie al subsuelo. Por otro lado, los cuerpos de agua constituyen una fuente fundamental y permanente en la recarga. Las zonas boscosas debido a la acción de las raíces de los árboles favorecen los procesos de retención reduciendo así la escorrentía, así como en el caso de los arbustos y pastizales. Las áreas urbanas aumentan en gran cuantía los procesos de escorrentía debido a la existencia de materiales como el hormigón que impiden la ocurrencia de la infiltración.

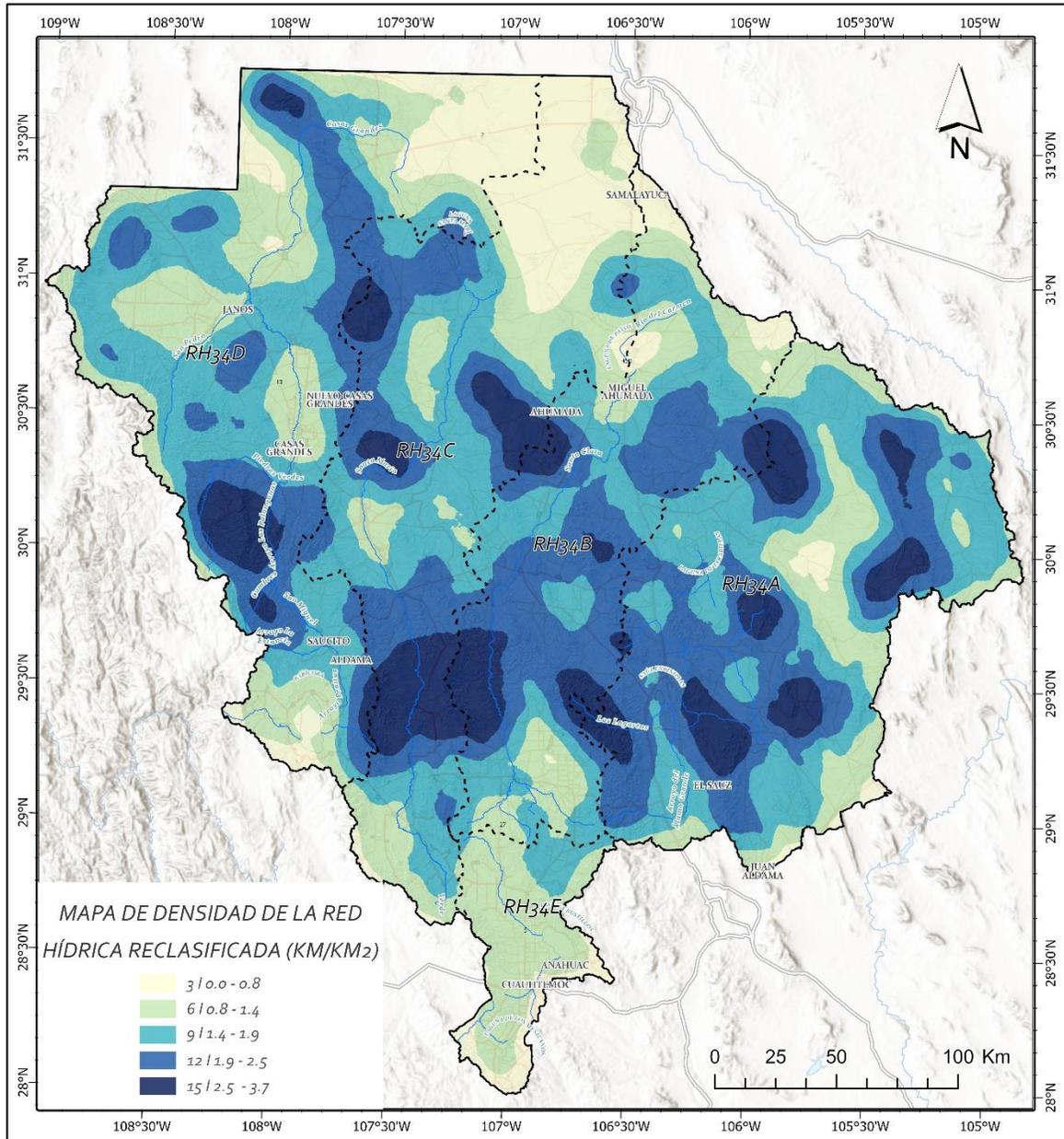


Figura 35 Densidad de la red de drenaje reclasificada en 5 clases. Elaboración propia.

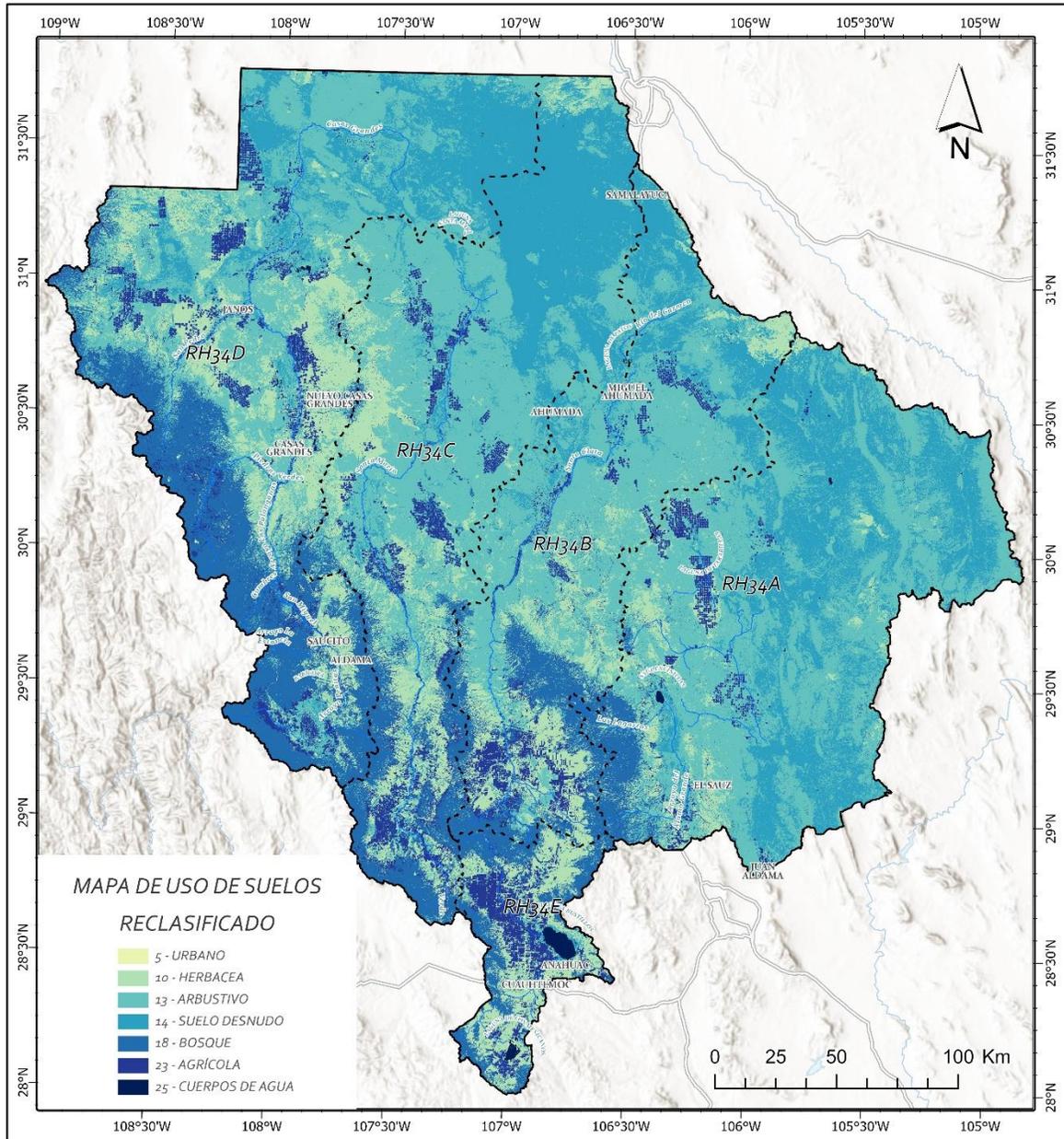


Figura 36 Usos de suelos ponderados según la posibilidad de infiltración.

5.5. Análisis de las pendientes y la Disección vertical (Dv)

La pendiente constituye un factor muy importante en el estudio de las aguas subterráneas, siendo empleadas en múltiples estudios para evaluar las zonas potenciales de recarga. Se reclasificaron en 5 clases en correspondencia a la factibilidad de los procesos de infiltración. Los valores de pendiente comprendidos entre 0 y 4.2° con una ponderación de 15, resultan ser excelentes para la acumulación e infiltración de agua, estas zonas ocupan aproximadamente un 75% del área (*Figura 37*). En cambio, las sierras y sus inmediaciones presentan pendientes más pronunciadas por lo que existen valores altos de escorrentía después de la ocurrencia de precipitaciones, por esta razón los pesos mínimos asignados.

La disección vertical del relieve, por otra parte, exhibe la presencia de las diferentes morfoestructuras del área manifestando cuanto ha sido erosionado el relieve producto a la acción de fuerzas neotectónicas. Las zonas con bajos valores de disección se localizan principalmente al norte del área y en valles intramontanos. En estas zonas la acción del tectonismo resulta leve, produciendo poco contraste en el relieve. Esto provoca valores bajos de escorrentía aumentando así la percolación del líquido. Valores elevados se localizan principalmente hacia el poniente del área, coincidiendo con la Sierra Madre Occidental y los sistemas correspondientes a las elevaciones de los “valles y sierras”. Estas zonas presentan un fuerte desnivel altitudinal, el cual provoca altos valores de la pendiente y la formación de cañones profundos. En estas zonas existe una mayor erosión hídrica, llegando a producir flujos torrenciales durante el período lluvioso. La acción de las fuerzas neotectónicas ha provocado un levantamiento de las diferentes morfoestructuras del relieve, aumentando así el agrietamiento y fallamiento de estas áreas; existiendo una mayor incidencia de los procesos erosivos. Debido a lo mencionado con anterioridad en estas porciones del área de estudio existe una mayor incidencia de la escorrentía debido a que el agua desciende velozmente por cañones y laderas cuando ocurren las precipitaciones, con muy poca acumulación e infiltración en la superficie.

5.6. Evaluación de las zonas potenciales de recarga

Una vez realizada la superposición de cada una de las variables analizadas se obtuvo un mapa de áreas potenciales de recarga con cinco clases y su capacidad de recarga, los cuales van desde nula hasta excelente (**Figura 38**). Se decidió emplear el método de *Natural Breaks (Jenks)* producto a la capacidad de este para optimizar la agrupación entre valores similares y aumentar las diferencias entre cada una de las clases. Este método es ampliamente empleado en estudios que manejan datos que no siguen una distribución uniforme. (Lansley, De Smith, Goodchild, & Longley, 2018). El método de Jenks analiza las diferentes rupturas naturales en los conjuntos de datos posibilitando una clasificación más representativa de la distribución real de estos. Esta característica resulta de gran valor en estudios de recarga hídrica donde las variables analizadas pueden tener rangos de valores no lineales y con concentraciones específicas. Además, ESRI (2020) sugiere el empleo de este método en estudios en los que se busca una representación más exacta visualmente de los diferentes patrones espaciales.

Los resultados obtenidos indican que el 11% del área de estudio presenta una capacidad excelente, coincidiendo fundamentalmente con las áreas de pie de monte. En contraste, la capacidad nula para la recarga se restringió a un 13% de la superficie del acuífero, estas zonas se encuentran fundamentalmente asociadas con las sierras y montañas presentes. Para el caso de las categorías buena, moderada y baja se encontraron 29%, 25%, 22% respectivamente. Destaca que un tercio del área de estudio presenta una capacidad moderada, pero a su vez en la que mayor índice de riego presenta debido a sus actividades productivas.

Conclusiones

El empleo de los Sistemas de Información Geográfica permitió la delimitación y evaluación de zonas potenciales de recarga de los acuíferos conformantes de la Región Hidrológica 34 en el estado de Chihuahua. El estudio reveló que aunque en el área presenta un clima fundamentalmente árido y semiárido, lo cual inhibe la ocurrencia de precipitaciones durante gran parte del año, prevalecen zonas con ambientes geológicos, geomorfológicos y con usos de suelos propicios para la ocurrencia de procesos de infiltración de agua hacia el subsuelo.

Se clasificaron las zonas potenciales de recarga en 5 categorías atendiendo a las diferentes características de cada una de estas zonas, resaltando el 11% con características óptimas para la infiltración de agua, estas zonas coinciden con áreas de piedemonte y valles con litologías permeables y suaves pendientes. Las zonas serranas y principales áreas urbanizadas representan aproximadamente un 13% del área, estas zonas resaltan por su baja tasa de infiltración debido a la existencia de una pendiente abrupta o la presencia de suelos impermeables que limitan considerablemente la infiltración.

El uso de suelo resulta de gran influencia en el proceso de recarga. Las áreas agrícolas, aunque representan zonas con altos consumos de volúmenes de agua, una cifra considerable de esta constituye parte de la recarga indirecta hacia el subsuelo. En cambio, las áreas urbanas debido a la existencia de superficies impermeables como el asfalto y el hormigón actúan como barrera que impiden la ocurrencia de los procesos de infiltración favoreciendo a su vez la escorrentía.

La ponderación de cada una de las variables analizadas en la investigación posibilitó determinar y establecer cada una de las relaciones entre sí, respaldada por la superposición de cada una de las capas rasterizadas y la unión de datos geoespaciales. El modelo representa una excelente herramienta en la toma de decisiones en lo referente a la gestión del recurso hídrico debido a que facilita y agiliza la identificación de zonas geográficas que necesiten mayor atención y esfuerzos de conservación para la implementación de procesos de recarga. Se resalta además la facilidad de replicar esta metodología a otras regiones con condiciones semejantes, lo cual extiende su aplicabilidad con relación a la planificación territorial y la sostenibilidad hídrica.

Para finalizar, los resultados obtenidos corroboran la necesidad imperiosa de implementar una perspectiva holística del acuífero de las regiones áridas del país como la RH-34, cuyo balance hídrico entre oferta y demanda del recurso está siendo un factor que, cada vez más, considera su debido equilibrio en la implementación y regulación técnica, informada y científicamente comprobada.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la investigación resulta de vital interés fomentar estrategias de vitales de conservación en zonas designadas con un alto grado potencial de recarga en la RH-34. Estas zonas deben ser protegidas mediante la aplicación de políticas que posibiliten la preservación de las diferentes características de la zona, por lo que se recomienda evitar el crecimiento no planificado de los asentamientos urbanos así como cambios en el uso de suelo y la sobreexplotación de los acuíferos presentes en el área. Se deben implementar programas municipales y estatales que fomente una buena práctica de ordenamiento territorial y de buenas prácticas agrícolas que beneficien los procesos de recarga e incidan en una disminución de la escorrentía, tales como el riego por goteo, la conservación de la cobertura vegetal y la rotación de los cultivos.

Se debe fortalecer e incrementar el monitoreo hidrológico en la zona, mediante la activación y construcción de estaciones meteorológicas automatizadas, así como pozos de muestreo piezométrico que permitan evaluar y dar seguimiento continuo a variables como la evapotranspiración, precipitaciones y evolución de los niveles de los pozos. Esto permitiría dar seguimiento a futuras investigaciones, así como validar modelos generados mediante el empleo de SIG.

Por último, se propone replicar esta metodología a otras zonas del estado y a nivel nacional con la finalidad de cartografiar las diferentes potencialidades en cuanto a la recarga en el territorio, contribuyendo a una preservación de los acuíferos, evitando la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo y apaleando los efectos del cambio climático en las regiones áridas y semiáridas del país.

Referencias

- Albireo. (2024). *Topografía y geomática*. (Templatic, Editor, & Templatic) Recuperado el 23 de octubre de 2024, de <http://www.albireotopografia.es/topografia-del-relieve/>
- Balek, J. (1988). Groundwater Recharge Concepts. *Springer*, 222, 3 - 9. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-015-7780-9_1
- Cohn, D., Ghahramani, Z., & Jordan, M. (1996). Active Learning with Statistical Models. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 129-145.
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautémoc (0805), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0805.pdf
- CONAGUA. (07 de agosto de 2024). *Gerencia de aguas subterráneas*. Obtenido de <https://sigagis.conagua.gob.mx/sobreexplotados/>
- Custodio Gimena, E., Llamas Madurga, R., & Samper, J. (1997). La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. (I. T. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Ed.)
- Cutler, D., Edwards Jr., T., Beard, K., Cutler, A., Hess, K., Gibson, J., & Lawler, J. (2007). *Random Forest for clasification in ecology* (Vol. 88). doi: <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. . (2008). *Representación del relieve*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- ESRI. (2020). *How Natural Breaks (Jenks) classification works*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/>
- Fernández Pozo, L. F., & García Navarro, A. (1999). Capacidad de uso de los Cambisoles de extremadura (España). *Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 6, 37-45. Obtenido de <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo6/art4t6t.htm>
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice - Hall.
- Gallegos, E., Martínez Dopico, C. I., & Berbeglia, Y. (2008). Mapeo de lineamientos a partir de un DEM (SRTM3): Desarrollo y aplicaciones para el estudio de un área de los Andes Patagónicos Septentrionales. *GEOACTA*(33), 43-47.

- Gallegos, J. A. (1995). La clasificación de las rocas sedimentarias: sugerencias para su aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*.
- Gutiérrez, R. D. (2016). *GIS & BEERS*. Obtenido de <https://www.gisandbeers.com/creacion-de-archivos-tin-mediante-archivos-vectoriales/>
- Hernández Jiménez, A., Vera Macías, L., Naveda Basurto, C. A., Veliz Mantuano, F. W., Guzmán Cedeño, Á. M., Vivar Arrieta, M., . . . León Aguilar, R. V. (2012). Tipos de suelos y características de las partes bajas medias y bajas de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador. *ESPAMCIENCIA*, 87 - 97. Recuperado el 10 de 06 de 2024, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9138903&orden=0&info=link>
- IMTA. (2019). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2004). *Guía para la interpretación de cartografía edafología*. Aguascalientes: INEGI. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Ciudad de México. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de la cartografía. Edafología*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, I. N. (2003). *Síntesis de Información geográfica del estado de Chihuahua*.
- Kabeto, J., Adeba, D., Regasa, M. S., & Leta, M. K. (2022). Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing Techniques: Case Study of West Arsi Zone, Ethiopia. *Water*, 2-29.
- Kariyawasam, T., Basnayake, V., Wanniarachchi, S., Sarukkalige, R., & Rathnayake, U. (2022). Application of GIS Techniques in Identifying Artificial Groundwater Recharging Zones in Arid Regions: A Case Study in Tissamaharama, Sri Lanka. *Hydrology*, 9, 224. doi:doi.org/10.3390/hydrology9120224

- Lamadrid Marón, J., & Horta Carbajal, R. (1977). *Geomorfología*. La Habana: Pueblo y educación.
- Lansley, G., De Smith, M., Goodchild, M., & Longley, P. (2018). Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools . *The Winchelsea Press*.
- Lerner, D., Issar, A., & Simmers, I. (1990). Groundwater Recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. *IAH International Contributions to Hydrogeology*, 8.
- Li, Y., Abdelkareem, M., & Al-Arifi , N. (2023). Mapping Potential Water Resource Areas Using GIS-Based Frequency Ratio and Evidential Belief Function. *Water*, 15(480). doi:<https://doi.org/10.3390/w15030480>
- Manzanares Rivera, J. L. (2016). Hacer florecer al desierto: Análisis sobre la intensidad de uso de los recursos hídricos subterráneos y superficiales en Chihuahua, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(77), 35 - 61. doi:10.11144/Javeriana.cdr13-77.hfda
- Martínez, F. (Ed.). (23 de enero de 2023). *Para todo México*. Recuperado el 22 de junio de 2024, de <https://paratodomexico.com/index.html>
- Méndez Alvarado, M. Á., Gómez Sánchez, J. L., Silva Hidalgo, H., & Pinales Munguía, A. (2022). Delimitación de Áreas Prioritarias de Recarga para el Acuífero Mecoqui - Delicias. *FINGUACH*, 3(5). Obtenido de <https://vocero.uach.mx/index.php/finguach>
- Mexicano, S. G. (2020). *Carta Geológica Minera Agua Zarca*. Pachuca.
- Mexicano, S. G. (2020). *Museo virtual de rocas*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-metamorficas.html>
- Orozco - Centeno, W. P., Branch Bedoya, J. W., & Jiménez - Builes, J. A. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 36, 5 - 9. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/rbct.n36.44037>
- Rodrigo, J. A. (marzo de 2024). *cienciadedatos.net*. Obtenido de https://cienciadedatos.net/documentos/py08_random_forest_python
- Rodríguez, Y. A. (2021). *Evaluación de la acumulación de azolves en embalses ubicados en la RH-24, Bravo - Conchos*. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua.

Obtenido

de

<http://repositorio.uach.mx/358/1/EVALUACION%20DE%20LA%20ACUMULACION%20DE%20AZOLVES%20EN%20EMBALSES%20UBICADOS%20EN%20LA%20RH-24%2C%20BRAVO-CONCHOS.pdf>

Rushton, K. (1988). Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. *Estimation of Natural Groundwater Recharge*, 223 - 237.

SEMARNAT. (10 de 06 de 2024). *Los suelos de México*. (D. G. Ambiental, Ed.) Recuperado el 06 de 10 de 2024, de <https://paot.org.mx>

Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2006). Use of Remote Sensing and GIS to Determine Recharge Potential Zones: The Case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 433 – 443.

Siddiqui, S. (2014). Appraisal of Active Deformation Using DEM-Based Morphometric Indices Analysis in Emilia-Romagna Apennines, Northern Italy. *Geodynamics Research International Bulletin*. Obtenido de <http://www.geo-dynamica.com>

Tarbut, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. (M. M. Romo, Ed.) Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

Trevor, H., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Standford: Springer Science+Business. doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>

Vélez Otálvaro, M. (2004). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*. Universidad Nacional – Medellín, Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulicos, Medellín. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7964>

Villanueva, J. E. (2020). *Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenaza por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales*. Madrid: Escuela técnica superior de ingenieros de y energía.

Yeh, H.-F., Cheng, Y.-S., Lin, H.-I., & Lee, C.-H. (2015). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*. doi:10.1016/j.serj.2015.09.005

Glosario

Acuífero: Formación geológica que permite la acumulación y transmisión de agua subterránea a través de sus poros o fracturas.

Área de recarga: Zona geográfica donde el agua de lluvia o superficial se infiltra en el suelo y alcanza los acuíferos subyacentes.

Cuenca hidrográfica: Unidad geográfica delimitada por divisorias topográficas, donde toda el agua superficial drena hacia un mismo punto de salida.

Densidad de drenaje (Dd): Relación entre la longitud total de los cursos de agua y el área de la cuenca, utilizada como indicador del potencial de infiltración o escorrentía.

Edafología: Ciencia que estudia la composición, formación, clasificación y uso de los suelos, así como su influencia en los ecosistemas y la infiltración del agua.

Evapotranspiración: Pérdida de agua del suelo hacia la atmósfera debido a la evaporación directa y a la transpiración de las plantas.

Geología: Ciencia que estudia la composición, estructura y evolución de la Tierra, incluyendo las rocas, minerales y procesos geodinámicos que afectan la recarga hídrica.

Geomorfología: Rama de la geografía física que estudia el relieve terrestre, su origen, evolución y relación con los procesos hidrológicos.

GIS (Sistema de Información Geográfica): Herramienta computacional que permite capturar, gestionar, analizar y visualizar información geoespacial para la toma de decisiones.

Infiltración: Proceso por el cual el agua superficial penetra en el suelo y se desplaza hacia capas más profundas.

Lineamientos estructurales: Fracturas, fallas o diaclasas geológicas que condicionan el flujo subterráneo y pueden facilitar la infiltración del agua.

Litología: Estudio de las características físicas y químicas de las rocas, incluyendo su textura, composición y permeabilidad.

Modelo digital de elevación (MDE): Representación numérica tridimensional del relieve terrestre, usado para analizar pendientes, cuencas y flujos hídricos.

Piezometría: Medición del nivel de agua en los pozos para determinar el estado y comportamiento de los acuíferos.

Recarga artificial: Introducción controlada de agua superficial al subsuelo mediante obras hidráulicas para incrementar la recarga del acuífero.

Recarga natural: Proceso por el cual el agua proveniente de la lluvia, ríos o cuerpos de agua se infiltra de manera espontánea hacia los acuíferos.

SIG (Sistema de Información Geográfica): Plataforma tecnológica que permite analizar y representar datos georreferenciados para estudios ambientales y territoriales.

Teledetección: Técnica que emplea imágenes satelitales o aéreas para adquirir información del terreno sin contacto directo, útil para caracterizar cobertura vegetal, uso de suelo, entre otros.

Uso del suelo: Clasificación de la superficie terrestre en función de las actividades humanas (agricultura, urbano, forestal) o coberturas naturales (bosques, cuerpos de agua), lo cual influye en la capacidad de recarga.

Zona no saturada: Capa del subsuelo donde los poros no están completamente llenos de agua; es atravesada por el agua infiltrada antes de llegar a la zona saturada.

Zona saturada: Región subterránea donde todos los espacios porosos están completamente llenos de agua; constituye el cuerpo principal del acuífero.

Curriculum Vitae

Mi nombre es Dennis Evelio Gácita Pérez, graduado en julio de 2019 de la carrera Ingeniería en Geología en la Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”. Durante este año también concluí cursos de perfeccionamiento del idioma inglés. Una vez concluidos mis estudios me desempeñé como Especialista “B” en Geotecnia en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas a la Construcción (**INVESCONS**) participando en la investigación del diseño y construcción de cimentaciones de los principales hoteles que se estaban construyendo en La Habana, donde trabajé durante 2 años. En el año 2021 fui ascendido a Especialista “A”, desempeñando nuevas labores como diseñador de cimentaciones profundas. Participé en la construcción de la Fábrica de Cementos “26 de Julio” en Nuevitas, Cuba, junto a la compañía danesa FLSmidth, donde realicé ensayos sísmicos y ultrasónicos, así como pruebas de carga para determinar la integridad de pilas de cimentación. En el año 2023 vine a México, específicamente la ciudad de Chihuahua con la finalidad de estudiar la Maestría en Ingeniería en Hidrología en la Universidad Autónoma de Chihuahua. Durante este proceso he adquirido y perfeccionado nuevas habilidades como: dominio de los Sistemas de Información Geográfica, gestión de aguas superficiales y subterráneas, hidrología ambiental, modelación de acuíferos, etc.

Correo electrónico: dennisgacita9501@gmail.com

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por <Dennis Evelio Gácita Pérez>.