

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas,  
aplicando técnicas de teledetección pasiva en la cuenca  
Bocapán, Tumbes 2025**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniera Agrícola

**PRESENTADO POR:**

Bach. Lesly Yanet Huamán Guerrero

**Tumbes, 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas,  
aplicando técnicas de teledetección pasiva en la cuenca  
Bocapán, Tumbes 2025**

**Tesis aprobada en forma y estilo por:**

**Dr. Francisco Alburqueque Viera (Presidente)**

Código ORCID: 0000-0002-7468-5386

**Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Secretario)**

Código ORCID: 0000-0003-0841-3064

**Dr. Eber Gines Tafur (Vocal)**

Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

**Mg. Luis Chávez Roncal (Accesitario)**

Código ORCID: 0000-0002-7463-1919

**Tumbes, 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas,  
aplicando técnicas de teledetección pasiva en la cuenca  
Bocapán, Tumbes 2025**

**Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido  
y forma**

**Bach. Lesly Yanet Huamán Guerrero (Autor)**

**Dr. Eber Gines Tafur (Asesor)**

Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

**Ing. Adrian O. Gamboa Cruz (Co Asesor)**

**Tumbes, 2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO  
SECRETARIA ACADÉMICA**



**ANEXO VIII**

*"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"*

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS  
MODO PRESENCIAL**

En Tumbes, a los 08 días, del mes de AGOSTO, del año 2025, siendo las 13 horas con 55 minutos, en el Campus Universitario, de la Facultad de Ciencias Agrarias, en el ambiente del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concreto y Asfalto, de forma presencial, se reunieron el Jurado calificador, designado con Resolución N°081-2025/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, de fecha 28 de abril del año 2025, conformada por Dr. Francisco Alburquerque Viera (Presidente), Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Secretario), Dr. Eber Gibes Tafur (Vocal) y Mg. Luis Chávez Roncal (Accesitario), reconociendo en la misma resolución al Dr. Eber Gibes Tafur como **Asesor**, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación del Informe Final de la Tesis "Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas, aplicando técnicas de teledetección pasiva en la cuenca Bocapan, Tumbes 2025", para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por la Bach. LESLY YANET HUAMÁN GUERRERO, el jurado en pleno declara APROBADA, por UNANIMIDAD, con el calificativo MUY BUENO.

Se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda APTA para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniero Agrícola, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N°30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las 14 horas, con 15 minutos, del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 08 de AGOSTO del año 2025

DR. FRANCISCO ALBURQUEQUE VIERA DNI N° <u>03605124</u> CODIGO ORCID <u>0000-0002-7468-5386</u> Presidente	DR. JOSÉ MODESTO CARRILLO SARANGO DNI N° <u>00253850</u> CODIGO ORCID <u>0000-0003-0841-3064</u> Secretario
DR. EBER GIBES TAFUR DNI N° <u>17542075</u> CODIGO ORCID <u>0000-0003-0366-4468</u> Vocal	MG. LUIS CHÁVEZ RONCAL DNI N° <u>32964975</u> CODIGO ORCID <u>0000-0002-7463-1919</u> Accesitario

# Lesly Yanet Huamán Guerrero

## TESIS\_Lesly Yanet Huaman Guerrero (2) (1)

 Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas, aplicando técnicas de teledetección pasiva en la cuenca Bocapán, Tumbes 20...

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:497537489

Fecha de entrega

12 sept 2025, 11:16 GMT-5

Fecha de descarga

12 sept 2025, 11:22 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS\_Lesly Yanet Huaman Guerrero (2) (1).docx

Tamaño del archivo

53.2 MB

96 páginas

14.056 palabras

75.480 caracteres



**Asesor: Dr. Eber Gines Tafur**  
Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

## 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas

### Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Asesor: Dr. Eber Gines Tafur  
Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

### Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	revistas.utm.edu.ec	1%
2	Internet	ciencialatina.org	1%
3	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2025-09-05	<1%
4	Internet	repositorio.untumbes.edu.pe	<1%
5	Internet	tesis.usat.edu.pe	<1%
6	Internet	repositorio.unh.edu.pe	<1%
7	Trabajos del estudiante	Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2022-05-10	<1%
8	Internet	repositorio.upn.edu.pe	<1%
9	Internet	dspace.esPOCH.edu.ec	<1%
10	Internet	cdn.www.gob.pe	<1%
11	Internet	hdl.handle.net	<1%



**Asesor: Dr. Eber Gines Tafur**  
 Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

12	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2025-07-16	<1%
13	Publicación	EVALUACIONES AMBIENTALES PARA LA SOSTENIBILIDAD S.A.C.. "PAD - Estación d...	<1%
14	Internet	repositorio.ana.gob.pe	<1%
15	Internet	repository.unimilitar.edu.co	<1%
16	Internet	repositorio.uncp.edu.pe	<1%
17	Trabajos del estudiante	Universidad de Piura on 2023-10-14	<1%
18	Internet	repository.udistrital.edu.co	<1%
19	Internet	www.slideshare.net	<1%
20	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2025-08-05	<1%
21	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
22	Internet	repositorio.upec.edu.ec	<1%
23	Publicación	TEMA LITOCLEAN S.A.C.. "DIA para el Proyecto de Instalación del Sistema de Distr...	<1%
24	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-08-05	<1%
25	Internet	acolita.com	<1%

Asesor: Dr. Eber Gines Tafur  
Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

26	Internet	core.ac.uk	<1%
27	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
28	Internet	www.scribd.com	<1%
29	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2025-03-05	<1%
30	Internet	repositorio.upao.edu.pe	<1%
31	Internet	www.researchgate.net	<1%
32	Internet	es.slideshare.net	<1%
33	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
34	Internet	repositorio.ug.edu.ec	<1%
35	Internet	repositorio.una.edu.ni	<1%
36	Internet	revistas.unc.edu.ar	<1%
37	Trabajos del estudiante	INACAP on 2022-12-02	<1%
38	Trabajos del estudiante	UCL on 2025-01-16	<1%
39	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Santa María on 2024-10-01	<1%



Asesor: Dr. Eber Gines Tafur  
Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

40 Trabajos del estudiante

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD on 2024-08-31

<1%



**Asesor: Dr. Eber Gines Tafur**  
Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

## **DEDICATORIA**

A mi Dios, por cuidarme y potegerme en cada paso de mi vida.

A mis padres, Andres y Juana por ser el pilar para no desistir en el camino, y así poder lograr cada propósito en mi vida.

A mis hermanos Mayra, Samuel, Yeison y Adrian, por su constantente soporte y motivación.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi asesor el Dr. Eber Gines Tafur, por su compromiso y asistencia brindada cuando lo requería.

A la Ing. Dayana Cruz, por brindarme su ayuda y compartir sus conocimientos conmigo y así poder culminar esta tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	xi
AGRADECIMIENTO .....	xii
RESUMEN .....	xxi
ABSTRACT .....	xxii
I. INTRODUCCIÓN .....	23
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	25
2.1. Conceptos teóricos .....	25
2.1.1. aguas subterráneas .....	25
2.1.2. acuíferos .....	25
2.1.3. Teledetección.....	25
2.1.4. Tipos de sensores.....	25
2.1.5. Satélite Landsat 8 .....	27
2.1.6. Modelo digital de elevaciones.....	29
2.1.7. Pendiente.....	29
2.1.8. Precipitación .....	30
2.1.9. Densidad de drenaje.....	30
2.1.10. Índice de vegetación normalizada (NDVI) .....	30
2.1.11. Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI) .....	31
2.1.12. Temperatura superficial del suelo (LST).....	32
2.1.13. Geología.....	34
2.1.14. Uso del suelo.....	35
2.1.15. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP).....	35
2.2. Antecedentes .....	37
2.2.1. Internacionales.....	37
2.2.2. Nacionales .....	40
2.2.3. Locales.....	42

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1. Ubicación del área de estudio.....	43
3.1.1. Ubicación Geopolítica .....	43
3.1.2. Ubicación Geodésica .....	43
3.2. Datos.....	44
3.2.1. Modelo digital de elevación (DEM) .....	45
3.2.2. Imágenes satelitales .....	46
3.2.3. Información hidrológica.....	47
3.2.4. Uso de suelo.....	50
3.2.5. Carta geológica.....	51
3.3. Equipos y Softwares .....	52
3.4. Procedimiento .....	53
3.4.1. Corrección de imágenes satelitales .....	54
3.4.2. Generación de capas temáticas.....	54
3.4.3. Escala de Importancia de Saaty .....	64
3.4.4. Índice de potencialidad de aguas subterráneas.....	64
3.4.5. Generación y validación de mapa resultante .....	64
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	65
4.1. Resultados .....	65
4.1.1. Precipitación .....	65
4.1.2. Pendiente.....	67
4.1.3. Densidad de Drenaje .....	68
4.1.4. NDVI .....	70
4.1.5. NDWI .....	72
4.1.6. Temperatura superficial del suelo .....	74
4.1.7. Uso de Suelo .....	76
4.1.8. Geología .....	78

4.1.9.	Asignación de Pesos según la escala de Saaty.....	81
4.1.10.	Pesos normalizados para cada valor de las capas .....	82
4.1.11.	Mapa de zonas de potencial de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán	84
4.1.12.	validación de mapa de zonas subterráneas .....	86
4.2.	Discusión .....	88
V.	CONCLUSIONES .....	90
VI.	RECOMENDACIONES .....	92
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
VIII.	ANEXOS .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Landsat 8, propiedades de las bandas y aplicaciones .....	27
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de la pendiente según su infiltración .....	29
<b>Tabla 3</b> Clasificación de la densidad de drenaje de las cuencas son respecto a la escorrentía .....	30
<b>Tabla 4.</b> Rangos de índice de Diferencia de Vegetación Normalizada .....	31
<b>Tabla 5.</b> Rangos Índice de Agua de Diferencia Normalizada .....	32
<b>Tabla 6.</b> Rango de temperatura superficial del suelo en cubiertas .....	34
<b>Tabla 7.</b> Escala de Importancia de Saaty.....	36
<b>Tabla 8.</b> Ubicación política de la cuenca Bocapán.....	43
<b>Tabla 9.</b> Ubicación geodésica del área de estudio.....	43
<b>Tabla 10.</b> Principales características físicas de la cuenca Bocapán .....	44
<b>Tabla 11.</b> Datos para estimar el potencial de aguas subterráneas .....	45
<b>Tabla 12.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas presentes en la Cuenca Bocapán .....	48
<b>Tabla 13.</b> Precipitación promedio anual registrada en estaciones meteorológicas de la Cuenca Bocapán .....	50
<b>Tabla 14.</b> Equipos.....	52
<b>Tabla 15.</b> Softwares .....	53
<b>Tabla 16.</b> Grado de Infiltración en función del uso de suelo .....	61
<b>Tabla 17.</b> Clasificación de litología en la Cuenca Bocapán.....	62
<b>Tabla 18.</b> Áreas y Porcentaje de pendientes según su precipitación anual de exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán .....	65
<b>Tabla 19.</b> Áreas y Porcentaje de pendientes según su potencial de exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán.....	67
<b>Tabla 20.</b> Áreas y Porcentaje de densidad de drenaje según su potencial de exploración de aguas subterráneas .....	69
<b>Tabla 21.</b> Áreas y Porcentaje de NDVI según su potencial de exploración de aguas subterráneas .....	71
<b>Tabla 22.</b> Áreas y Porcentaje de NDWI según su potencial de exploración de aguas subterráneas .....	73
<b>Tabla 23.</b> Áreas y Porcentaje de Temperatura de suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas .....	75

<b>Tabla 24.</b> Áreas y Porcentaje de uso de suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas.....	77
<b>Tabla 25.</b> Áreas y Porcentaje de Geología según su potencial de exploración de aguas subterráneas.....	79
<b>Tabla 26.</b> Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP .....	81
<b>Tabla 27.</b> Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática...	82
<b>Tabla 28.</b> Pesos normalizados de las capas temáticas.....	83
<b>Tabla 29.</b> Zonas de potencial de aguas subterráneas .....	86
<b>Tabla 30.</b> Número y porcentaje de pozos .....	86
<b>Tabla 31.</b> Área de los acuíferos con respecto a la zona de potencial exploración subterránea .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sensores pasivos detectando radiación a través de la luz del sol.....	26
<b>Figura 2.</b> Representación gráfica de un sensor que opera con su propia fuente de radiación.....	26
<b>Figura 3.</b> Ancho de banda para los sensores en Landsat 8.....	27
<b>Figura 4.</b> <i>Ubicación del área de estudio Cuenca quebrada Bocapán-Casitas.....</i>	44
<b>Figura 5.</b> <i>Modelo Digital de Elevación para la cuenca Bocapán.....</i>	46
<b>Figura 6.</b> Composición de bandas de Imágenes Landsat 8 para la obtención del NDVI, NDWI y temperatura superficial en la cuenca Bocapán.....	47
<b>Figura 7.</b> Estaciones meteorológicas existentes en las proximidades de la Cuenca Bocapán .....	48
<b>Figura 8.</b> Promedio anual de precipitación en cada estación meteorológica .....	49
<b>Figura 9.</b> Mapa de uso de suelo en Perú.....	51
<b>Figura 10.</b> Mapa geológico en la cuenca Bocapán.....	52
<b>Figura 11.</b> Modelo de Flujo de la metodología usado para identificar las zonas potenciales de exploración de aguas subterráneas .....	53
<b>Figura 12.</b> Variación de precipitación en la Cuenca Bocapán .....	55
<b>Figura 13.</b> Pendiente en la cuenca Bocapán.....	56
<b>Figura 14</b> Densidad de drenaje en la Cuenca Bocapán .....	57
<b>Figura 15.</b> índice de Diferencia de Vegetación Normalizada en la Cuenca Bocapán .....	58
<b>Figura 16.</b> Índice de Agua de Diferencia Normalizada de la Cuenca Bocapán ...	59
<b>Figura 17.</b> Temperatura del suelo de la Cuenca Bocapán.....	60
<b>Figura 18.</b> Uso de suelo en la Cuenca de Bocapán .....	61
<b>Figura 19.</b> Geología de la Cuenca Bocapán.....	63
<b>Figura 20.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas según la precipitación de la Cuenca Bocapán.....	66
<b>Figura 21.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas según la pendiente de la Cuenca Bocapán.....	68
<b>Figura 22.</b> Potencial de exploración de agua subterránea en la densidad de drenaje de la Cuenca Bocapán.....	70
<b>Figura 23.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas en la NDVI de la Cuenca Bocapán.....	72

<b>Figura 24.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas en la NDWI de la Cuenca Bocapán.....	74
<b>Figura 25.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas en la Temperatura de suelo de la Cuenca Bocapán.....	76
<b>Figura 26.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas en el Uso de suelo de la Cuenca Bocapán .....	78
<b>Figura 27.</b> Potencial de exploración de aguas subterráneas según la geología en de la Cuenca Bocapán .....	80
<b>Figura 28.</b> Zonas de Potencial exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán .....	85
<b>Figura 29.</b> Mapa de la distribución de los acuíferos y la ubicación de pozos en las zonas de potencial exploración de aguas subterráneas.....	88

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Cálculo del CR de los pesos normalizados .....	96
<b>Anexo 2.</b> Pozo anillado en la ribera de la quebrada Casitas-Bocapán, sector Cherrelique.....	97
<b>Anexo 3.</b> Pozo a tajo abierto con anillos de concreto, en el sector San Carlos - Bellavista .....	97
<b>Anexo 4.</b> Fotografías de la ubicación de los pozos de agua en el área de estudio .....	98

## RESUMEN

El agua subterránea es un recurso clave para el desarrollo sostenible, especialmente en zonas con escasez de agua superficial, como la región norte de la costa del Perú. En la cuenca de Bocapán, Tumbes, la actividad agrícola, el consumo humano y otros usos dependen en gran medida de las reservas subterráneas. Sin embargo, la falta de datos precisos sobre el potencial hídrico subterráneo dificulta una gestión adecuada de este recurso. Este estudio tuvo como objetivo identificar las zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca Bocapán, utilizando el método de análisis jerárquico (AHP) y técnicas de teledetección pasiva. Se analizaron variables como geología, precipitación, pendiente, densidad de drenaje, NDVI, NDWI, temperatura superficial del suelo y uso del suelo, asignando un peso normalizado a cada capa según su contribución en la recarga de acuíferos. A partir de este análisis, se generó un índice de potencial de aguas subterráneas (GWPI), que clasificó las zonas en alto, medio alto, medio, bajo y muy bajo potencial. Se creó un mapa de zonas de exploración de aguas subterráneas y se validó al compararlo con datos del inventario de pozos existentes. La validación mostró una efectividad del 90,22% en los pozos ubicados en zonas de alto potencial y del 80,12% en el área del acuífero del ANA. Los factores más influyentes en la identificación de zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas fueron la permeabilidad de la roca (geología), la precipitación y la pendiente, mientras que la temperatura superficial del suelo y el uso del suelo tuvieron una menor influencia.

**Palabras clave:** aguas subterráneas, Teledetección pasiva, AHP (Proceso de Análisis Jerárquico), Cuenca Bocapán.

## **ABSTRACT**

Groundwater is a key resource for sustainable development, especially in areas with limited surface water, such as the northern coastal region of Peru. In the Bocapán Basin, Tumbes, agricultural activities, human consumption, and other uses heavily rely on underground reserves. However, the lack of accurate data on groundwater potential hinders proper management of this resource. This study aimed to identify potential groundwater zones in the Bocapán Basin using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and passive remote sensing techniques. Variables such as geology, precipitation, slope, drainage density, NDVI, NDWI, soil surface temperature, and land use were analyzed, with a normalized weight assigned to each layer according to its contribution to aquifer recharge. Based on this analysis, a groundwater potential index (GWPI) was generated, classifying areas into high, medium-high, medium, low, and very low potential. A map of groundwater exploration zones was created and validated by comparing it with data from the existing well inventory. The validation showed an effectiveness of 90.22% for wells located in high-potential areas and 80.12% for the ANA aquifer area. The most influential factors in identifying potential groundwater exploration zones were rock permeability (geology), precipitation, and slope, while soil surface temperature and land use had less influence.

**Keywords:** groundwater, passive remote sensing, AHP (Analytic Hierarchy Process), Bocapán Basin.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye un recurso esencial para el desarrollo sostenible, particularmente en áreas donde el acceso al agua superficial es escaso. En el caso del Perú, la región norte de la costa enfrenta serios desafíos relacionados con la falta de agua y la explotación excesiva de los acuíferos, lo que ha provocado la intrusión de agua salada y una reducción en la disponibilidad de recursos hídricos. La cuenca de Bocapán, situada en la región de Tumbes, también se ve afectada por estas problemáticas, ya que su actividad agrícola, el consumo humano y otros usos dependen en gran medida de las reservas subterráneas. No obstante, la carencia de datos precisos sobre las áreas con potencial hídrico subterráneo complica la gestión adecuada de este recurso (INAF, 2008)

La teledetección pasiva, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha posicionado como una herramienta eficaz para detectar y cartografiar áreas con posible presencia de aguas subterráneas. Este enfoque permite evaluar diversos factores, como las precipitaciones, la densidad de la red de drenaje, la inclinación del terreno, las características geológicas, la morfología del suelo, los tipos de suelo y la vegetación, lo que contribuye a localizar zonas con mayores probabilidades de albergar reservas de aguas subterráneas. Investigaciones anteriores, como las llevadas a cabo por Macas-Espinosa & López-Escobar (2018) en Ecuador y Alarcón (2018) en la región de Ica, han validado la utilidad de estas metodologías para identificar áreas con potencial hídrico.

Este método de identificación de zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas beneficia especialmente a comunidades vulnerables que sufren escasez de agua, además aporta datos relevantes sobre aguas subterráneas para la zona de estudio, la cual carece de datos.

La presente tesis tiene como objetivo principal identificar las zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas en la cuenca Bocapán, Tumbes, empleando técnicas de teledetección pasiva. Para ello, se analizaron 8 variables geoespaciales, que incluyen la pendiente, precipitación, densidad de drenaje, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada de agua (NDWI), temperatura superficial del suelo, uso de suelo y geología, y se aplicó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para ponderar y clasificar estas variables, generando un mapa de potencial de aguas subterráneas. Además, se validaron los resultados mediante visitas de campo y la información proporcionada por instituciones competentes.

Este estudio no solo contribuye a la gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca Bocapán, sino que también sentará las bases para futuras investigaciones en otras regiones con problemas similares de escasez de agua.

El uso de técnicas de teledetección pasiva y SIG representa una alternativa eficiente y de bajo costo para identificar áreas con potencial de aguas subterráneas, lo que puede ser de gran utilidad para comunidades vulnerables y para la planificación de actividades agrícolas y de consumo humano.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Conceptos teóricos**

#### **2.1.1. aguas subterráneas**

Las aguas subterráneas se encuentran bajo la superficie terrestre, debajo del nivel freático, donde los espacios entre las rocas están completamente llenos de agua. Esta agua puede aflorar naturalmente a través de manantiales, zonas de filtración, ríos o desembocando en el mar. También puede ser extraída mediante pozos, galerías u otros sistemas de captación (Joerg, 1996).

#### **2.1.2. acuíferos**

Los acuíferos son capas de tierra que almacenan agua subterránea. Para ser considerados acuíferos, estas capas deben poder almacenar y liberar agua en cantidades que sean económicamente viables de extraer. Las capas de arcilla, por ejemplo, pueden almacenar mucha agua, pero no la liberan fácilmente, por lo que no se consideran acuíferos (Fuentes, 1992).

#### **2.1.3. Teledetección**

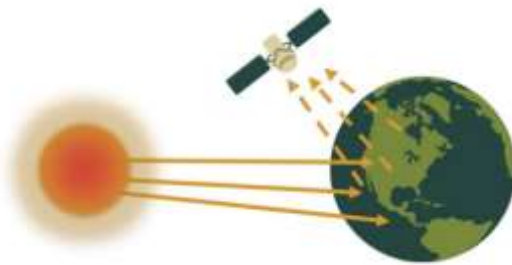
La teledetección espacial es el uso de sensores en aviones o satélites para recopilar y analizar información sobre la Tierra. Estos sensores detectan la radiación electromagnética que refleja la Tierra y la convierten en datos digitales que se pueden analizar (Quirós & Cabero, 2011).

#### **2.1.4. Tipos de sensores**

Existen dos categorías de sensores encargados de captar información de la Tierra: los sensores pasivos y los sensores activos. Los sensores pasivos registran la energía natural emitida por los objetos, mientras que los sensores activos generan su propia energía y luego analizan cómo esta interactúa con los objetos (Alarcón, 2018).

### a. Pasivos

Los sensores pasivos detectan la radiación proveniente de una fuente externa, como la luz del sol reflejada por los objetos en la superficie terrestre o la radiación térmica infrarroja que emite la Tierra (Ver **Figura 1**). Sin embargo, estos sensores no pueden captar información en ausencia de luz durante la noche. Además, si se trata de sensores ópticos, su funcionamiento se ve limitado por la presencia de nubes, ya que no pueden atravesarlas (Neuenschwander, 2021).

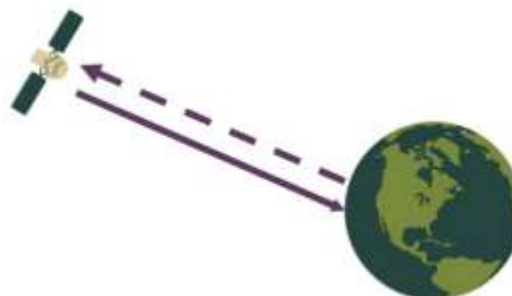


**Figura 1.** Sensores pasivos detectando radiación a través de la luz del sol

Fuente: Neuenschwander (2021)

### a. Activos

Los sensores activos operan utilizando su propia fuente de radiación. Estos dispositivos emiten radiación hacia los objetos en la superficie terrestre y luego miden la cantidad de radiación que es reflejada (Ver **Figura 2**). Una ventaja de estos sensores es que pueden realizar mediciones tanto durante el día como en la noche. En el caso de los radares, también tienen la capacidad de realizar mediciones a través de las nubes (Neuenschwander, 2021).

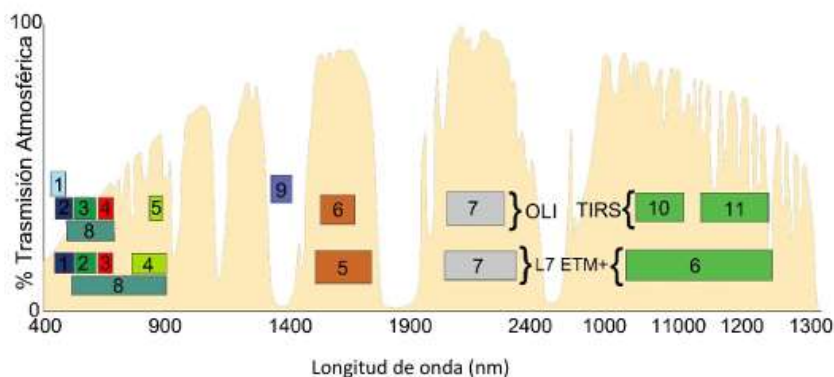


**Figura 2.** Representación gráfica de un sensor que opera con su propia fuente de radiación

Fuente: (Neuenschwander, 2021)

### 2.1.5. Satélite Landsat 8

El satélite Landsat 8, lanzado el 11/03/2013, cuenta con dos instrumentos clave: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos sensores proporcionan imágenes de la superficie terrestre con distintas resoluciones espaciales: 30 metros para las bandas visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR); 100 metros para la banda térmica; y 15 metros para la banda pancromática. Este proyecto fue desarrollado en colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Durante su fase inicial, la NASA gestionó el diseño, construcción, lanzamiento y calibración en órbita, etapa en la que se denominó Landsat Data Continuity Mission (LDCM). A partir del 30 de mayo de 2013, el USGS tomó el control de las operaciones, y el satélite adoptó oficialmente el nombre de Landsat 8.



**Figura 3.** Ancho de banda para los sensores en Landsat 8

Fuente: (USGS, 2013) Adaptado por Díaz (2018)

**Tabla 1.** Landsat 8, propiedades de las bandas y aplicaciones

Sensor Landsat 8	Banda	Nombre de banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)	Aplicaciones principales
OLI (Operational Land Imager)	1	Costera/Aerosol	0.433 – 0.453	30	Estudios costeros y aerosoles
	2	Azul	0.450 – 0.515	30	Cartografía batimétrica, distinción entre suelo y vegetación
	3	Verde	0.525 – 0.600	30	Detección del pico de vegetación,

<Continuación>

					evaluación del vigor vegetal
4	Rojo	0.630 – 0.680	30		Evaluación de la cobertura vegetal, detección de pendientes vegetadas
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.845 – 0.885	30		Contenido de biomasa, delimitación de cuerpos de agua
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.560 – 1.660	30		Contenido de humedad del suelo y vegetación, penetración de nubes delgadas
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.100 – 2.300	30		Humedad del suelo, identificación de rocas y minerales
8	Panromática	0.500 – 0.680	15		Imágenes más nítidas, mejor definición espacial
9	Cirros	1.360 – 1.390	30		Detección de nubes cirros
<b>TIRS (Thermal Infrared Sensor)</b>	10	Infrarrojo térmico de onda larga 1 (LWIR 1)	10.60 – 11.30	100*	Cartografía térmica, estimación de humedad del suelo
	11	Infrarrojo térmico de onda larga 2 (LWIR 2)	11.50 – 12.50	100*	Monitoreo térmico, análisis de contenido de humedad del suelo
	BQA	Evaluación de calidad	—	—	Evaluación de calidad de píxeles

Fuente: (Acharya & Yang, 2015)

\* Las bandas térmicas (TIRS) se adquieren a 100 m de resolución y son reprocesadas a 30 m en el producto entregado.

### 2.1.6. Modelo digital de elevaciones

Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación digital de la topografía de un terreno. Existen dos tipos principales: los modelos vectoriales, que usan triángulos irregulares y curvas de nivel, y los modelos ráster, que emplean matrices de celdas con valores de altura. Los MDE ráster son especialmente útiles en Sistemas de Información Geográfica (SIG) por su facilidad de integración con otros datos espaciales (Aguilar & Condori, 2023).

### 2.1.7. Pendiente

La Pendiente es una de las variables más empleada en estudios de teledetección, topografía, hidrografía, debido a que representa un factor relevante para la caracterización y diferenciación de las formas del relieve de la superficie terrestre (Alarcón, 2018).

La pendiente influye en la intensidad de recarga de acuíferos, a menor pendiente habrá mayor infiltración como se detalla en **Tabla 2**, lo que resulta favorable a la recarga de acuíferos (Aguilar y Condori, 2023).

**Tabla 2.** Clasificación de la pendiente según su infiltración

Pendiente		
Grados	Clasificación	Peso
0-5°	Muy buena	5
5-10°	Buena	4
10°-20°	Moderada	3
20°-30°	Pobre	2
>30°	Muy Pobre	1

*Fuente:* Aguilar y Condori (2023)

### 2.1.8. Precipitación

La precipitación es el principal fuente de ingreso en el sistema hidrológico, distribuyéndose sobre la superficie de la cuenca hidrográfica (Chow et al., 1988, p. 7). Dependiendo de la pendiente y del tipo de suelo, la lluvia se infiltra en el terreno, contribuyendo así a la recarga de los acuíferos.

### 2.1.9. Densidad de drenaje

Definida por Horton, se calcula como la relación entre la longitud total de los cursos de agua en una cuenca y su área superficial. Un valor bajo de densidad de drenaje sugiere una menor escorrentía como se observa en la **Tabla 3**, lo cual se asocia a una mayor probabilidad de recarga y presencia de agua subterránea (Aguilar y Condori, 2023).

**Tabla 3** Clasificación de la densidad de drenaje de las cuencas con respecto a la escorrentía

Rango (Km/Km <sup>2</sup> )	Clases	Rangos (Km/Km <sup>2</sup> )	Clases
	<b>Junco (2004)</b>		<b>Delgadillo y Páez (2008)</b>
0,1-1,8	Baja	<1	Baja
1,9-3,6	Moderada	1-3	Moderada
3,7-5,6	Alta	2-3	Alta
		>3	Muy Alta

Fuente: Junco (2004) y Delgadillo y Páez (2008), citado por (Aguilar y Condori, 2023).

### 2.1.10. Índice de vegetación normalizada (NDVI)

El NDVI es un indicador que mide la cantidad y salud de la vegetación utilizando imágenes satelitales. Se calcula combinando dos bandas espectrales que son sensibles a la vegetación y al clima. El NDVI facilita la estimación de la cantidad, calidad y crecimiento de la vegetación al analizar la luz que es reflejada o absorbida en determinadas regiones del espectro electromagnético,

estableciendo una relación entre el infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (R) (Mattar et al., 2011).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Los valores del NDVI más cercanos a 1 indican mayor presencia de vegetación vigorosa, lo que sugiere mayor acumulación humedad en el suelo, como se muestra en la **Tabla 4**, de acuerdo con los rangos definidos por Aguilar y Condori (2023).

**Tabla 4.** Rangos de Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada

Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada		
NDVI		
Rangos	Tipo de cubierta	Peso
>0,6	Vegetación alta	5
0,4 – 0,6	Vegetación Dispersa	4
0.2 – 0,4	Vegetación Escasa + suelo	3
0 – 0,2	Suelo desnudo	2
< 0	Presencia de agua o sombras	1

Fuente: Aguilar y Condori (2023)

#### 2.1.11. Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI)

El NDWI es un índice espectral cuyo uso principal es identificar y monitorear cuerpos de agua en la superficie de la tierra, es además una herramienta importante y muy usada para la identificación de zonas de exploración de aguas subterráneas. Este índice se encuentra entre los valores de 1 y -1, donde los valores positivos indican presencia de cuerpos de agua y los valores negativos o cercanos a cero indican presencia de vegetación, suelo desnudo o zonas rurales. Las bandas espectrales utilizadas para la obtención del NDWI fueron la banda 3 cuyo rango espectral es 0.53 – 0.59 y la banda 5 cuyo rango espectral es 0.85 – 0.88 (Díaz, 2018).

La fórmula que se utilizó para el cálculo de este índice para Landsat 8 fue:

$$NDWI = \frac{B3 + B5}{B3 - B5} \quad (2)$$

Los valores del NDWI se muestra en la **Tabla 5**, de acuerdo con los rangos definidos por Díaz (2018).

**Tabla 5.** Rangos Índice de Agua de Diferencia Normalizada

Índice de Agua de Diferencia Normalizada		
NDWI		
Rango	Tipo de cubierta	Peso
0,60 – 1,00	Presencia de agua o sombras	5
0,20 – 0,60	Depósito aluvial	4
0,00 – 0,20	Deposito fluvial	3
-0,20 – 0,00	Afloramiento rocoso	2
-1,00 - -0,20	Vegetación	1

Fuente: Díaz (2018)

#### 2.1.12. Temperatura superficial del suelo (LST)

El cálculo de la Temperatura Superficial del Suelo (LST, según sus siglas en inglés) es un indicador que tiene influencia en la humedad del suelo, evapotranspiración y otros elementos, la hacen objeto de estudio para la agricultura y la gestión del agua. Para calcular la LST, se toman seis ecuaciones que brinda la USGS que permitieron el procesamiento de la banda térmica (**Banda10**), la banda de Roja (**Banda 5**) y la banda del infrarrojo cercano (**Banda 4**) del satélite Landsat 8 (Franzpc, 2018).

Franzpc (2018) sugiere las siguientes fórmulas para el cálculo del LST:

En primer lugar, se calcula el TOA (Top of Atmospheric), aplicando la siguiente fórmula:

$$TOA (L\lambda) = ML * Q_{cal} + AL \quad (3)$$

Donde:

$M_L$  = factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda

$Q_{cal}$  = corresponde a la banda 10.

$A_L$  = factor de reescalamiento aditivo específico de la banda.

En segundo lugar, se realiza la conversión del TOA a temperatura de brillo BT (Brightness Temperature).

La fórmula aplicada:

$$BT = (K_2 / (\ln(K_1 / L\lambda) + 1)) - 273.15 \quad (4)$$

Donde:

$K_2$  y  $K_1$  = constantes de conversión térmica específicas de la banda a partir de los metadatos.

$L\lambda$  = TOA

- 273.15 = conversión a grados Celsius.

En tercer lugar, se calcula el NDVI esencial para determinar la LST usando la siguiente fórmula:

$$NDVI = (Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4) \quad (5)$$

En cuarto lugar, se calcula la proporción de vegetación Pv. La fórmula aplicada es:

$$Pv = Square((NDVI - NDVI_{mín}) / (NDVI_{máx} - NDVI_{mín})) \quad (6)$$

En quinto lugar, se realizó el cálculo de la emisividad E. La fórmula que se utilizó fue la siguiente:

$$E = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (7)$$

En sexto lugar se realiza el cálculo de la temperatura de la superficie del suelo (LST). La fórmula que se utilizó fue la siguiente:

$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(E))) \quad (8)$$

Los valores del LST se muestra en la **Tabla 6**, de acuerdo con los rangos definidos por Díaz (2018).

**Tabla 6.** Rango de temperatura superficial del suelo en cubiertas

Rango de temperatura (°C)	Tipos de cubierta
29 - 39	Zonas detríticas y afloramiento rocoso
24 - 28	Depósitos cuaternarios
5 - 23	Vegetación

Fuente: Díaz (2018)

### 2.1.13. Geología

La geología del terreno desempeña un papel fundamental en el proceso de recarga de acuíferos, dado que el tipo de roca determina su grado de permeabilidad y conductividad hidráulica. Así, la porosidad y permeabilidad de las distintas formaciones geológicas influyen directamente en la cantidad y velocidad con que el agua se infiltra y recarga los acuíferos.

#### 2.1.14. Uso del suelo

El uso del suelo es una variable importante para la identificación de zonas con potencial de exploración de agua subterránea. Aguilar & Condori (2023) indican que los suelos cubiertos por vegetación natural, depósitos aluviales y matorrales presentan mejores condiciones para la recarga de acuíferos, ya que reducen la escorrentía superficial y aumentan el tiempo de contacto del agua con el suelo. Por el contrario, las áreas urbanizadas, cuerpos de agua como ríos y lagunas, así como ciertas coberturas impermeables como los bosques densos, reducen significativamente la infiltración de las precipitaciones, impidiendo la recarga del acuífero.

#### 2.1.15. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una herramienta para analizar y resolver problemas complejos de decisión. Este método divide el problema en partes más pequeñas y las organiza en una estructura jerárquica, que incluye metas, objetivos, atributos y alternativas. Luego, compara cada elemento con otro en pares, determinando su importancia relativa. Esta comparación se representa en una matriz, lo que ayuda a simplificar el proceso de decisión (Mendoza et al., 2019).

Donde:

$$a_{ij} = \frac{\text{peso del atributo } i}{\text{Peso del atributo } j} \quad (9)$$

La escala de importancia (Ver **Tabla 7**) según el método Saaty y Vargas (2012) en el AHP se aplica para determinar cuántas veces un atributo es mayor que el otro.

**Tabla 7. Escala de Importancia de Saaty**

<b>Intensidad de importancia</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
2	Débil	-
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
4	Moderada plus	-
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
6	Fuerte plus	-
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es muy favorecida sobre otra; su dominio se demuestra en la práctica.
8	Muy, muy fuerte	-
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es de la más alta posible.
<b>Recíprocos</b>		Si la actividad <i>i</i> tiene uno de los valores anteriores respecto a <i>j</i> , entonces <i>j</i> tendrá el valor recíproco frente a <i>i</i> .

Fuente: Saaty y Vargas (2012)

La relevancia de cada componente se determina normalizando el vector propio vinculado al valor propio más alto de la matriz de comparaciones pareadas. La consistencia de esta matriz se evalúa utilizando la ratio de consistencia (CR), definido por la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

Aquí, CI representa el índice de consistencia, mientras que RI denota la consistencia aleatoria de una matriz cuadrada del mismo orden.

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Donde  $\lambda_{m\acute{a}x}$  corresponde al valor propio más grande de la matriz 'A', y 'n' indica el orden de la matriz cuadrada. Si la matriz 'A' es completamente consistente,  $\lambda_{m\acute{a}x}$  será igual a 'n'. La inclusión o exclusión de cualquier variable en el análisis depende del valor de CR; aquellas con un CR mayor a 0.1 deben ser descartadas.

Donde Ri es un índice de consistencia que depende del orden de la matriz, su ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$Ri = \frac{1,98 * (n - 2)}{n} \quad (12)$$

Para identificar áreas con potencial de agua subterránea (GWPZ), se utiliza la siguiente ecuación:

$$GWPZ = \sum_{i=1}^n F_i * W_i \quad (13)$$

Donde  $F_i$  es la clasificación de las variables consideradas para estimar el potencial de agua subterránea, y  $W_i$  es el peso relativo asignado a cada factor.

## **2.2. Antecedentes**

### **2.2.1. Internacionales**

Rivera-Vidal (2024), en su artículo científico, para la identificación de zonas de recarga de acuíferos por la reforestación en la Cuenca del Diguillín en Chile mediante un análisis de multicriterio, se usó 5 capas temáticas aplicando el Proceso Analítico Jerárquico. Las variables tomadas en cuenta corresponden a la Densidad de lineamientos, Densidad de drenaje, Pendientes, Litología, y el Uso del suelo; las cuales se categorizaron y se designó un peso a cada una.

Adicionalmente, se superpuso un modelo de precipitación interpolada mediante el método de Ponderación por la Distancia Inversa (IDW, por sus siglas en inglés), construida en base a la información del modelo CR2MET. Posteriormente se calcularon las Sumas Ponderadas para obtener finalmente los mapas de Zonificación del Potencial de Recarga Natural de Acuíferos en escenario de Modelo de Reforestación. Los resultados indicaron que el área con potencial "Muy Alto" incrementa de 5,9% a 14,1%, sobre todo en la parte baja de la cuenca.

Maddio et al. (2023), estimaron el potencial de recarga de agua subterránea de un acuífero ubicado en Zapala, provincia de Neuquén, Argentina, utilizando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Para ello, se consideraron diversas variables, entre las que destacan: un pendiente promedio del 12 %, una precipitación anual estimada de 180 mm, y temperaturas extremas que alcanzan los 40 °C como máxima y -14 °C como mínima. La evapotranspiración fue calculada mediante el método de Penman-Monteith, obteniendo un valor de 1364 mm/año. Su red de drenaje poco desarrollada con fuerte control estructural, y una cobertura vegetal dominada por áreas arbustivas, donde la vegetación ocupa entre el 30 % y 40 % de la superficie. Los datos litológicos fueron digitalizados a partir de cartas geológicas, y el uso del suelo fue clasificado mediante análisis supervisado de imágenes satelitales. Los resultados obtenidos indicaron que el 54 % del área de estudio presenta un potencial de recarga moderado, el 43 % un potencial bueno, y el 3 % un potencial muy bueno.

Cobos (2022), en su investigación, para la identificación de zonas con potencial agua subterránea mediante técnicas de teledetección, SIG y Proceso Analítico Jerárquico en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo en Ecuador, en primer lugar, detalla la morfología del área de interés para definir las zonas potenciales a través de procesos jerárquicos, emplea mapas temáticos y plantea estrategias de protección. Para el desarrollo metodológico, recopilaron datos de repositorios como EartData, USGS Earth Explorer y Sigtierras, con el fin de obtener información geoespacial. El procesamiento de datos se realizó en

ArcGIS, considerando parámetros como el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), pendiente del terreno, densidad de drenaje, tipo de suelo y niveles de precipitación. Estos factores fueron ponderados y clasificados mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA), además de calcularse el Índice de Potencial de Aguas Subterráneas (GWPI). Los resultados indicaron que es posible identificar zonas con potencial hídrico a través de PJA y SIG, estimando que estas abarcan aproximadamente un 20% del área y se localizan en la parte baja de la cuenca. Por ello, se recomienda la realización de estudios avanzados para su prospección y conservación.

Chonlong y Pacheco (2021), en su artículo científico, para la estimación de zonas potenciales de agua subterráneas en la Cuenca del Río Portoviejo en Ecuador, aplicaron el análisis jerárquico basado en SIG y teledetección, obteniendo un índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI, por sus siglas en inglés), a través de la creación del mapa de zonas potenciales, validándolo con datos existentes en el inventario de pozos de agua. La validación resultó con una efectividad del 87 % para el mapa resultante, resultado influenciado por las variables de alto grado de la permeabilidad de la roca, la precipitación y la densidad de drenajes, y en menor proporción por la pendiente del terreno y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, según sus siglas en inglés).

En su estudio Macas-Espinosa & López-Escobar (2018), abordaron la identificación de áreas con potencial para la exploración de aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, mediante el uso de técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La investigación se centró en la aplicación del Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA), específicamente el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), para integrar variables como la permeabilidad de las rocas, las precipitaciones, la densidad de la red de drenaje, la pendiente del terreno y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los resultados obtenidos se validaron comparándolos con un inventario de puntos de agua proporcionado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador. La validación mostró que el 70% de los

puntos de agua se encontraban en áreas con condiciones favorables para la exploración, mientras que el 30% restante se ubicaba en zonas óptimas.

### **2.2.2. Nacionales**

Zambrano (2024), en su tesis, realizó un modelamiento geoespacial para delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea mediante procesos de análisis jerárquico en la Cuenca Jequetepeque en Perú, en base a las variables de drenaje, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación, a partir de las cuales se generaron capas temáticas mediante el software ArcGIS v10.8. Luego, se aplicó el proceso de ponderación jerárquica para establecer la importancia relativa de cada variable, permitiendo calcular un Índice de Potencial de Agua Subterránea (IPAS) para toda la cuenca. Los resultados revelaron que el 24 % del área de estudio presenta potencial alto, el 42 % moderado, el 15 % bajo-moderado y el 19 % bajo potencial de acumulación de agua subterránea.

Aguilar y Condori (2023), en su artículo científico, localizan posibles zonas para la exploración de agua subterránea en la cordillera negra en la jurisdicción de los distritos Huanchay, Pampas Grande y La Libertad, provincia de Huaraz, departamento de Ancash – Perú, aplicando la teledetección e integración de siete variables, entre ellas la precipitación, densidad de drenaje, pendiente, litología, uso de suelos, tipo de suelo e índice de vegetación de diferencia normalizada. Emplearon el Proceso Analítico Jerarquizado para definir los pesos de cada variable e integrarlos acorde con su respectiva ponderación. Para determinar la posibilidad de presencia de zonas de agua subterránea, se fueron clasificadas como “muy bueno”, “bueno”, “medio”, “alto” y “muy alto”, aplicando la siguiente fórmula matemática:  $25.92 * \text{precipitación} + 18.06 * \text{densidad de drenaje} + 3.22 * \text{pendiente} + 18.34 * \text{Geología} + 7.75 * \text{suelos} + 19.76 * \text{Uso actual de suelos} + 6.96 * \text{índice de vegetación de diferencia normalizada}$ . Los resultados obtenidos demostraron que 0.69 km<sup>2</sup> de área corresponde a zonas con potencial de agua subterránea “muy alta”, 196.35 km<sup>2</sup> como “alta” y 412.85 km<sup>2</sup> como “media”. Los resultados fueron validados con 8 pozos de exploración geoelectrónica y el inventario de 14 afloramientos de agua subterránea.

García y Herrera (2022), en su tesis, descubrió zonas donde exista humedales como fuente potencial de acuífero en la cuenca Cajamarca al analizar imágenes Landsat, aplicando la metodología basada en procesar imágenes satelitales Landsat para generar mapas temáticos con el fin de localizar áreas con recargas hídrico, considerando variables como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), la pendiente y la temperatura superficial. El análisis permitió detectar extensas zonas con vegetación densa y saludable, así como otras con baja probabilidad de acumulación de agua subterránea, influenciadas por la permeabilidad de las rocas, la densidad de drenaje y, principalmente, por la pendiente del terreno, siendo esta última una condición clave para la infiltración y concentración de agua. Los autores concluyen que el uso de técnicas de teledetección permite identificar con precisión zonas con potencial acuífero, destacando su utilidad para la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Anticona (2021) en su tesis de investigación “Influencia de la percepción remota en la identificación de zonas potenciales de agua subterránea en la cuenca experimental del río Ichu” tuvo como principal objetivo analizar cómo la información obtenida mediante percepción remota contribuye a la detección de áreas con potencial de aguas subterráneas, así como evaluar el impacto de los factores geoambientales en este proceso. Como parte de su metodología utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) evaluando datos convencionales, productos de sensores remotos activos y productos de sensores remotos pasivos, obteniendo como resultado que el atributo de geología obtiene un mayor peso de 0.25199 (25.20%) y un menor peso de 0.02172 (2.17%) para LUCL (uso de suelo / cobertura de suelo).

En su investigación Alarcón (2018), se enfocó en la aplicación de técnicas de teledetección pasiva para detectar áreas con potencial de aguas subterráneas en la región de Ica durante el período 2017-2018. El estudio tuvo como objetivo principal identificar zonas con reservas hídricas subterráneas mediante el análisis de variables como la temperatura superficial, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la pendiente del terreno y los componentes

principales, utilizando la clasificación basada en árboles de decisión. Los hallazgos revelaron que el 30% del área estudiada presentaba un alto potencial de almacenamiento de agua subterránea. Además, se observó que las regiones con temperaturas más bajas tenían una mayor concentración de agua subterránea, mientras que los valores cercanos a +1 en el Índice de Humedad Normalizada (NDWI) señalaban una mayor disponibilidad de este recurso. Por otro lado, las áreas con pendientes pronunciadas mostraron una menor probabilidad de contener aguas subterráneas. Los resultados fueron validados utilizando información proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

### **2.2.3. Locales**

El Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) en el año 2005 realizó el “Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Casitas” donde plantearon como objetivo general analizar el estado del recurso hídrico almacenado en el acuífero de dicha quebrada. La investigación incluyó la identificación de las fuentes de agua subterránea, la cuantificación del volumen extraído y la estimación de la reserva de agua presente en el acuífero. Entre los hallazgos obtenidos mediante trabajo de campo, se registró un total de 92 pozos, de los cuales el 94.57% (87 pozos) correspondían a tajos abiertos, el 4.34% (4 pozos) eran tubulares y el 1.09% (1 pozo) tenía una estructura mixta. Asimismo, se determinó que el volumen total de agua subterránea extraída a través de estos pozos ascendía a 4 531 872.20 m<sup>3</sup> (4.53 MMC), lo que representa un caudal continuo de 0.14 m<sup>3</sup>/s. Se destacó el sector de Bellavista como el área con mayor explotación de agua, con un total de 563 524.20 m<sup>3</sup> (0.56 MMC), donde el 93.98% del recurso se destinaba a la actividad agrícola y el 6.02% al consumo doméstico.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ubicación del área de estudio

El proyecto se desarrollará en la cuenca de la quebrada Casitas – Bocapán, esta cuenca pertenece a la vertiente del océano pacífico.

##### 3.1.1. Ubicación Geopolítica

**Tabla 8.** Ubicación política de la cuenca Bocapán

REGIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	LOCALIDAD/SECTOR
TUMBES	CONTRALMIRANTE VILLAR	CASITAS / ZORRITOS	CUENCA BOCAPAN

Fuente: (ANA, 2022) <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>

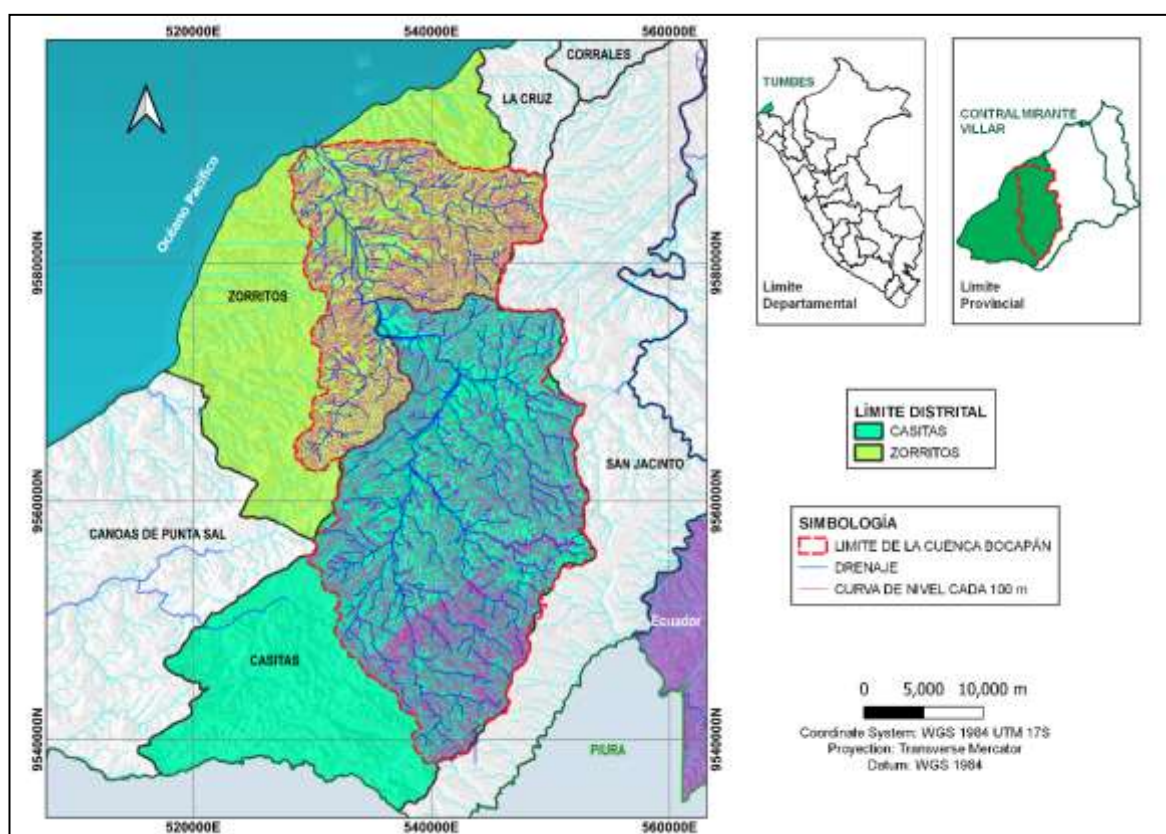
##### 3.1.2. Ubicación Geodésica

**Tabla 9.** Ubicación geodésica del área de estudio

COORDENADAS UTM (m)		DATUM	ZONA/BANDA	ALTITUD
ESTE	NORTE	GEORREFERENCIA		m.s.n.m
527 291,965	958 8971,922	WGS84	17 S	117,00
551 584,794	959 0061,113			
547 033,952	953 9049,345			
533 910,592	953 9578,512			

**Tabla 10.** Principales características físicas de la cuenca Bocapán

Unidad Hidrográfica	Río	Elevación		Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	Longitud de río (Km)	Pendiente media (%)
		Mín (m.s.n.m)	Máx (m.s.n.m)				
Cuenca Bocapán	Qda. Bocapán -Casitas	0	1512	986,61	170,91	77,90	15,48



**Figura 4.** Ubicación del área de estudio Cuenca quebrada Bocapán-Casitas

### 3.2. Datos

Para la realización del análisis multicriterio para estimar el potencial de aguas subterráneas en la cuenca Bocapán, se recopilaron diversos datos

geoespaciales y temáticos obtenidos en diversas fuentes oficiales (Ver **Tabla 11**).

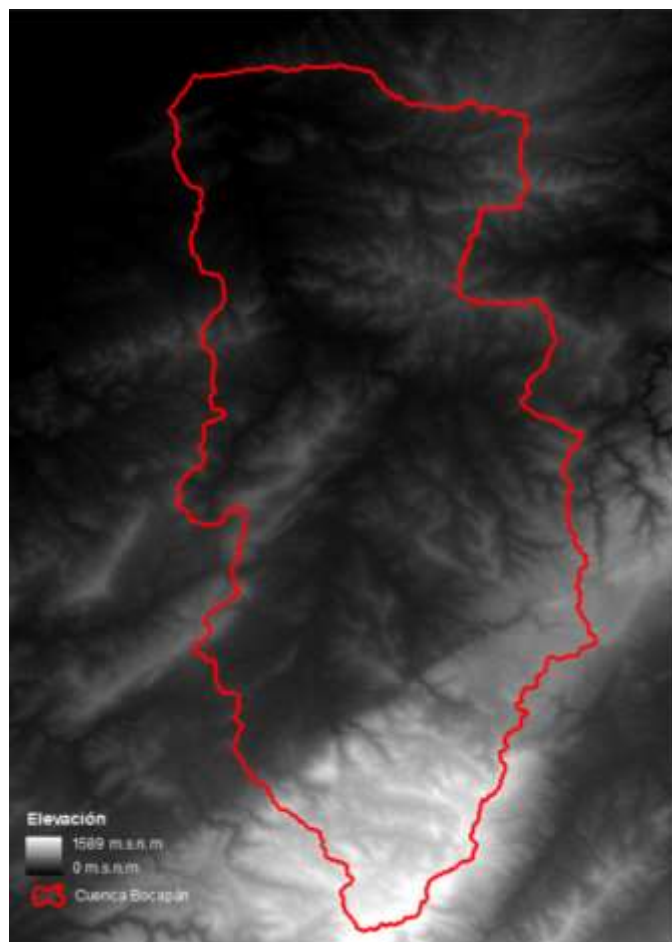
**Tabla 11.** Datos para estimar el potencial de aguas subterráneas

Tipo de dato	Variable	Fuente	Formato	Uso
<b>Modelo Digital de Elevación (DEM)</b>	Pendiente, densidad de drenaje	Aster GDEM	Raster	Derivar pendiente y densidad de drenaje mediante SIG
<b>Datos de Precipitación</b>	Precipitación media anual	ANA, SENAMHI, Producto gridded PISCO	XLS, CVS, NetCDF	Análisis de precipitación media anual
<b>Imágenes satelitales</b>	NDVI, NWDI, temperatura superficial	Landsat 8 USGS	Raster	Generar índices espectrales y mapa de temperatura
<b>Uso del suelo</b>	Tipo de cobertura	GEO GPS PERÚ	Vector	Identificar uso de suelo con relación a infiltración
<b>Carta geológica</b>	Formaciones geológicas	GEOCATMIN	Vector	Identificar tipos de suelo y permeabilidad del terreno

### 3.2.1. Modelo digital de elevación (DEM)

Se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) como base para generar la capa de pendiente y densidad de drenaje en la Cuenca Bocapán. El DEM fue obtenido del Satélite ASTER GDEM, con una resolución espacial de 30 metros.

La **Figura 5** muestra el DEM para la cuenca Bocapán, donde se observa la variación altitudinal del terreno, que va desde zonas costeras hasta áreas elevadas en la parte alta de la cuenca.



**Figura 5.** Modelo Digital de Elevación para la cuenca Bocapán  
Fuente: Elaborado a partir de los datos de satélite ASTER GDEM

### 3.2.2. Imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes satelitales del satélite Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS) para generar capas claves en el análisis del potencial de exploración de aguas subterráneas, tales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) y la temperatura superficial. Las escenas fueron descargadas desde la plataforma del USGS, seleccionando las imágenes con la menor cobertura de nubes, correspondientes a un 30% y en el periodo de menor actividad hidrológica, específicamente, en el mes de mayo del 2025 (Ver **Figura 6**).



**Figura 6.** Composición de bandas de Imágenes Landsat 8 para la obtención del NDVI, NDWI y temperatura superficial en la cuenca Bocapán

Fuente: Elaborado a partir de los datos de Satélite Landsat 8

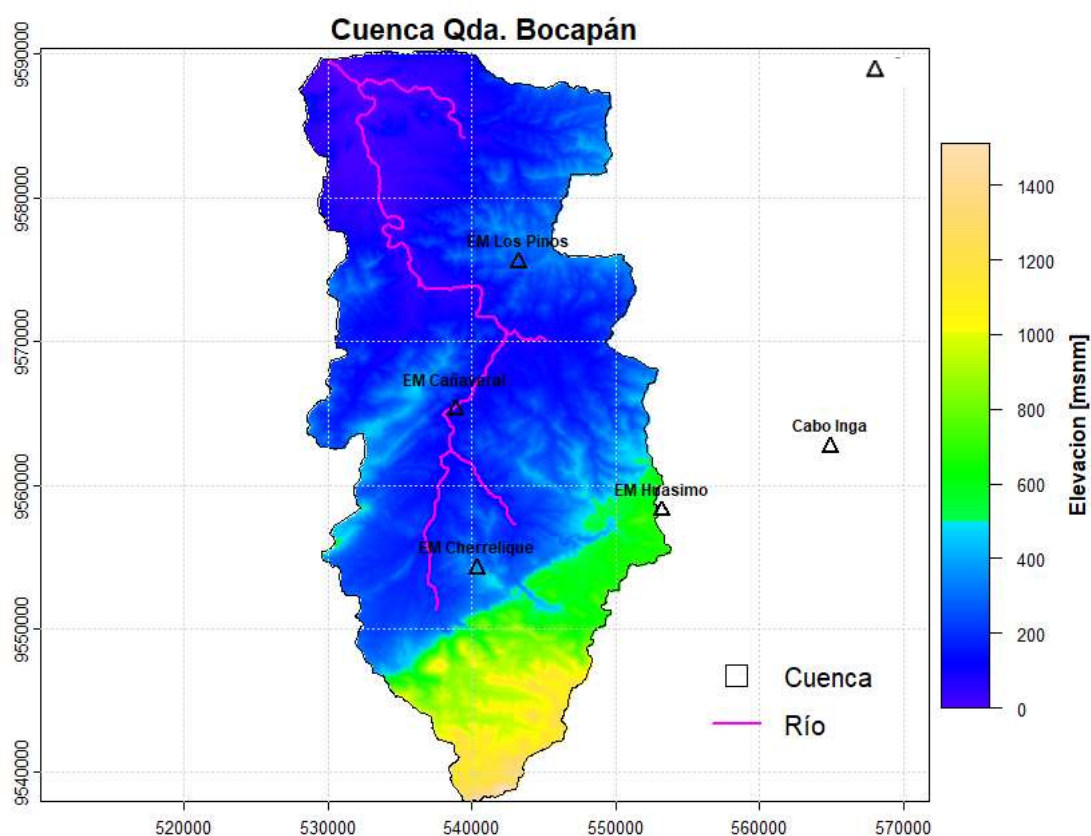
### 3.2.3. Información hidrológica

Se identificó las estaciones meteorológicas existentes en las proximidades del área de estudio, encontrándose las estaciones Cañaverál, Huasimo, Cherrelique, Los Pinos, Cabo Inga y la Cruz, las cuales se muestran en la **Figura 7** y cuya ubicación se encuentra detallada en la **Tabla 12**.

Los datos de precipitación fueron extraídos del ANA y SENAMHI correspondiendo a registros de precipitación media diaria. Para completar una serie de 39 años, se complementaron con datos diarios de precipitación del producto gridded PISCO, validado por el SENAMHI para fines de investigación. Se utilizó información de precipitación diaria para el periodo comprendido entre el 01/01/1981 y el 31/12/2019.

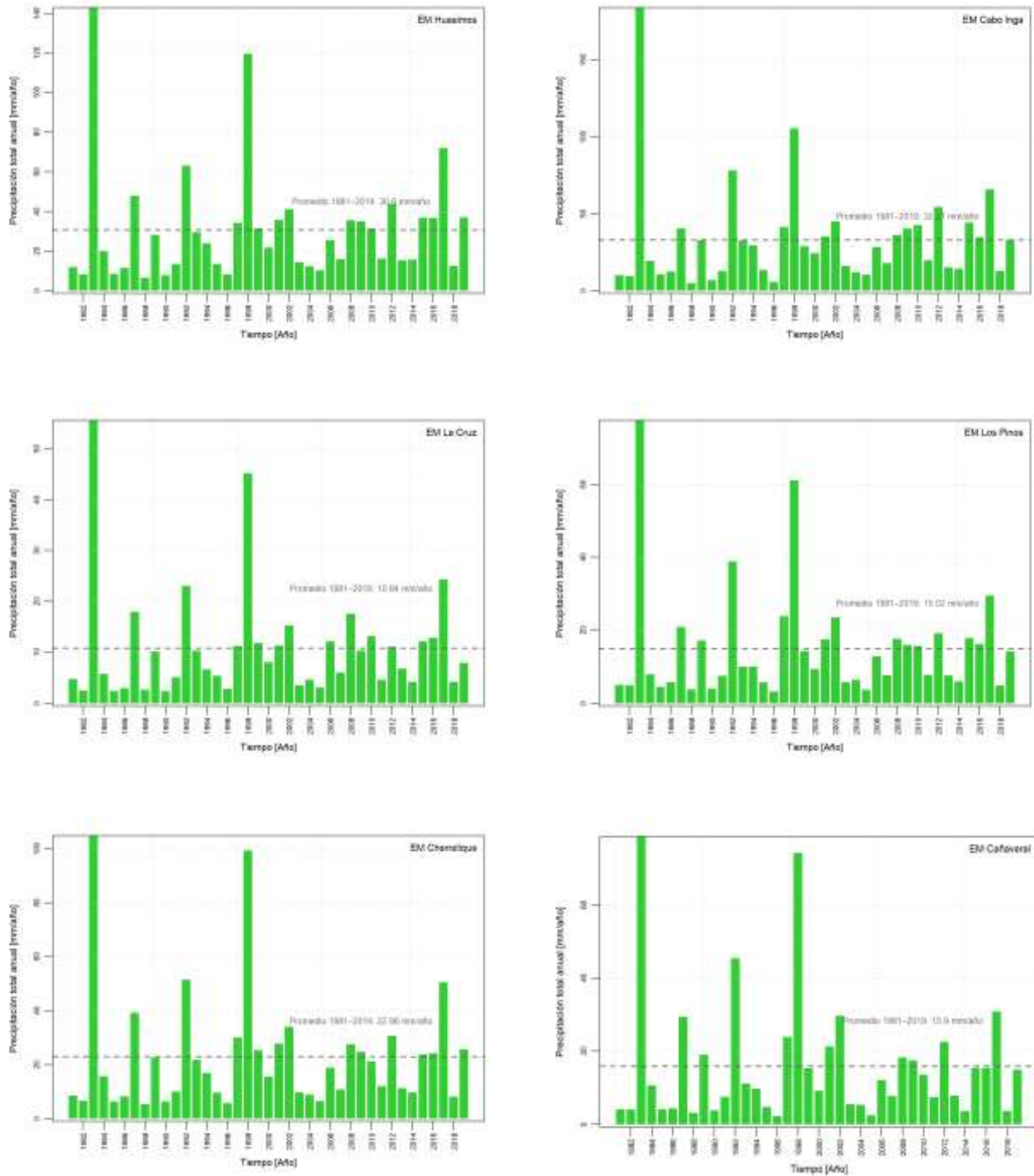
**Tabla 12.** Ubicación de las estaciones meteorológicas presentes en la Cuenca Bocapán

Estaciones Meteorológicas	Datum WGS 84 Zona 17S	
	Este (m)	Norte (m)
Cañaverál	538855.35	9565233.53
Cherrelique	540321.20	9554167.10
Huasimo	553215.40	9558222.70
Los Pinos	543259.80	9575476.30
La Cruz	553042.10	9598812.40
Cabo Inga	564891.30	9562648.70



**Figura 7.** Estaciones meteorológicas existentes en las proximidades de la Cuenca Bocapán

Se procesaron los datos de precipitación media diaria para obtener el promedio anual en cada estación meteorológica, el cual se muestra en la **Figura 8**.



**Figura 8.** Promedio anual de precipitación en cada estación meteorológica

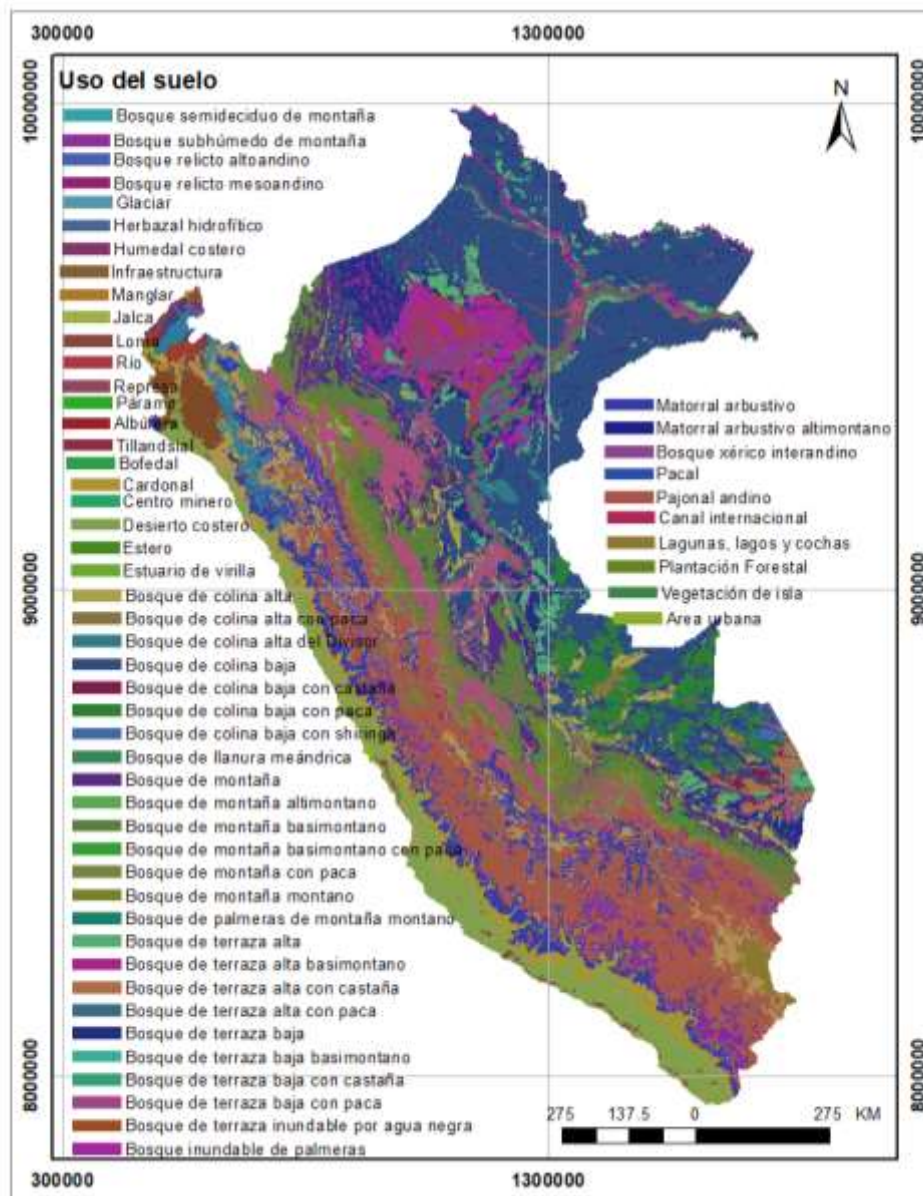
La **Tabla 13** presenta las precipitaciones promedio anuales (PP) en milímetros registradas en cada una de las estaciones meteorológicas analizadas en el área de estudio.

**Tabla 13.** *Precipitación promedio anual registrada en estaciones meteorológicas de la Cuenca Bocapán*

<b>Estaciones meteorológicas</b>	<b>PP</b>
<b>Cañaverál</b>	15,9 mm
<b>Cherrelíque</b>	22,96 mm
<b>Huasímo</b>	30,6 mm
<b>Los Pinos</b>	15,02 mm
<b>La Cruz</b>	10,84 mm
<b>Cabo Inga</b>	32,87 mm

#### **3.2.4. Uso de suelo**

Se utilizó la capa vectorial de uso de suelo descargado en la plataforma GEO GPS PERÚ, la cual proporciona información temática actualizada a nivel nacional (Ver **Figura 9**).

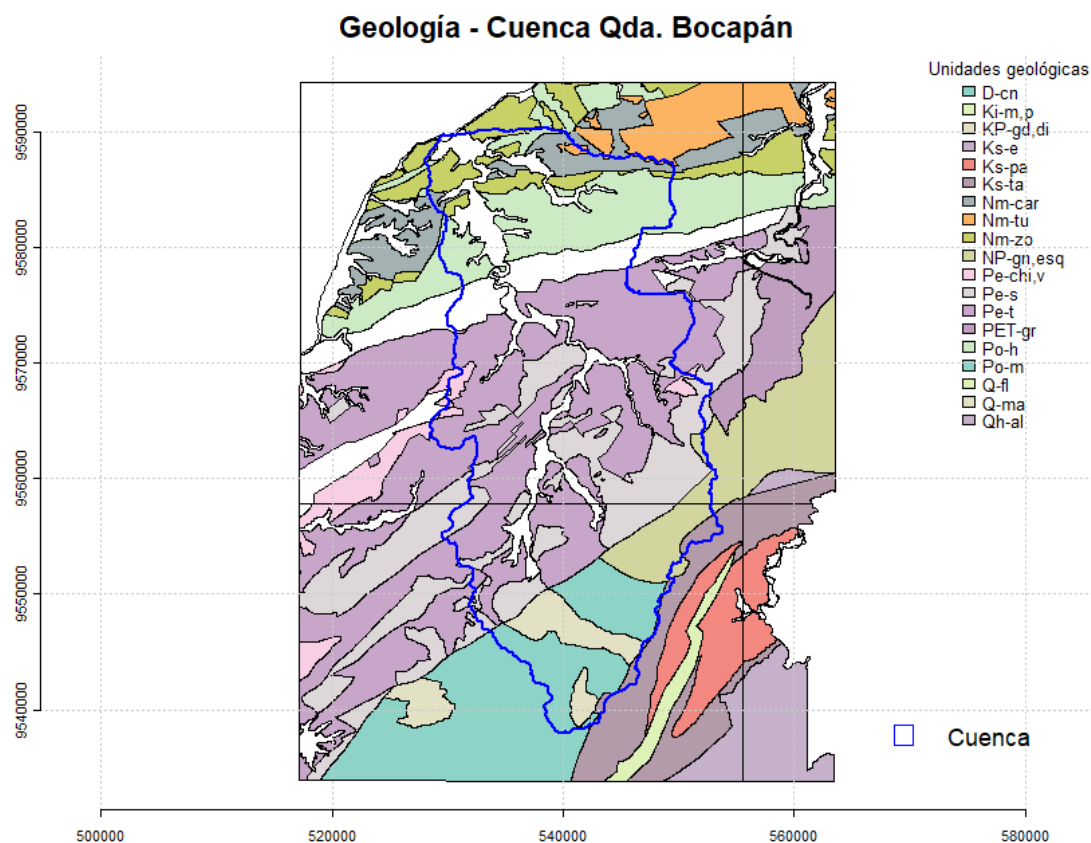


**Figura 9.** Mapa de uso de suelo en Perú

Fuente: Elaborado a partir de los datos vectoriales de GEO GPS PERÚ

### 3.2.5. Carta geológica

Se utilizó la carta geológica proporcionada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la cual fue descargada en formato vectorial desde la plataforma GeoCatmin. La información corresponde a dos hojas cartográficas que abarcan el área de la cuenca Bocapán (Ver **Figura 10**).



**Figura 10.** Mapa geológico en la cuenca Bocapán

Fuente: Elaborado a partir de datos GeoCatmin - INGEMMET

### 3.3. Equipos y Softwares

Para el desarrollo de la presente investigación, se utilizaron los equipos y softwares descritos en la **Tabla 14**.

**Tabla 14.** Equipos

Equipo	Detalle
<b>Laptop HP</b>	procesador AMD Ryzen 7, 16 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica integrada AMD Radeon Graphics.
<b>Disco duro portátil</b>	Almacenamiento 1TB

El manejo de la información obtenida para su análisis se realizó mediante los siguientes softwares detallados en la **Tabla 15**.

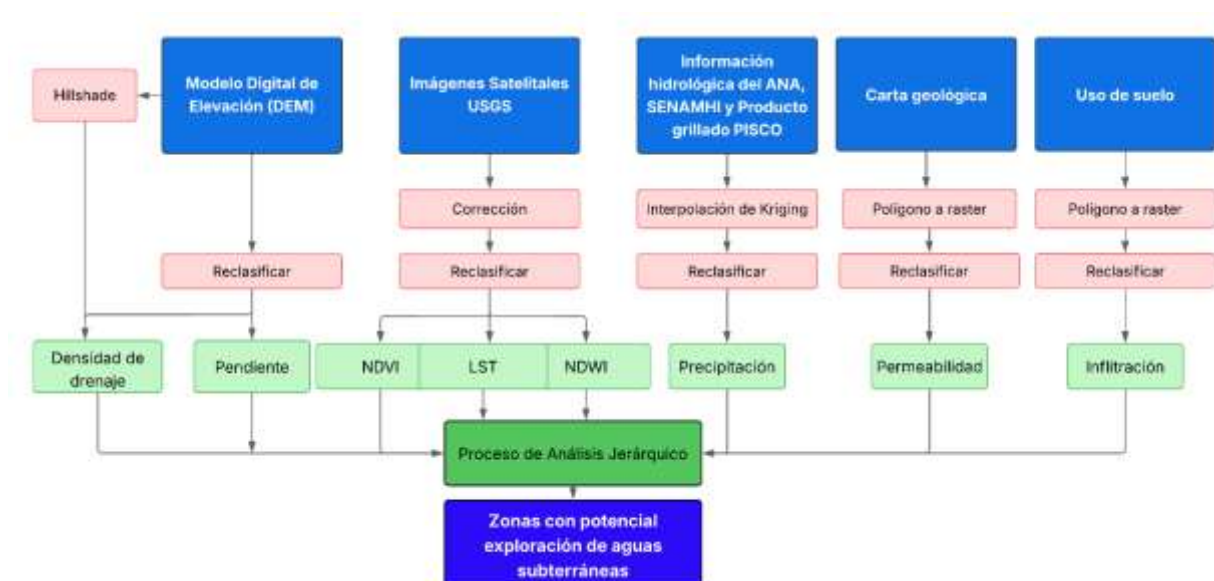
**Tabla 15. Softwares**

Softwares	Descripción
<b>Quantum GIS x64 v3.16.13</b>	Para la corrección atmosférica y radiométrica de las imágenes satelitales.
<b>ArcGIS x64 v10.3</b>	Para el procesamiento de los datos y obtención de capas multicriterio.
<b>Lenguaje de programación R</b>	Para el procesamiento de precipitación y generación de mapas.
<b>MS Office</b>	Para la edición, almacenamiento y transmisión de información de redacción.
<b>Sistema operativo Windows 10</b>	Para la administración de archivos y la ejecución de aplicaciones.

### 3.4. Procedimiento

Para el procedimiento se siguió la metodología expresada en la **Figura 11**.

**Figura 11. Modelo de Flujo de la metodología usado para identificar las zonas potenciales de exploración de aguas subterráneas**



### **3.4.1. Corrección de imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales Landsat 8 fueron sometidas a un proceso de corrección radiométrica y conversión de reflectancia de superficie, con el propósito de reducir errores asociados a la atmósfera, el ángulo solar y la geometría del sensor.

### **3.4.2. Generación de capas temáticas**

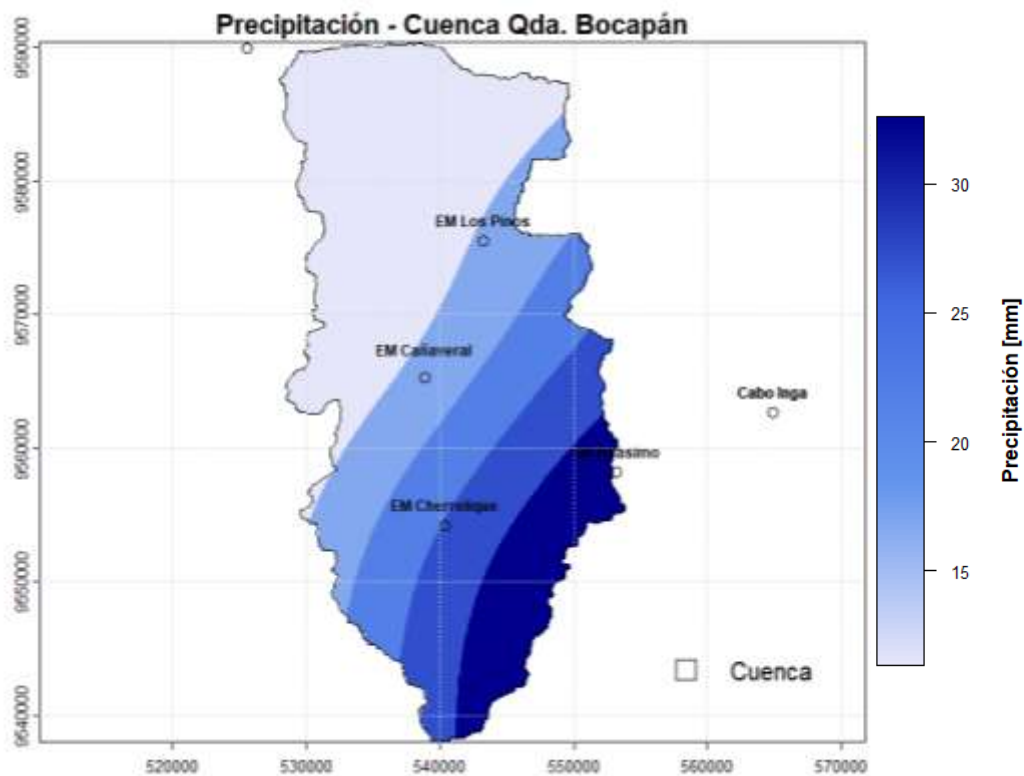
Se aseguró que cada dato, tanto raster como vectorial, estuvieran referenciados en el sistema de coordenadas UTM Zona 17S, con datum WGS 84, y que compartieran un mismo tamaño de celda, para un correcto análisis integrado.

A partir de los datos, se generaron las capas temáticas necesarias para el análisis de zonas con potencial de exploración de agua subterránea. Las capas consideradas: la pendiente, precipitación, la densidad de drenaje, el NDVI, NDWI, Temperatura superficial, uso de suelo y geología, seleccionadas en base a los criterios metodológicos propuestos por Díaz (2018). Cada capa se clasificó en cinco clases, asignando a cada clase un peso de importancia, donde el valor 5 indica un potencial muy alto de agua subterránea, 4 corresponde a potencial medio-alto, 3 a potencial medio, 2 a potencial bajo y 1 a potencial muy bajo.

### **Precipitación**

Los valores de precipitación media anual de cada estación meteorológica se utilizaron como insumo para realizar una interpolación mediante el método de kriging en ArcGIS. Posteriormente, la capa interpolada se reclasificó en cinco clases con base en su peso de importancia, siguiendo el criterio de que a mayor precipitación corresponde un mayor potencial de exploración de agua subterránea.

La **Figura 12** presenta el resultado de la interpolación con Kriging en la Cuenca Bocapán, en algunas zonas tiene valores entre 11 y 14 mm, en otras zonas llega a alcanzar hasta 32 mm. Las zonas con mayor precipitación son regiones sur oeste.

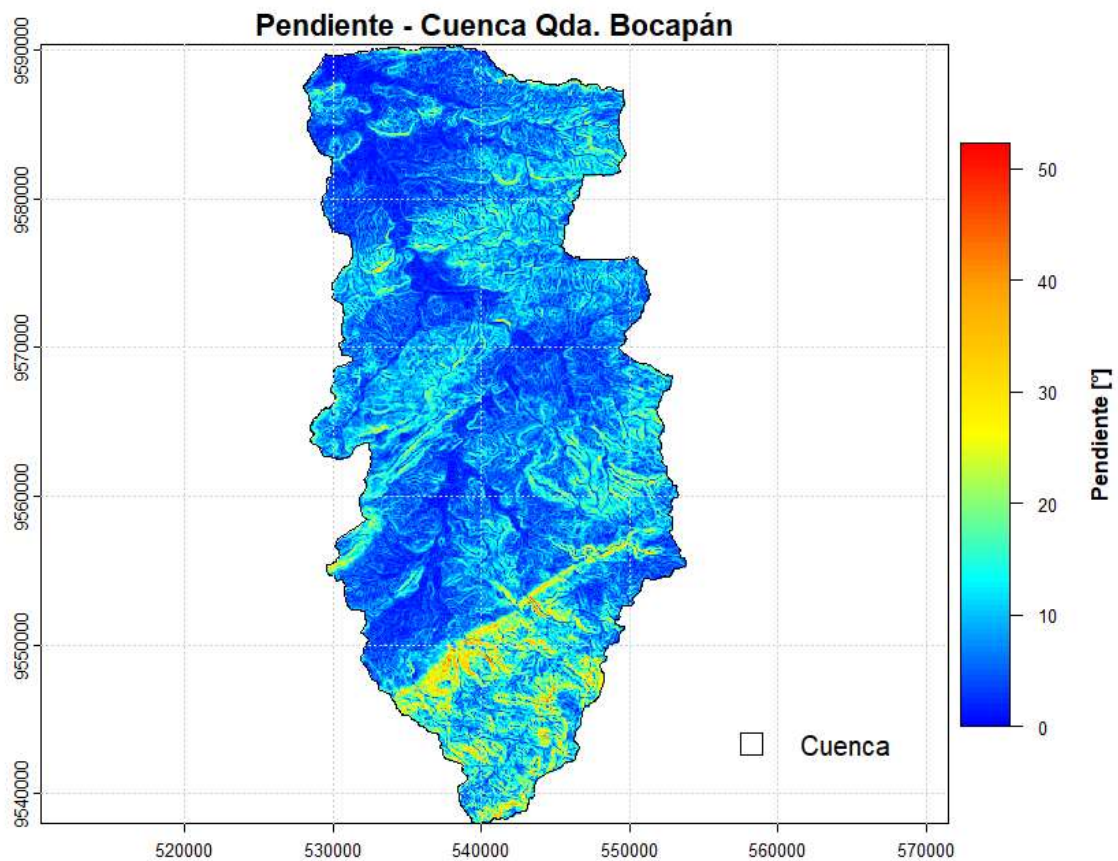


**Figura 12.** Variación de precipitación en la Cuenca Bocapán

### Pendiente

A partir del DEM se generó la capa de pendiente del terreno utilizando la herramienta Slope del módulo Spatial Analyst Tools de ArcGIS, obteniendo el valor de pendiente en Grados (Ver **Figura 13**).

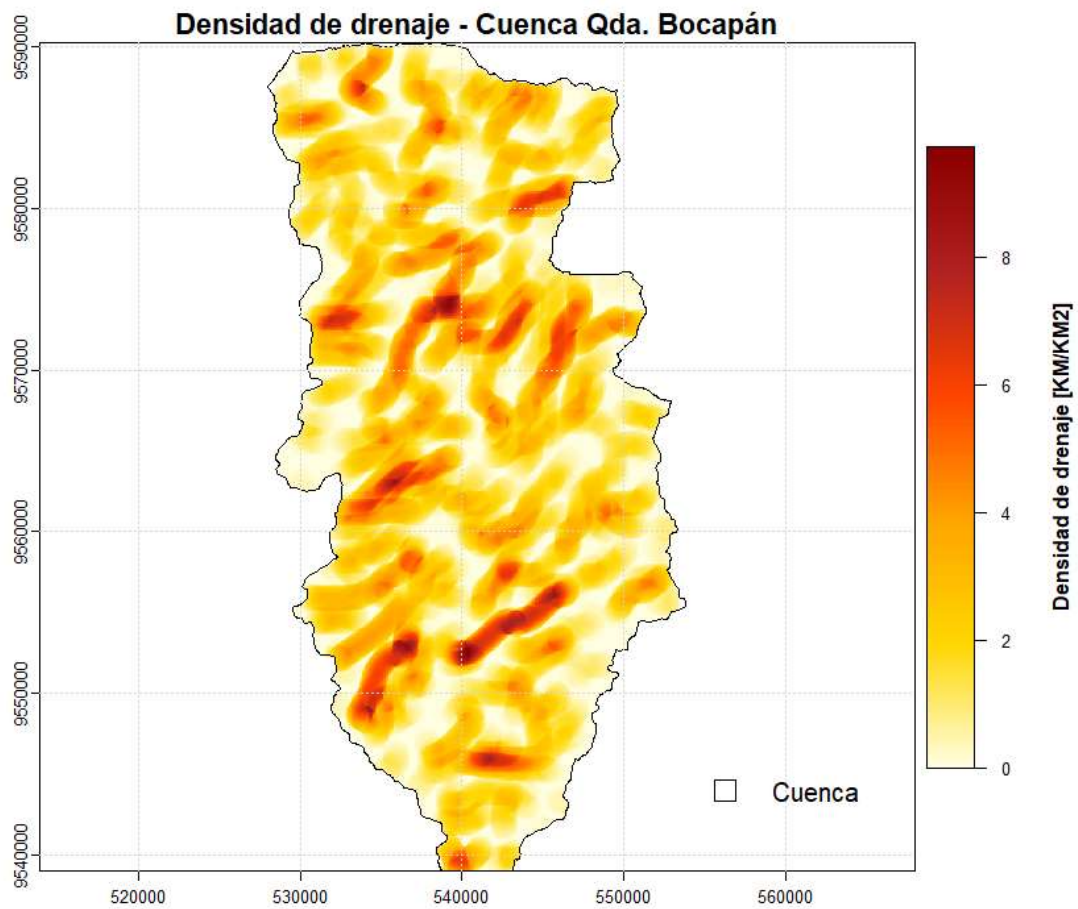
Posteriormente, la capa de pendiente fue reclasificada conforme a los criterios de Aguilar y Condori (2023) presentados en la **Tabla 2**, que relaciona el grado de inclinación con el nivel de infiltración del agua.



**Figura 13.** Pendiente en la cuenca Bocapán

### Densidad de Drenaje

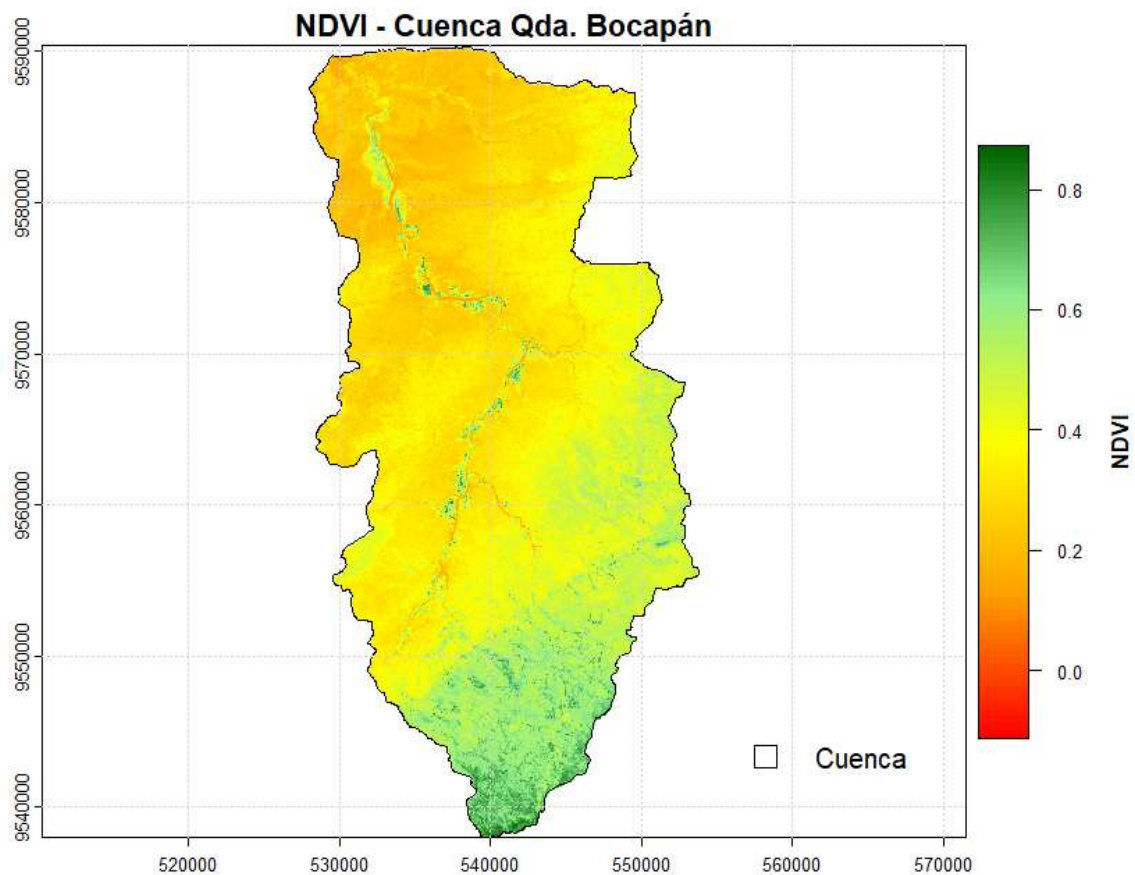
La red de drenaje fue obtenida a partir del DEM. A partir de esta red, se calculó la densidad de drenaje, expresada en kilómetros de cauce por kilómetro cuadrado ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) como se muestra en la **Figura 14**. Esta capa fue reclasificada siguiendo los criterios presentados en la **Tabla 3**.



**Figura 14** Densidad de drenaje en la Cuenca Bocapán

### Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

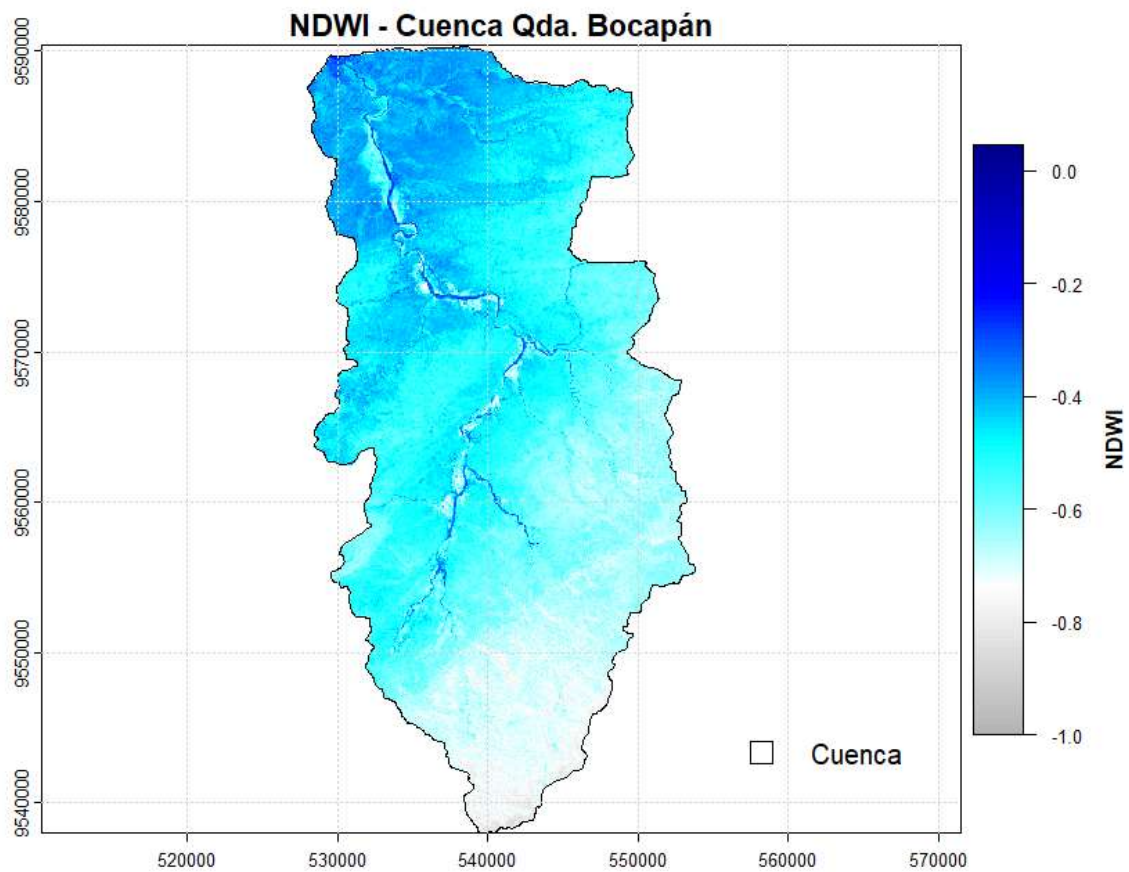
El NDVI se obtuvo a partir de la imagen satelital, aplicando la **Ecuación 1** presentada en el **Capítulo II** de la presente investigación. La **Figura 15** muestra el raster resultante. Posteriormente se reclasificaron las cubiertas vegetales mediante los criterios definidos por Díaz (2018) (ver **Tabla 4**), estos rangos permitieron identificar las diferentes cubiertas y densidades de vegetación existentes en el área de estudio.



**Figura 15.** Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada en la Cuenca Bocapán

### Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI)

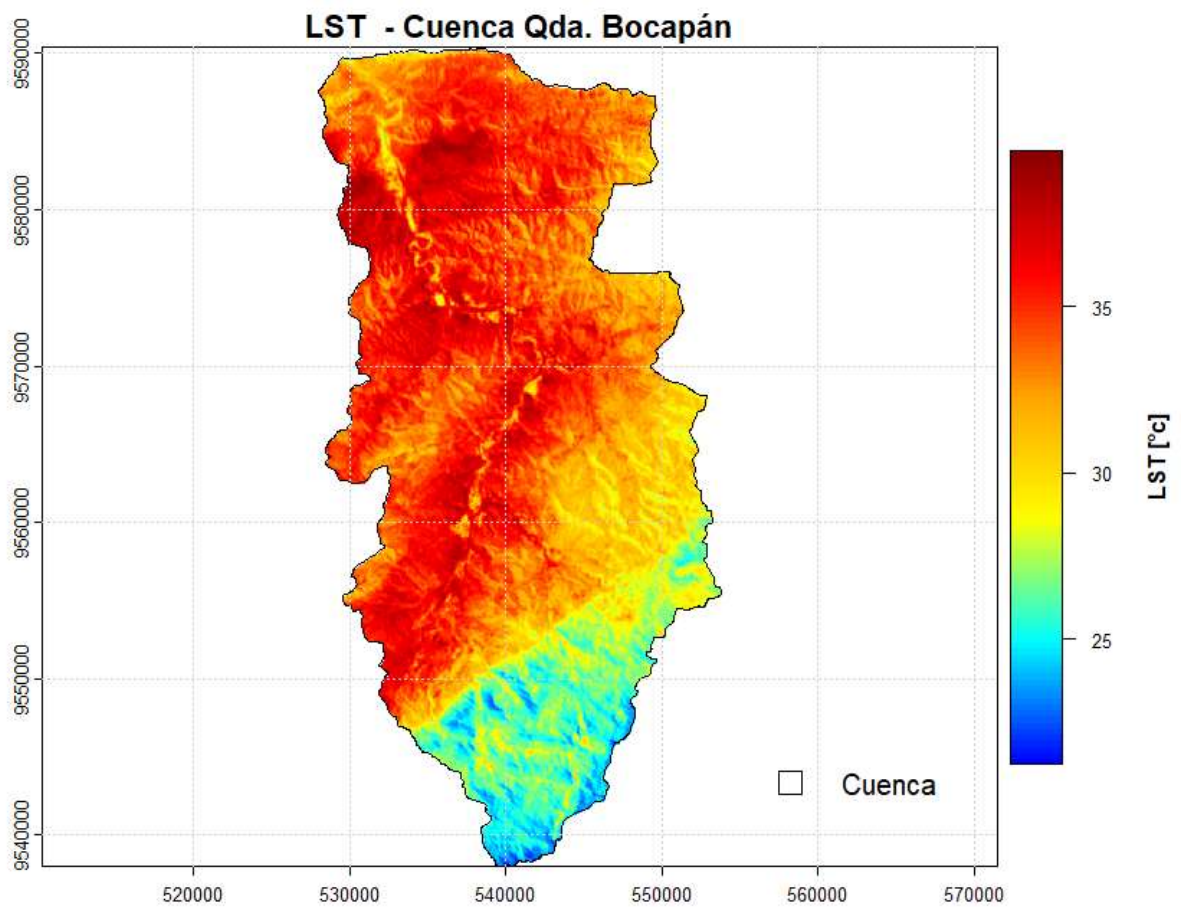
El NDWI se calculó a partir de la imagen satelital utilizando la **Ecuación 2**, obteniéndose los resultados que se muestran en la **Figura 16**. Posteriormente, se clasificaron las coberturas mediante los rangos definidos por Díaz (2018) (ver **Tabla 5**), lo que permitió identificar las distintas cubiertas y masas de agua presentes en el área de estudio.



**Figura 16.** Índice de Agua de Diferencia Normalizada de la Cuenca Bocapán

### Temperatura del superficial del suelo (LST)

La Temperatura superficial del suelo se calculó a partir de la imagen satelital aplicando las Ecuaciones del 1 a la 8, obteniendo los resultados mostrados en la **Figura 17**. Posteriormente se clasificó según el criterio de clasificación de análisis de rangos de temperatura mostrado en la **Tabla 6**.



**Figura 17.** Temperatura del suelo de la Cuenca Bocapán

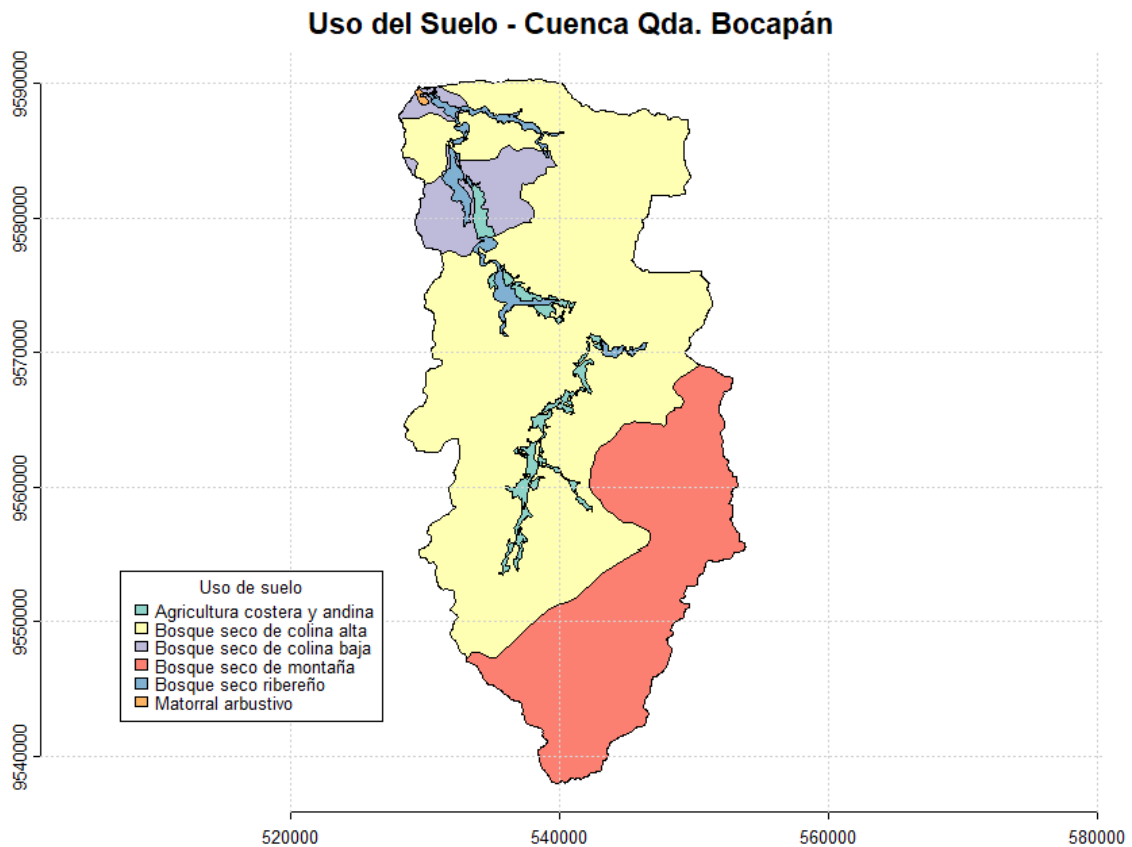
### Uso de suelo

Se identificó las diferentes áreas de uso de suelo dentro de la cuenca Bocapán (Ver **Figura 18**). Para la evaluación del grado de infiltración, se consideró el criterio de Aguilar & Condori (2023).

La **Tabla 16** muestra el grado de infiltración de los diferentes usos de suelo en la cuenca Bocapán.

**Tabla 16.** Grado de Infiltración en función del uso de suelo

Uso de suelo	Grado de Infiltración
Agricultura costera y andina	Alto
Bosque seco de colina alta	Bajo
Bosque seco de colina baja	Bajo
Bosque seco de montaña	Bajo
Bosque seco ribereño	Medio



**Figura 18.** Uso de suelo en la Cuenca de Bocapán

## Geología

En la cuenca Bocapán se identificaron las formaciones geológicas observadas en la **Figura 19**. Cada una de las unidades litológicas identificadas fue clasificada según su capacidad de infiltración, tomando como referencia estudios previos como el de Aguilar & Condori (2023). En la **Tabla 17** se muestra la clasificación geológica presente en la cuenca Bocapán según su conductividad.

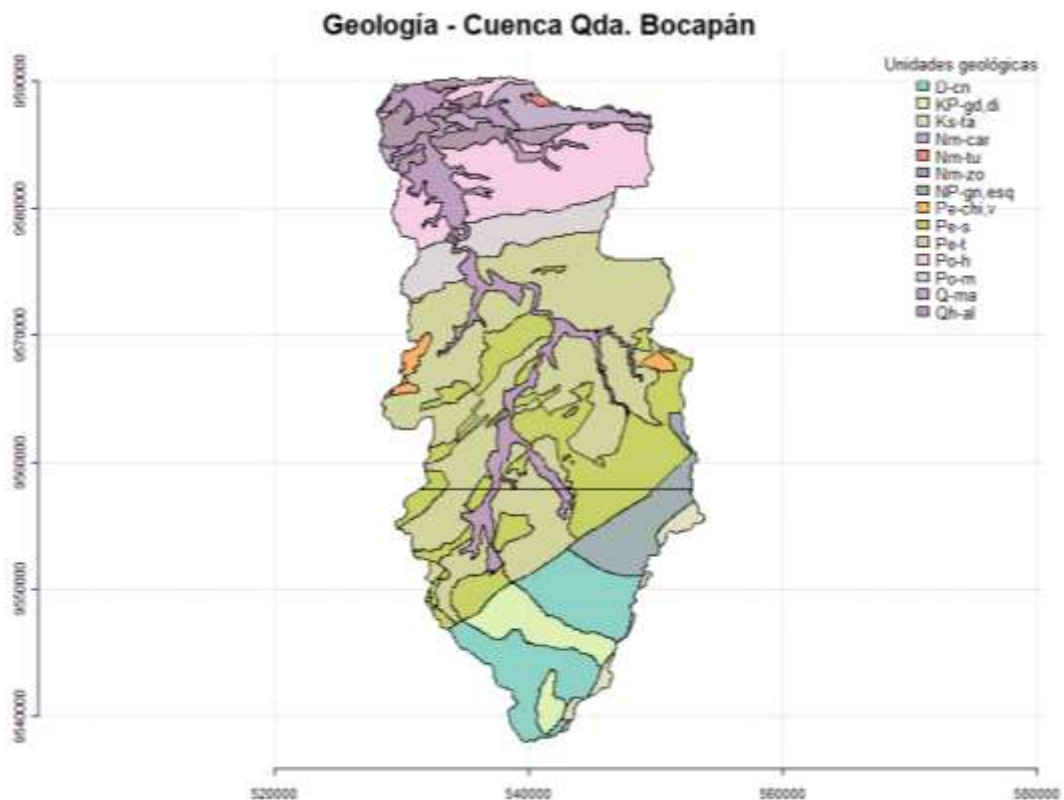
**Tabla 17.** Clasificación de litología en la Cuenca Bocapán

Unidad geológica	Código	Conductividad (k)
Acumulaciones de arena de grano fino a grueso semiconsolidadas. Se encuentran a lo largo del litoral	Q-ma	Alta
Acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos subangulosos a angulosos de diferente composición	Qh-al	Alta
Arenisca de grano fino de color verde a marrón grisáceo micáceas, areniscas de grano grueso, conglomerados de color púrpura oscuro, lutitas pizarrosas y lutitas moteadas y abigarradas	Pe-s	Media
Areniscas calcáreas, areniscas tobáceas, lutitas	Pe-chi,v	Bajo
Areniscas de grano grueso a fino, lutitas bentoníticas, conglomerados, areniscas de grano grueso, lutitas y tobas	Nm-tu	Bajo
Areniscas, conglomerados, lutitas abigarradas, lodolitas y arcillitas marrón oscuras	Nm-car	Muy baja
Conglomerado cuarzoso, lutitas grises a negras bituminosas muy laminadas, areniscas cuarzosas de grano grueso a medio y lutitas oscuras	Pe-t	Baja

<Continuación>

Conglomerados grises con cantos subredondeados a subangulosos de cuarcitas, filitas, esquistos, areniscas y calizas dentro de matriz arcósica. Niveles de areniscas	Ks-ta	Baja
Esquistos micáceos, cuarcitas, pizarras negras	D-cn	Muy baja a nula
Gneis, esquistos	NP-gn,esq	Nula
Granodiorita, diorita	KP-gd,di	Nula
Lutitas gris verdosas, semiendurecidas, a veces bituminosas y laminadas	Po-h	Baja
Lutitas, arenisca cuarzosa, lutitas bentoníticas, areniscas de grano fino, conglomerados finos, lutitas grises a verde olivo o capas carbonosas	Nm-zo	Baja
Lutitas, lodolitas grises o verde rojizas, areniscas abigarradas de grano fino a grueso	Po-m	Baja

Fuente: Aguilar & Condori (2023)



**Figura 19.** Geología de la Cuenca Bocapán

### **3.4.3. Escala de Importancia de Saaty**

Se le asignó el peso de importancia a cada variable según lo describe el método Saaty y Vargas (2012) mostrados en la **Tabla 7**. Posteriormente, se aplicó las **Ecuaciones 10, 11 y 12** para obtener el Ratio de Consistencia (CR) verificando que los pesos asignados estén dentro del rango de aceptación ( $0 < CR < 1$ ).

### **3.4.4. Índice de potencialidad de aguas subterráneas**

La combinación de las capas se realizó utilizando **Ecuación 13** de suma ponderada, en la que cada criterio se multiplica por su peso respectivo y se suman los resultados.

### **3.4.5. Generación y validación de mapa resultante**

Con base en el índice de potencialidad obtenido, se generó el mapa final de zonas potenciales de exploración de aguas subterráneas, en el que se representaron las áreas con muy bajo, bajo, medio, medio alto y alto potencial de exploración de aguas subterráneas, de acuerdo con los valores del índice ponderado.

Para la validación del modelo, se utilizó información del Inventario Nacional de Pozos y bases de datos proporcionadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2021). Mediante un análisis de superposición espacial, se verificó la correspondencia entre las ubicaciones reales de pozos existentes y las zonas clasificadas como de alto potencial en el mapa generado. Esta comparación permitió evaluar la coherencia del modelo y respaldar la fiabilidad del análisis multicriterio empleado. De igual forma se validó mediante la comparación con los acuíferos brindados por ANA (2022), determinando qué porcentaje del área de los acuíferos coincide con las zonas de alto potencial de aguas subterráneas.

En la Cuenca Bocapán, se encuentran inventariados 92 pozos, que según su tipo se encuentra 1 pozo de tipo mixto, 87 pozos de tajo abierto, y 4 pozos tubulares. Según su estado, 40 pozos son utilizables, 36 están en uso, y 16 son no utilizables (ANA, 2021).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Precipitación

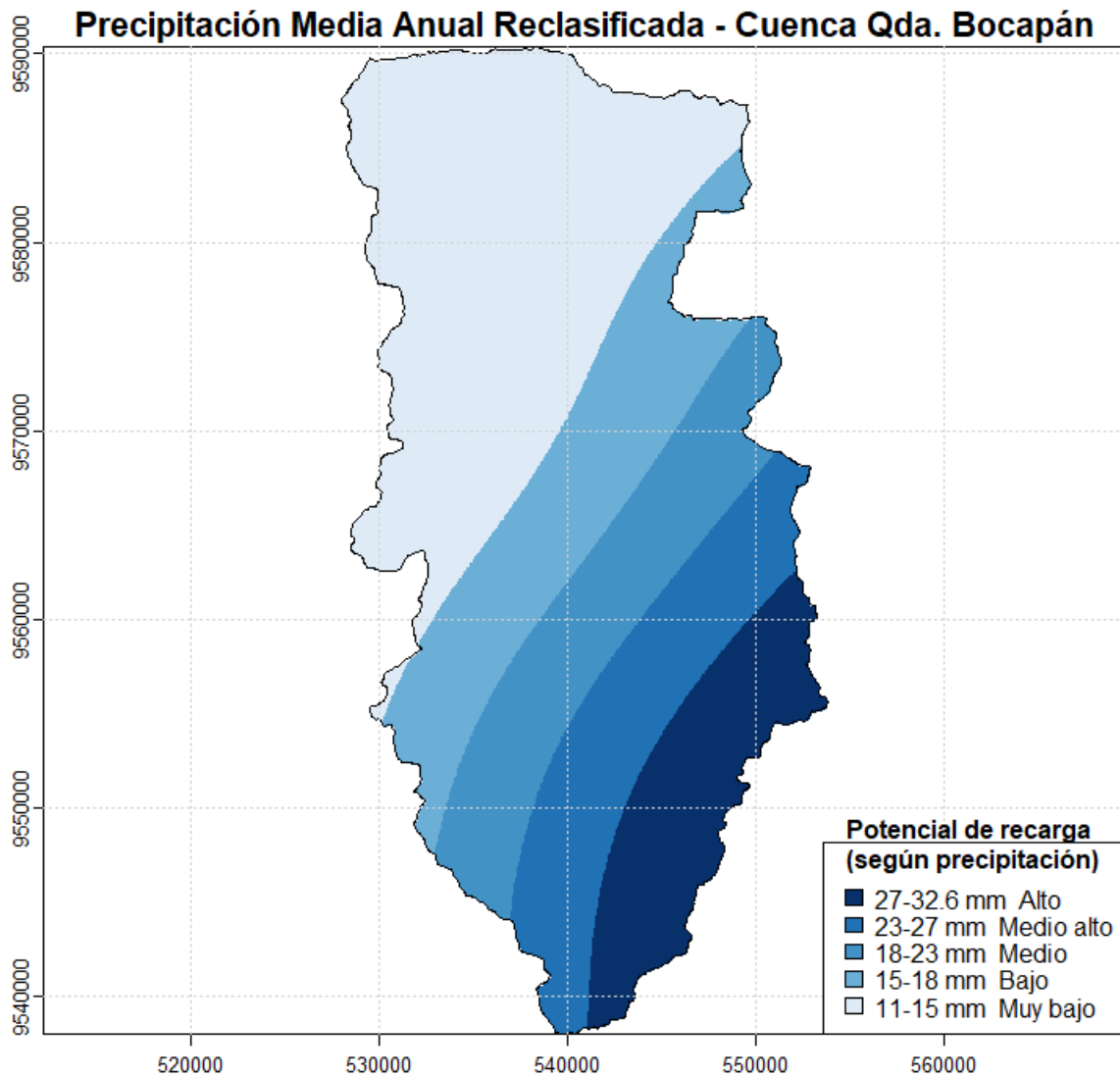
Los resultados obtenidos de la precipitación anual en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 18**, donde se muestra la distribución del área clasificada según los rangos de precipitación, el peso de importancia asignado según su contribución al potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

**Tabla 18.** Áreas y Porcentaje de pendientes según su precipitación anual de exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán

Rango de precipitación (mm/año)	Valor asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
11 - 15	1 (muy bajo)	349,24	38,54
15 - 18	2 (bajo)	160,81	17,77
18 - 23	3 (medio)	143,40	15,85
23 - 27	4 (medio alto)	137,07	15,14
>27	5 (alto)	114,91	12,69

De acuerdo con los resultados obtenidos, las zonas con precipitación baja (11 - 15 mm/año) cubren el 38,54% del área total de la cuenca, lo que indica una baja potencial de exploración de aguas subterráneas en esas zonas. En contraste, las zonas con precipitación alta (>27 mm/año) constituyen el 12,69% del área, sugiriendo que estas zonas presentan un mayor potencial. Sin embargo, es importante señalar que esta variable es analizada con la pendiente y la densidad de drenaje, para definir de forma más precisa del potencial de exploración de aguas subterráneas.

La **Figura 20** muestra el resultado del mapa de precipitación, clasificando las distintas zonas según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 20.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas según la precipitación de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.2. Pendiente

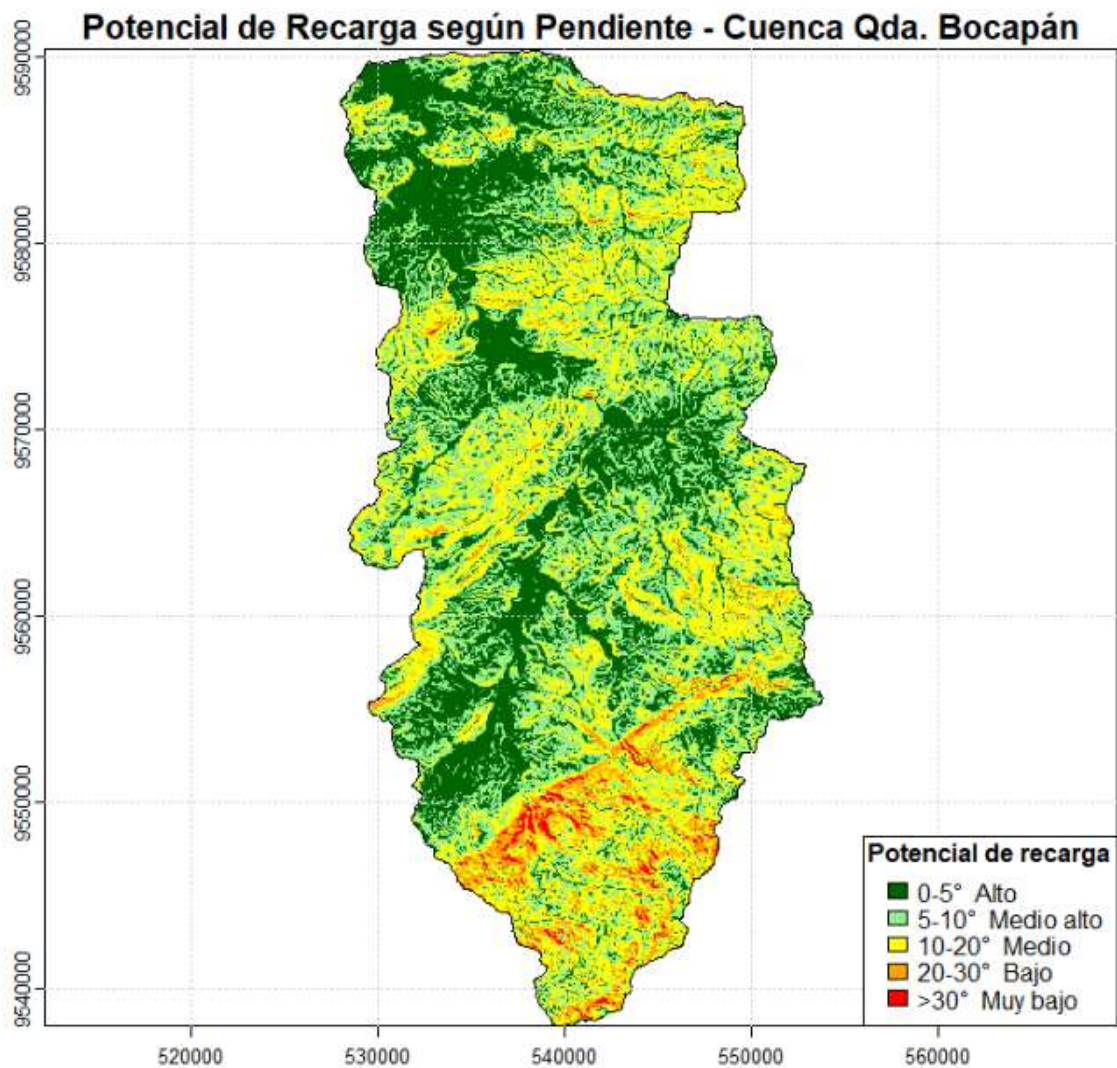
Los resultados obtenidos de la pendiente como criterio para la identificación de zonas de potencial de aguas subterráneas se presentan en la **Tabla 19**, donde se observa la distribución del área clasificada por rangos de pendiente, así como el peso de importancia asignado a cada rango según su contribución al potencial de exploración de aguas subterráneas y porcentaje de área cubierta.

**Tabla 19.** Áreas y Porcentaje de pendientes según su potencial de exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán

Rango de pendiente (°)	Valor asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0 - 5	5 (alto)	285,31	31,52
5 - 10	4 (medio alto)	313,33	34,61
10 - 20	3 (medio)	254,65	28,13
20 - 30	2 (bajo)	43,73	4,83
>30	1 (muy bajo)	8,26	0,91

De acuerdo con los resultados, las zonas con pendiente entre 5° y 10° constituyen la mayor proporción del área estudiada (34,61%), lo que sugiere un mayor potencial para la exploración de aguas subterráneas en estas áreas. Por otro lado, las pendientes mayores de 30° representan un área significativamente menor (0,91%), lo que indica un bajo potencial de exploración de aguas subterráneas.

La **Figura 21** muestra el mapa de pendiente, clasificando las distintas zonas según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 21.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas según la pendiente de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.3. Densidad de Drenaje

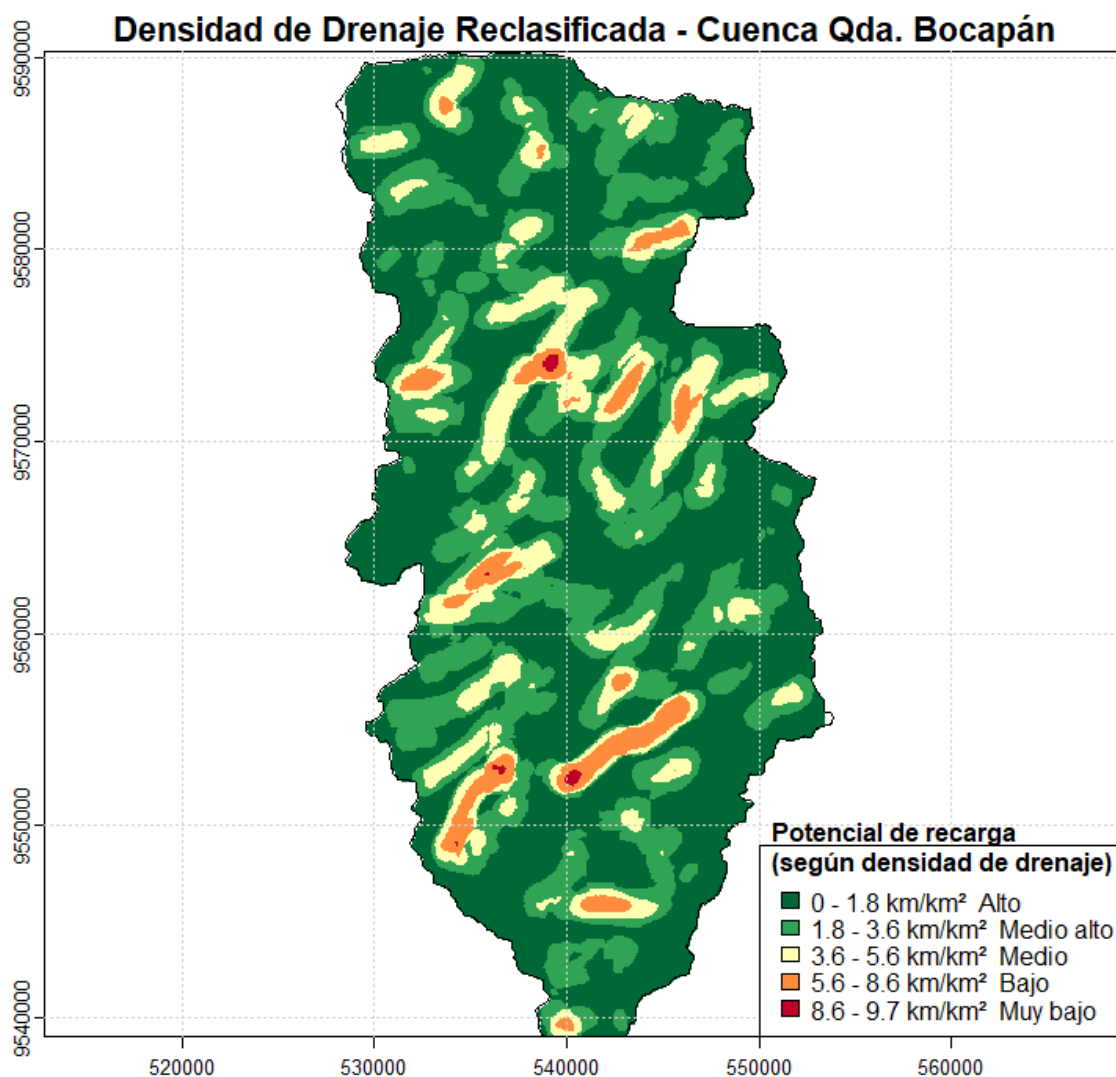
Los resultados obtenidos para la densidad de drenaje se presentan en la **Tabla 20**, donde se muestra la distribución del área clasificada según los rangos de densidad de drenaje, junto con su peso de importancia asignado según su contribución al potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

**Tabla 20.** Áreas y Porcentaje de densidad de drenaje según su potencial de exploración de aguas subterráneas

Rango de densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	Valor asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0 – 1,8	5 (alto)	496,191	55,00
1,8 – 3,6	4 (medio alto)	268,69	29,78
3,6 – 5,6	3 (medio)	102,647	11,38
5,6 – 8,6	2 (bajo)	33,28	3,69
8,6 – 9,7	1 (muy bajo)	1,297	0,14

Las áreas con una densidad de drenaje bajas (0 – 1,8 km/km<sup>2</sup>) ocupan la mayor proporción de la cuenca (55%), lo que sugiere un alto potencial para la exploración de aguas subterráneas. En cambio, las zonas con baja y muy baja densidad de drenaje (5,6 – 9,7 km/km<sup>2</sup>) representan solo el 3,83% del área, indicando un bajo potencial de exploración de aguas subterráneas en esas zonas.

La **Figura 22** muestra visualmente el resultado de la densidad de drenaje según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 22.** *Potencial de exploración de agua subterránea en la densidad de drenaje de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.4. NDVI

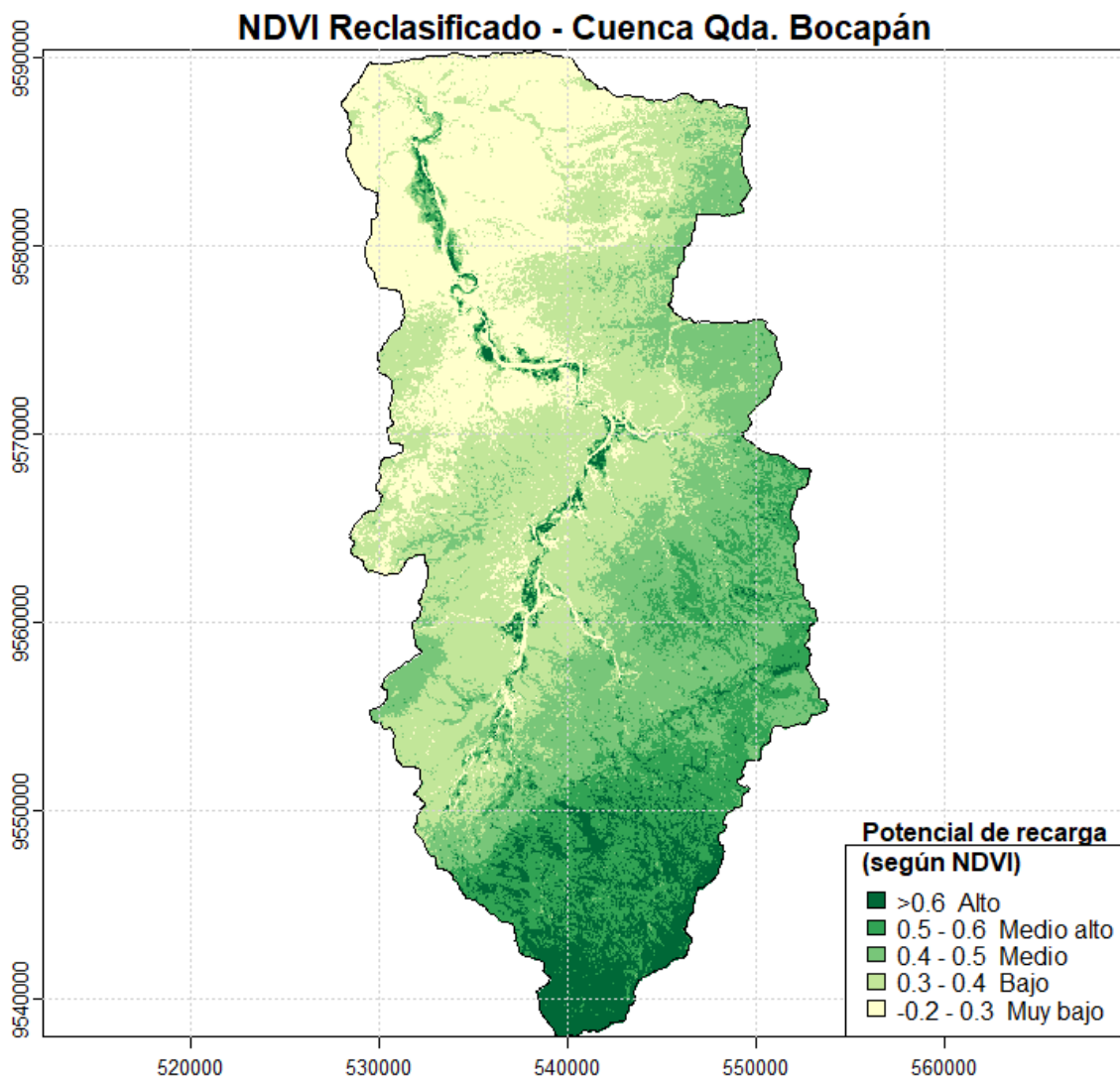
Los resultados obtenidos para el NDVI en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 21**, donde se muestra la distribución del área clasificada según los rangos de NDVI, la cobertura vegetal asociada a cada rango, el peso de importancia asignado según su potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

**Tabla 21.** Áreas y Porcentaje de NDVI según su potencial de exploración de aguas subterráneas

Rango de NDVI	Cobertura vegetal	Peso asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0,6 – 0,8	Vegetación alta	5 (alta)	69,191	6,51
0,5 – 0,6	vegetación densa	4 (media alta)	286,626	26,99
0,4 – 0,5	Vegetación dispersa	3 (media)	215,069	20,25
0,3 – 0,4	Vegetación escasa	2 (bajo)	286,626	26,99
-0,2 – 0,3	Zona sin vegetación	1 (muy bajo)	204,595	19,26

De acuerdo con los resultados, las zonas con vegetación densa (NDVI de 0,5 – 0,6) ocupan el 26,99% del área total, lo que sugiere un potencial intermedio para la exploración de aguas subterráneas en estas zonas. En cambio, las áreas con vegetación alta (muy densa y saludable), correspondiente al NDVI >0,6, cubren el 6,51% del área, lo que indica un alto potencial de exploración de aguas subterráneas. Por otro lado, las zonas sin vegetación (NDVI entre -0,2 y 0,3) representan el 19,26% del área, reflejando un bajo potencial para la recarga de aguas subterráneas en estas áreas. La vegetación escasa y vegetación intermedia también representan un porcentaje considerable del área, con valores del 26,99% y 20,25%, respectivamente.

La **Figura 23** muestra el mapa resultante del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 23.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas en la NDVI de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.5. NDWI

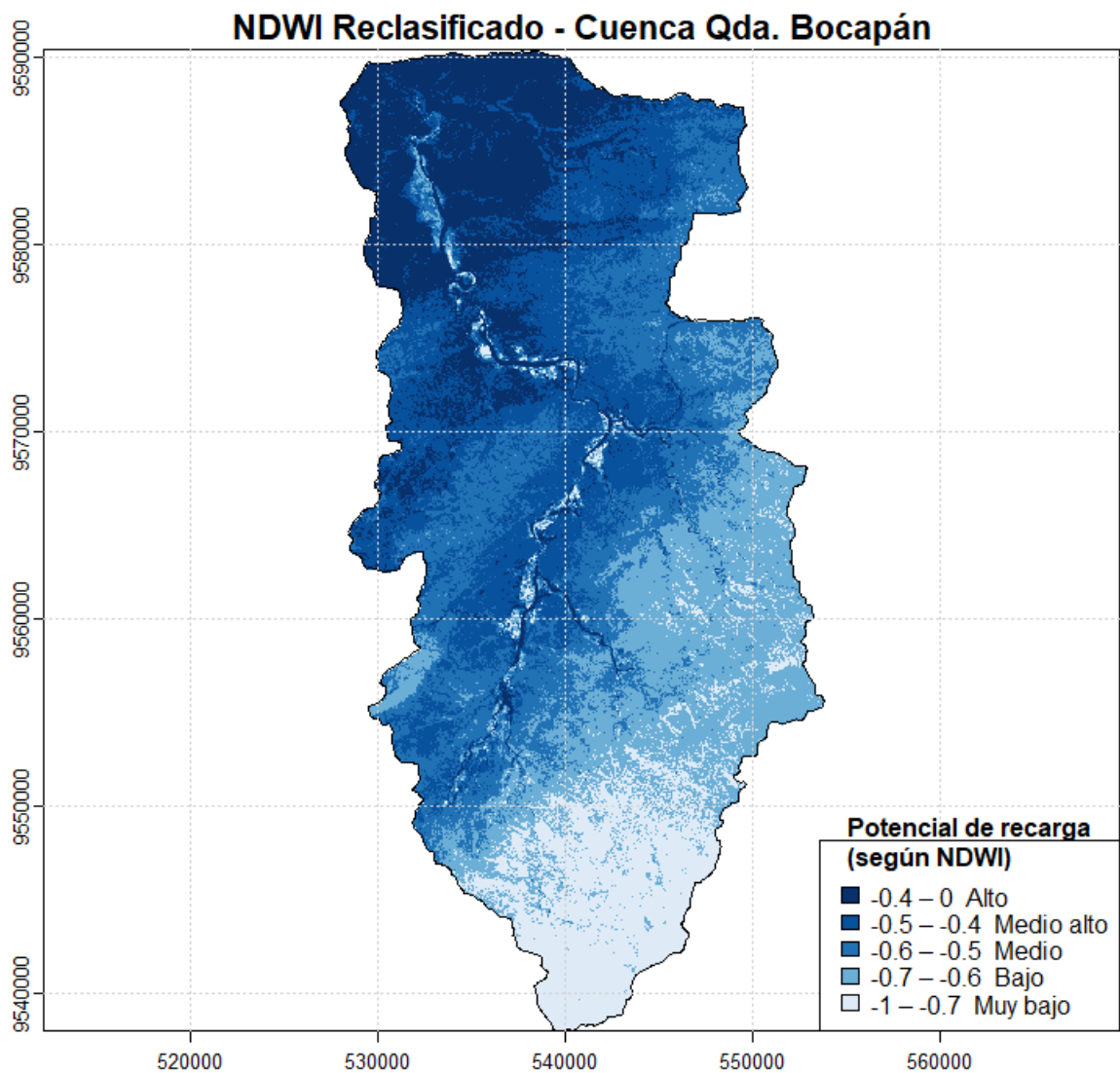
Los resultados obtenidos para el NDWI en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 22**, que muestra la distribución del área clasificada según los rangos de NDWI, el nivel de humedad superficial asociado a cada rango, el peso de importancia asignado según su potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

**Tabla 22.** Áreas y Porcentaje de NDWI según su potencial de exploración de aguas subterráneas

Rango de NDWI	Nivel de humedad superficial	Peso asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
-0,4 – 0	Alto	5	160,15	17,71
-0,5 – -0,4	Alto	5	221,42	24,47
-0,6 – -0,5	Moderado	4	204,865	22,64
-0,7 – -0,6	Bajo	2	198,182	21,92
-1 – -0,7	Muy bajo	1	120,717	13,34

De acuerdo con los resultados, las zonas con alto nivel de humedad superficial (NDWI de -0,4 a 0) ocupan el 17,71% del área total, lo que sugiere un potencial alto para la exploración de aguas subterráneas en estas zonas. Las áreas con humedad alta (NDWI entre -0,5 y -0,4) representan el 24,47% del área, indicando un potencial moderado para la recarga de aguas subterráneas. Las zonas con humedad moderada (NDWI entre -0,6 y -0,5) cubren el 22,64% del área, lo que también sugiere un potencial intermedio para la exploración de aguas subterráneas. Las zonas con bajo nivel de humedad superficial (NDWI entre -0,7 y -0,6) ocupan el 21,92% del área, reflejando un potencial bajo para la recarga de agua subterránea. Finalmente, las zonas con muy bajo nivel de humedad (NDWI entre -1 y -0,7) representan el 13,34% del área, lo que indica un potencial muy bajo para la recarga de agua subterránea en estas áreas.

La **Figura 24** muestra el mapa resultante del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 24.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas en la NDWI de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.6. Temperatura superficial del suelo

Los resultados obtenidos para la temperatura superficial del suelo en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 23**, que muestra la distribución del área clasificada según los rangos de temperatura (°C), el peso asignado según su potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

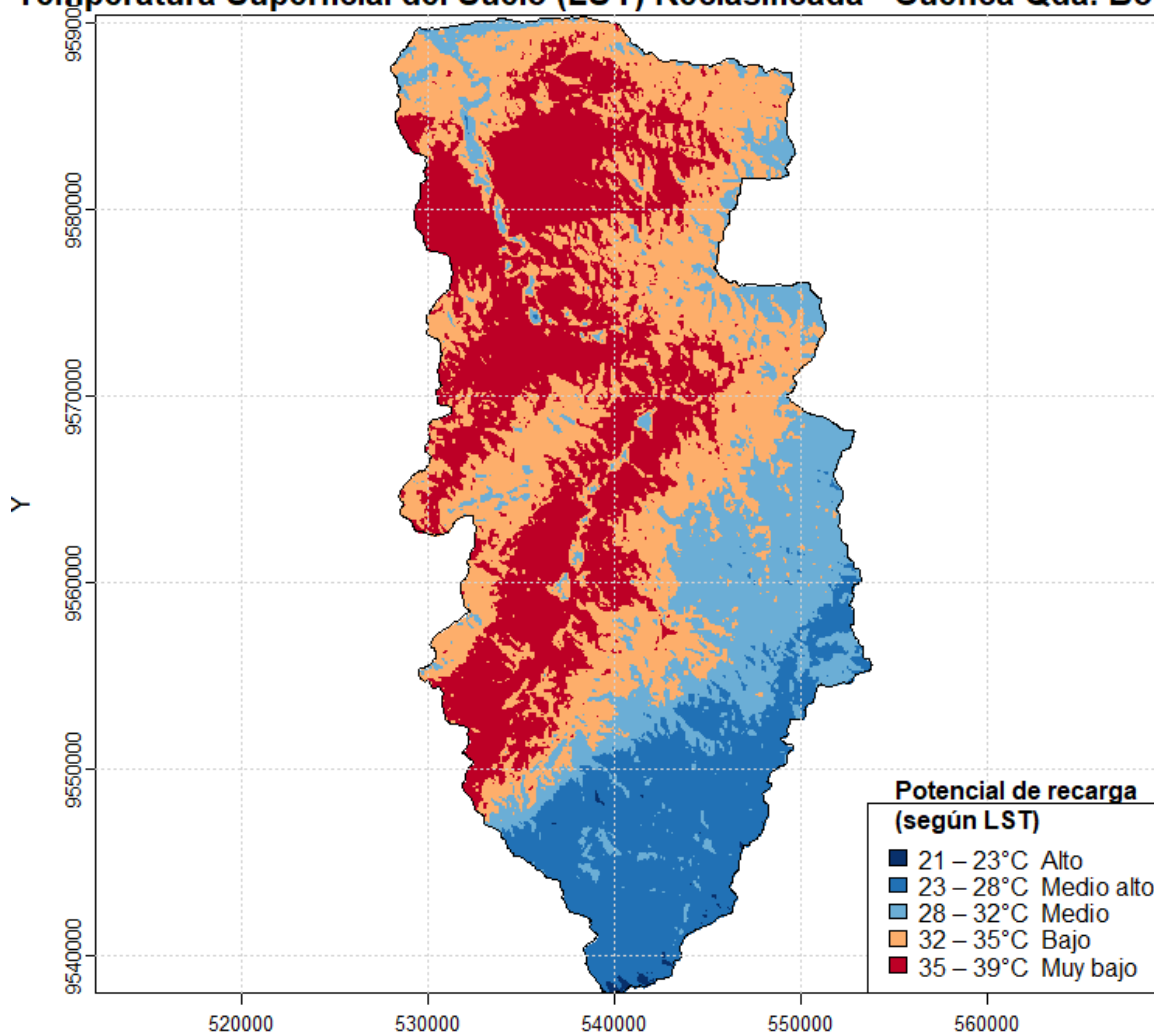
**Tabla 23.** Áreas y Porcentaje de Temperatura de suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas

Rango de temperatura (°C)	Peso asignado	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
21 - 23	5 (alto)	1,671	0,18
23 - 28	4 (medio alto)	140,505	15,52
28 - 32	3 (medio)	165,973	18,33
32 - 35	2 (bajo)	311,097	34,36
35 - 39	1 (muy bajo)	286,108	31,60

De acuerdo con los resultados, las zonas con temperaturas entre 32°C y 35°C ocupan el 34,36% del área total, lo que sugiere un potencial bajo para la exploración de aguas subterráneas en estas áreas debido a la mayor temperatura superficial. Las áreas con temperaturas entre 35°C y 39°C cubren el 31,60% del área, reflejando un potencial muy bajo para la recarga de agua subterránea debido a las altas temperaturas. Por otro lado, las zonas con temperaturas entre 28°C y 32°C representan el 18,33% del área, indicando un potencial intermedio para la exploración de aguas subterráneas. Las zonas con temperaturas entre 23°C y 28°C ocupan el 15,52% del área, lo que sugiere un potencial moderadamente alto. Finalmente, las zonas con temperaturas entre 21°C y 23°C son las que presentan el más alto potencial de recarga de agua subterránea, pero ocupan solo el 0,18% del área total.

La **Figura 25** muestra el mapa resultante de la temperatura superficial del suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas.

### Temperatura Superficial del Suelo (LST) Reclasificada - Cuenca Qda. Bocapán



**Figura 25.** Potencial de exploración de aguas subterráneas en la Temperatura de suelo de la Cuenca Bocapán

#### 4.1.7. Uso de Suelo

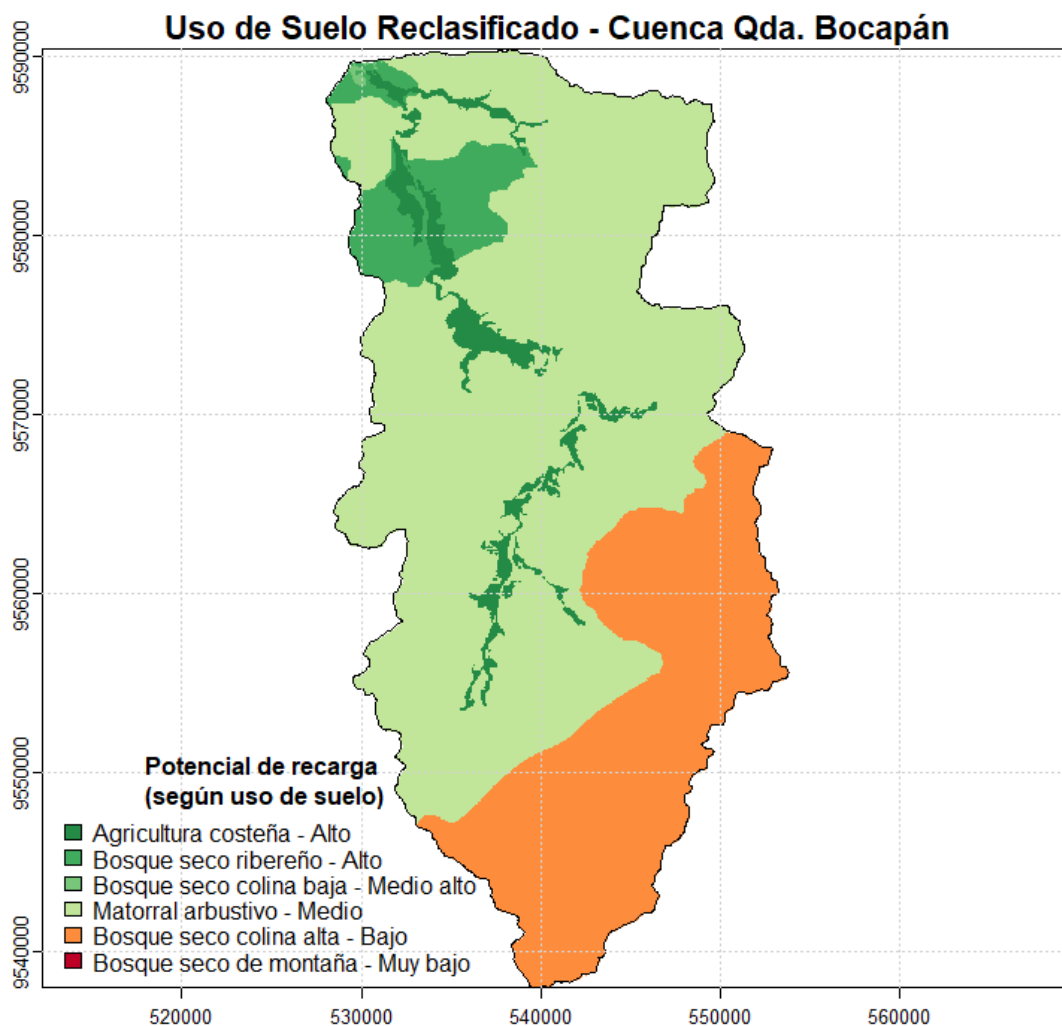
Los resultados obtenidos para el uso del suelo en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 24**, que muestra la distribución del área clasificada según el uso del suelo, el peso asignado según su potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

**Tabla 24.** Áreas y Porcentaje de uso de suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas

<b>Suelo</b>	<b>Peso asignado</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Agricultura costera y andina</b>	5 (alta)	22,16	2,45
<b>Bosque seco ribereño</b>		18,90	2,09
<b>Bosque seco de colina baja</b>	4 (medio alto)	50,41	5,57
<b>Matorral arbustivo</b>	3 (medio)	0,77	0,09
<b>Bosque seco de colina alta</b>	2 (bajo)	563,12	62,20
<b>Bosque seco de montaña</b>	1 (muy bajo)	250,05	27,62

De acuerdo con los resultados, las zonas de bosque seco de colina alta representan el 62,20% del área total, lo que sugiere un potencial bajo para la exploración de aguas subterráneas en estas áreas debido a las características del uso del suelo. Las zonas de bosque seco de montaña cubren el 27,62% del área, reflejando un potencial muy bajo para la recarga de agua subterránea en estas áreas. Por otro lado, las áreas de bosque seco de colina baja ocupan el 5,57% del área, lo que indica un potencial moderadamente alto. Las zonas de agricultura costera y andina y bosque seco ribereño ocupan el 2,45% y 2,09% del área, respectivamente, lo que sugiere un alto potencial para la recarga de agua subterránea debido al tipo de uso del suelo. Finalmente, las zonas de matorral arbustivo, aunque son pequeñas, con 0,09% del área, indican un potencial intermedio para la recarga de agua subterránea.

La **Figura 26** muestra el mapa resultante del uso del suelo según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 26.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas en el Uso de suelo de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.8. Geología

Los resultados obtenidos para la geología en la cuenca Bocapán se presentan en la **Tabla 25**, que muestra la distribución del área clasificada según los tipos geológicos, el peso asignado según su potencial de exploración de aguas subterráneas y el porcentaje de área cubierta.

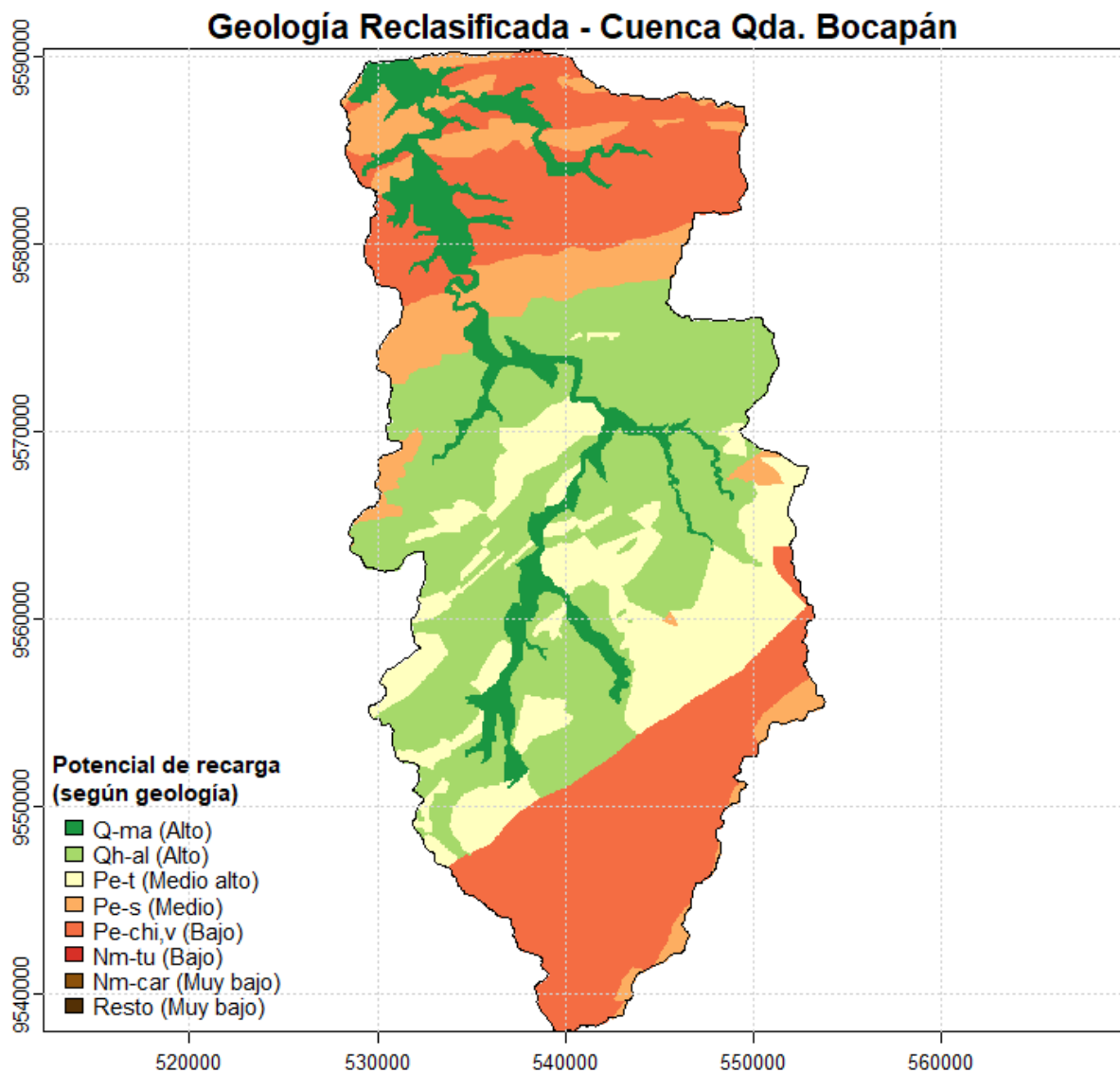
**Tabla 25.** Áreas y Porcentaje de Geología según su potencial de exploración de aguas subterráneas

<b>Código</b>	<b>Peso asignado</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Qh - al</b>	5 (alto)	85,28	9,42
<b>Q - ma</b>		0,424	0,05
<b>Pe - t</b>	4 (medio alto)	297,96	32,91
<b>Pe - s</b>	3 (medio)	140,71	15,54
<b>Pe - chi,v</b>		8,62	0,95
<b>Nm - tu</b>	2 (bajo)	2,12	0,23
<b>Ks - ta</b>		10,18	1,12
<b>Nm - zo</b>		30,76	3,40
<b>Po - m</b>		43,09	4,76
<b>Nm - car</b>	1 (muy bajo)	24,38	2,69
<b>D - cn</b>		85,83	9,48
<b>NP - gn,esq</b>		39,80	4,40
<b>KP - gd,di</b>		35,99	3,98
<b>PO - h</b>		100,24	11,07

De acuerdo con los resultados, las zonas con geología tipo Qh - al y Q - ma ocupan el 9,42% y 0,05% del área total, respectivamente, lo que indica un potencial alto para la exploración de aguas subterráneas en estas áreas debido a las características geológicas favorables. Las zonas con geología tipo Pe - t ocupan el 32,91% del área, sugiriendo un potencial moderadamente alto para la recarga de agua subterránea. Las zonas con geología tipo Pe - s cubren el 15,54% del área, lo que sugiere un potencial intermedio para la exploración de aguas subterráneas. Las zonas con geología de tipo Pe - chi,v, Nm - tu, Ks - ta, Nm - zo, y Po - m ocupan porcentajes que van desde el 0,95% hasta el 4,76% del área, lo que indica un potencial bajo para la recarga de agua subterránea. Finalmente, las zonas con geología tipo Nm - car, D - cn, NP - gn,esq, KP - gd,di, y PO - h, que representan áreas más extensas con un total del 31,64%,

tienen un potencial muy bajo para la recarga de agua subterránea debido a las condiciones geológicas desfavorables.

La **Figura 27** muestra el mapa resultante de la geología según su potencial de exploración de aguas subterráneas.



**Figura 27.** *Potencial de exploración de aguas subterráneas según la geología en de la Cuenca Bocapán*

#### 4.1.9. Asignación de Pesos según la escala de Saaty

La jerarquía de cada capa temática se presenta en la **Tabla 26**, en la cual se detallan las comparaciones pareadas de cada capa. A partir de estas comparaciones, se calculan los pesos normalizados (**W**) correspondientes para cada capa temática, como se muestra en la **Tabla 27**, donde se encuentran los pesos normalizados.

**Tabla 26.** Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP

Capa	Geo	Pt	Pr	Dd	NDVI	NDWI	Ts	Us
<b>Geología</b>	1	3	2	4	5	3	6	4
<b>Pendiente</b>	1/3	1	1/2	3	3	2	4	2
<b>Precipitación</b>	1/2	2	1	3	4	3	3	2
<b>Densidad de Drenaje</b>	1/4	1/3	1/3	1	2	2	3	2
<b>NDVI</b>	1/5	1/3	1/4	1/2	1	2	2	2
<b>NDWI</b>	1/3	1/2	1/3	1/2	1/2	1	2	2
<b>Temperatura superficial del suelo</b>	1/6	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1
<b>Uso de suelo</b>	1/4	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1
<b>SUMA DE COLUMNAS</b>	<b>3,03</b>	<b>7,92</b>	<b>5,25</b>	<b>12,83</b>	<b>16,50</b>	<b>14,00</b>	<b>22,00</b>	<b>16,00</b>

Nota: Geo: Geología. Pt: Pendiente. Pr: Precipitación. Dd: Densidad de drenaje. Ts: Temperatura. Us: Uso de suelo.

**Tabla 27.** Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática

Capa	Geo	Pt	Pr	Dd	NDVI	NDWI	Ts	Us	W
<b>Geo</b>	1/3,03=0,33	3/7,92=0,38	0,38	0,31	0,30	0,21	0,27	0,25	(0,33+0,38+0,38+0,31+0,30+0,21+0,27+0,25)/8 =0,31
<b>Pt</b>	0,11	0,13	0,10	0,23	0,18	0,14	0,18	0,13	<b>0,15</b>
<b>Pr</b>	0,16	0,25	0,19	0,23	0,24	0,21	0,14	0,13	<b>0,19</b>
<b>Dd</b>	0,08	0,04	0,06	0,08	0,12	0,14	0,14	0,13	<b>0,10</b>
<b>NDVI</b>	0,07	0,04	0,05	0,04	0,06	0,14	0,09	0,13	<b>0,08</b>
<b>NDWI</b>	0,11	0,06	0,06	0,04	0,03	0,07	0,09	0,13	<b>0,07</b>
<b>Ts</b>	0,05	0,03	0,06	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	<b>0,04</b>
<b>Su</b>	0,08	0,06	0,10	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	<b>0,06</b>

La CR de los pesos normalizados fue 0,041, lo que indica que la relación de consistencia fue satisfactoria, lo que a su vez confirma que los pesos normalizados son consistentes (Saaty y Vargas, 2012). En el **Anexo 01** se presenta el cálculo del CR.

#### 4.1.10. Pesos normalizados para cada valor de las capas

Las categorías de cada capa se muestran en la **Tabla 28**, cuyos valores representan el rango de importancia de clasificación de cada capa.

**Tabla 28.** Pesos normalizados de las capas temáticas

Capa	Categoría	Valor	wf
<b>Geo</b>	Impermeables	1	1/15= 0,067
	Muy baja	2	2/15= 0,133
	Baja	3	3/15=0,200
	Medio	4	4/15=0,267
	Alto	5	5/15=0,333
<b>Pt</b>	>30	1	1/15= 0,067
	20 - 30	2	2/15= 0,133
	10-20	3	3/15=0,200
	5-10	4	4/15=0,267
	0 - 5	5	5/15=0,333
<b>Pr</b>	11-15	1	1/15= 0,067
	15 – 18	2	2/15= 0,133
	18 – 23	3	3/15=0,200
	23 – 27	4	4/15=0,267
	>27	5	5/15=0,333
<b>Dd</b>	8,6 – 9,7	1	1/15= 0,067
	5,6 – 8,6	2	2/15= 0,133
	3,6 – 5,6	3	3/15=0,200
	1,8 – 3,6	4	4/15=0,267
	0 – 1,8	5	5/15=0,333
<b>NDVI</b>	-0,2 – 0,3	1	1/15= 0,067
	0,3 – 0,4	2	2/15= 0,133
	0,4 – 0,5	3	3/15=0,200
	0,5 – 0,6	4	4/15=0,267
	0,6 – 0,8	5	5/15=0,333
<b>NDWI</b>	-1 – -0,7	1	1/15= 0,067
	-0,7 – -0,6	2	2/15= 0,133
	-0,6 – -0,5	3	3/15=0,200
	-0,5 – -0,4	4	4/15=0,267
	-0,4 – 0	5	5/15=0,333

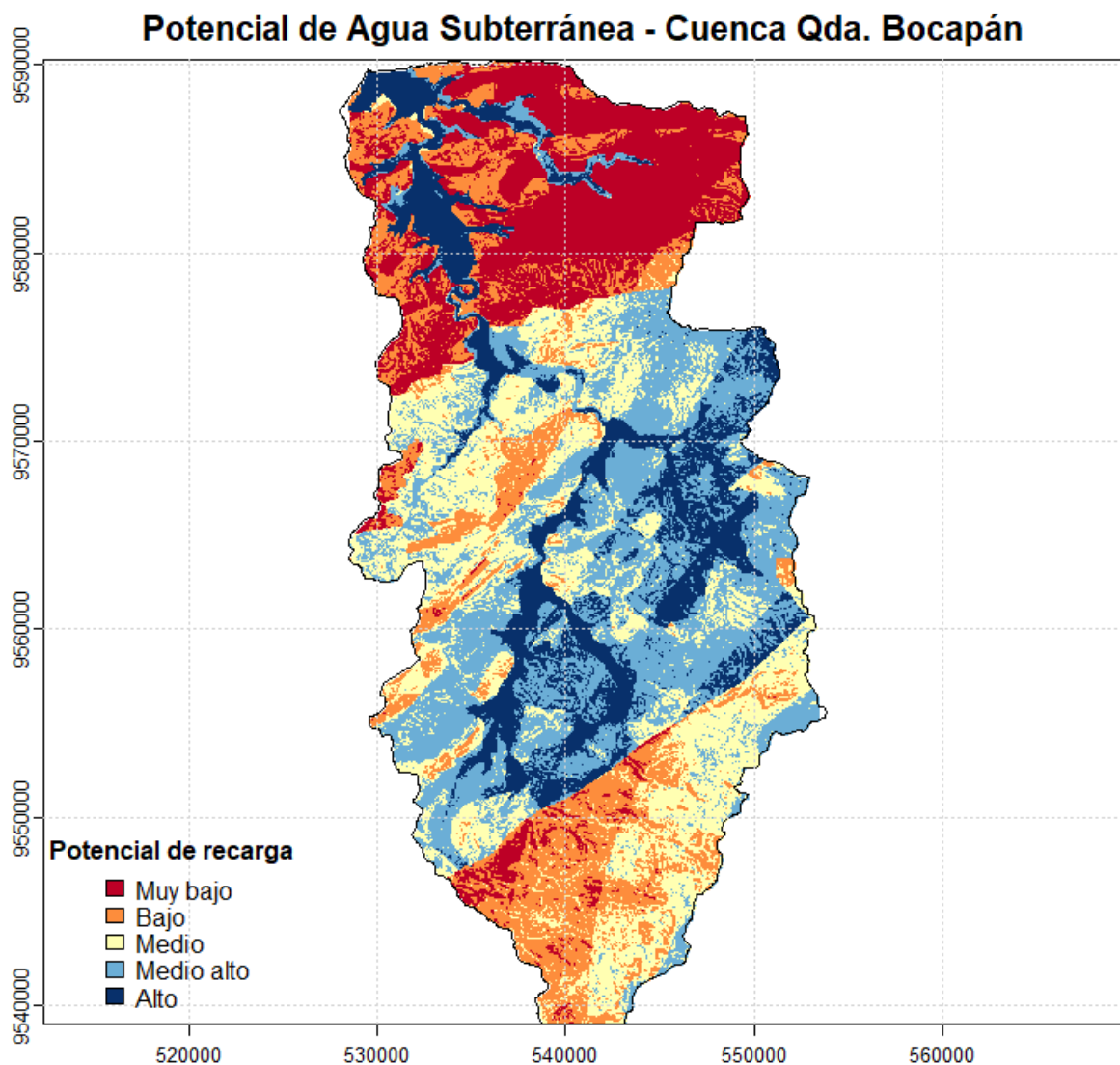
<Continuación>

<b>Ts</b>	35 - 39	1	1/15= 0,067
	32 - 35	2	2/15= 0,133
	28 - 32	3	3/15=0,200
	23 - 28	4	4/15=0,267
	21 - 23	5	5/15=0,333
<b>Su</b>	Bosque seco de montaña	1	1/15= 0,067
	Bosque seco de colina alta	2	2/15= 0,133
	Matorral arbustivo	3	3/15=0,200
	Bosque seco de colina baja	4	4/15=0,267
	Agricultura costera y andina Bosque seco ribereño	5	5/15=0,333

#### 4.1.11. Mapa de zonas de potencial de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán

La **Figura 28** presenta el mapa de las zonas con potencial de aguas subterráneas en el área de estudio, basado en las ocho capas temáticas. En este mapa se observa que las áreas de alta potencialidad se encuentran en zonas con alta permeabilidad geológica, influenciadas por precipitación, baja densidad de drenaje, uso de suelo, NDWI, NDVI y temperatura superficial. Estas zonas corresponden a la cuenca media y baja del cauce de la quebrada Bocapán.

Por otro lado, las zonas de baja y muy baja potencialidad están asociadas con geología impermeable o de muy baja permeabilidad. Es importante señalar que el mapa muestra la posible existencia de agua subterránea, sin hacer una estimación de su abundancia en el área de estudio. En este sentido, las zonas con un GWPI muy alto tienen una mayor probabilidad de contener agua subterránea en comparación con las áreas con GWPI muy bajo.



**Figura 28.** Zonas de Potencial exploración de aguas subterráneas en la Cuenca Bocapán

En el análisis de las zonas de potencial de aguas subterráneas en el área de estudio, se observa una distribución variada en función a la probabilidad de potencial de aguas subterráneas. Como se muestra en la **Tabla 29**, las zonas con potencial alto representan un 15% del área total, abarcando 134,916 km<sup>2</sup>. Por otro lado, las zonas con potencial medio alto constituyen el 26,5% del área, lo que equivale a 238,764 km<sup>2</sup>. Las zonas de potencial medio abarcan 208,548 km<sup>2</sup>, es decir, el 23,2% del área de estudio. En cuanto a las zonas de potencial bajo y muy bajo, estas comprenden 17,7% y 17,6% del área total, respectivamente, con 159,205 km<sup>2</sup> y 158,109 km<sup>2</sup> de extensión.

**Tabla 29.** Zonas de potencial de aguas subterráneas

Potencial de Aguas subterráneas	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Alta	134,916	15
Media Alta	238,764	26,5
Media	208,548	23,2
Baja	159,205	17,7
Muy Baja/Nula	158,109	17,6

#### 4.1.12. validación de mapa de zonas subterráneas

En la cuenca Bocapán existen 92 puntos de agua (ANA, 2021), de los cuales, 83 se encuentran en zonas de alto potencial, 9 en la zona medio alto potencialidad de aguas subterráneas como se observa en la **Figura 29**. Esta información indica una efectividad del 90,22% para el mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas de la cuenca de del presente trabajo. La **Tabla 30** muestra el número y el porcentaje de la categorización de los pozos a partir del mapa resultante.

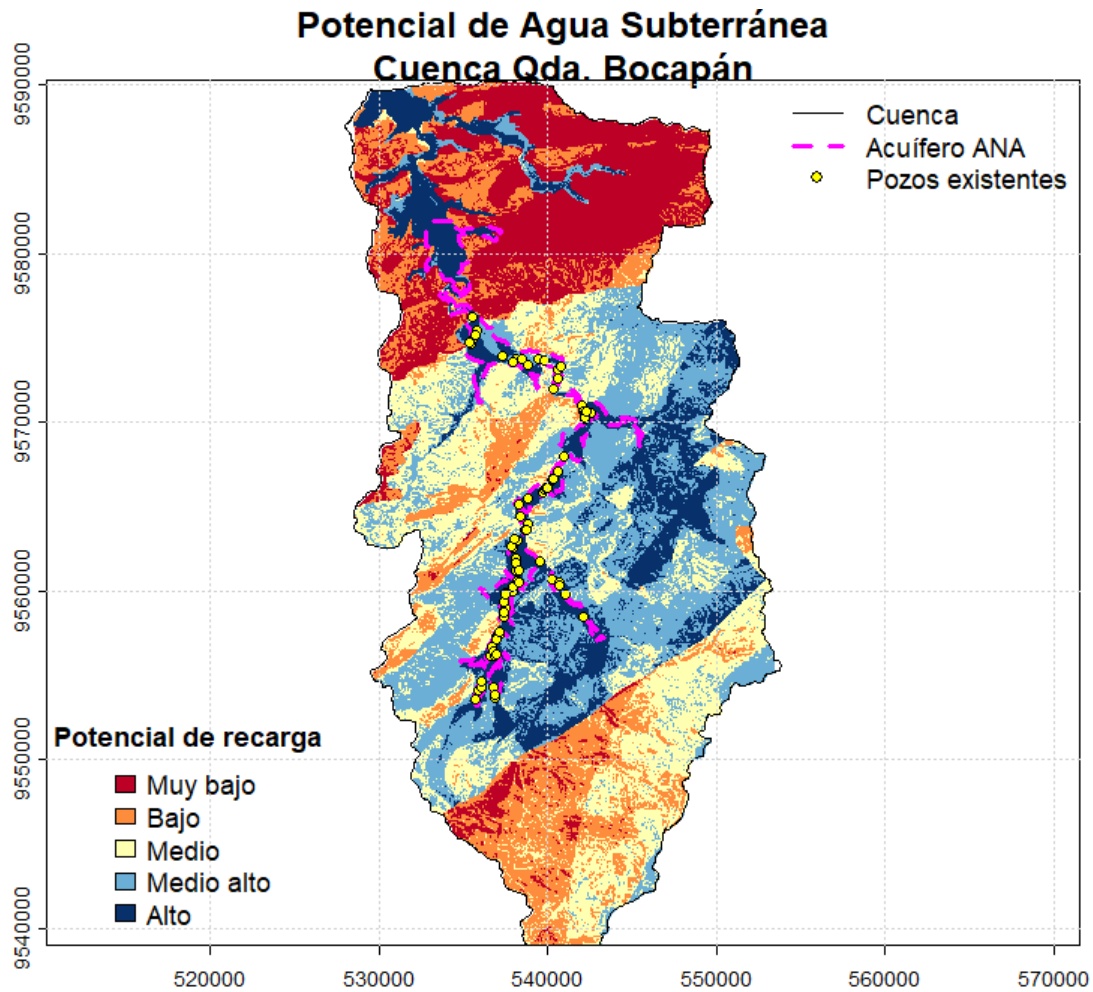
**Tabla 30.** Número y porcentaje de pozos

Potencial de Aguas subterráneas	Pozos	Porcentaje (%)
Alta	83	90,22
Media Alta	9	9,78
Media	0	0
Baja	0	0
Muy Baja/Nula	0	0
<b>Total</b>	<b>92</b>	<b>100</b>

Según los datos proporcionados por la ANA, el 97,04% del área del acuífero se encuentra en las zonas de alta y media alta potencialidad de aguas subterráneas, como se muestra en el mapa resultante (ver **Figura 29**). Esta información está detallada en la **Tabla 31**.

**Tabla 31.** Área de los acuíferos con respecto a la zona de potencial exploración subterránea

<b>Potencial de Aguas subterráneas</b>	<b>Área de Acuífero del ANA (KM<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Alta	30,83	<b>80,12</b>
Media Alta	6,51	<b>16,92</b>
Media	0,69	<b>1,79</b>
Baja	0,33	<b>0,86</b>
Muy Baja/Nula	0,12	<b>0,31</b>
<b>Total</b>	<b>38,48</b>	<b>100</b>



**Figura 29.** Mapa de la distribución de los acuíferos y la ubicación de pozos en las zonas de potencial exploración de aguas subterráneas

#### 4.2. Discusión

El mapa de zonas con potencial de agua subterránea obtenido en este estudio, utilizando técnicas de teledetección pasiva, permite identificar las zonas con alta probabilidad de encontrar agua subterránea. Esta metodología se asemeja al utilizado por Rivera-Vidal (2024) en su estudio sobre la recarga de acuíferos por reforestación en la cuenca del Diguillín, donde también se emplearon variables como litología, pendiente, densidad de drenaje y precipitación, utilizando el AHP para identificar la variabilidad de las zonas de potencial hídrico. Los resultados en su investigación al igual que los obtenidos en esta tesis, demostraron que la metodología aplicada tiene un alto porcentaje de efectividad al validarlo con datos de campo. Lo cual da mayor credibilidad a la metodología empleada.

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que las variables más influyentes para determinar las zonas con alto potencial de exploración de aguas subterráneas en la cuenca Bocapán son la geología, la precipitación y la pendiente del terreno. Estos resultados coinciden con investigaciones previas, como lo evidencian los estudios de Anticona (2021) en Huancavelica, donde se identificaron las mismas variables como los factores claves para estimar las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas. Chonlong y Pacheco (2021) refuerzan este resultado al considerar que, en su investigación, las variables más influyentes para la identificación de zonas de aguas subterráneas fueron, principalmente, la permeabilidad de la roca (como parte de la geología), seguida de la precipitación, los investigadores resaltan la importancia de las características geológicas, enfocadas en la capacidad de las rocas para permitir el paso y almacenamiento de agua, lo cual es crucial para determinar las zonas con mayor potencial. Mientras que, Aguilar & Condori (2023) destacan que la precipitación es la variable de mayor influencia en la identificación de zonas de aguas subterráneas. En este estudio la precipitación también fue identificada como una variable importante. Las investigaciones mencionadas validan la aplicación de estas variables en diversas cuencas y contextos geográficos.

Los resultados fueron validados con el inventario de pozos y acuíferos proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y la validación en la zona de alto potencial de la cuenca Bocapán mostró que el 90,22% de los pozos, equivalentes a 83 pozos, se encuentran dentro de las áreas de alta potencialidad identificadas. Coinciden con la validación de investigaciones previas, como el estudio de Alarcón (2018), que en su investigación, la validación con los puntos de agua proporcionado por el ANA mostró que las zonas determinadas por técnicas de teledetección pasiva para identificar áreas con agua subterránea eran correctas, ya que todos los puntos de ubicación de los pozos existentes se encontraban dentro de las zonas con agua subterránea. Asimismo, el trabajo de Chonlong & Pacheco (2021) en la cuenca del río Portoviejo, que incluyó la validación con 209 puntos de agua, refuerza la eficacia de este enfoque con una efectividad del 87% para el mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas en dicha cuenca.

## V. CONCLUSIONES

A partir de las técnicas de teledetección pasiva, se lograron identificar las zonas con alto, medio alto, medio, bajo y muy bajo potencial de agua subterránea en la cuenca Bocapán, Tumbes. Las zonas con alto potencial representan el 15% del área total, abarcando 134,916 km<sup>2</sup>. Estas áreas se destacan por sus características favorables para la acumulación de agua subterránea, lo que resalta su importancia en el contexto del manejo hídrico de la cuenca.

El análisis de las variables utilizadas en el estudio reveló que las características geológicas, la precipitación y la pendiente son los factores más influyentes en la identificación de las zonas con mayor potencial de agua subterránea. Las zonas con alta permeabilidad geológica y mayores precipitaciones fueron clasificadas como de alto potencial, mientras que las zonas con geología impermeable y baja pendiente fueron asociadas a bajo potencial. Además, el uso de suelo y los índices de vegetación (como el NDVI) también mostraron influencias moderadas, ayudando a definir áreas con mayor capacidad de infiltración de agua.

Mediante el método AHP (Procesos de Análisis Jerárquico), se asignaron los pesos de importancia a cada variable y se generó el mapa de potencial de agua subterránea para la cuenca Bocapán en Tumbes. Los pesos normalizados mostraron que las variables de geología (31%), la precipitación (19%) y la pendiente (15%) tienen el mayor peso en la determinación del potencial de exploración de agua subterránea, lo que resalta su relevancia en el análisis de zonas de exploración.

La validación de los resultados realizada con el inventario de pozos reveló que el 90,22% de los pozos se encuentran en la zona de alto potencial identificada, lo que respalda la precisión del modelo generado. Además, el 80,12% de los acuíferos del ANA están ubicados dentro de la zona de alto potencial, lo que

confirma la fiabilidad de las técnicas empleadas para la identificación de zonas con agua subterránea. Estas validaciones refuerzan la aplicabilidad de las técnicas de teledetección pasiva y el análisis multicriterio para la identificación de zonas de interés para la exploración de aguas subterránea en la cuenca Bocapán.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se sugiere que esta investigación se complemente en el futuro con una evaluación más detallada de cada uno de los parámetros utilizados en el análisis, como las variables obtenidas a través de imágenes satelitales, la pendiente y la precipitación. Estos parámetros proporcionan información clave no solo sobre las condiciones locales de la cuenca Bocapán, sino también sobre los cambios ambientales a nivel global, como los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua subterránea.

Una futura investigación podría enfocarse en la variación temporal de las aguas subterráneas en la cuenca Bocapán, es decir, cómo cambian los niveles y las características de los acuíferos a lo largo del tiempo, para comprender mejor su sostenibilidad y capacidad de recarga.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acharya, T., & Yang, I. (2015). Exploring Landsat 8. *International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research*, 4, 4-10.
- Aguilar, G. C., & Condori, M. (2023). Fuentes de agua subterránea en zonas áridas de la cordillera negra mediante teledetección. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 653-682.  
[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6225](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6225)
- Alarcón, K. (2018). Aplicación de las técnicas de teledetección pasiva para la determinación de aguas subterráneas en la Región Ica durante el periodo 2017 al 2018 [Universidad César Vallejo].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/27965>
- ANA. (2019). Hidrografía Quebrada Bocapán.  
<https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/tumbes/Hidrografí>
- ANA. (2021). Infraestructura de Datos Espaciales—SNIRH-Pozos.  
<https://snirh.ana.gob.pe/ConsultaIDE/Index.aspx?ID=137>
- ANA. (2022). Infraestructura de Datos Espaciales—SNIRH -Acuíferos.  
<https://snirh.ana.gob.pe/ConsultaIDE/Index.aspx?ID=137>
- Anticona, R. (2021). Influencia de la percepción remota en la identificación de zonas potenciales de agua subterránea en la cuenca experimental del Río Ichu [Universidad Nacional de Huancavelica].  
<https://hdl.handle.net/20.500.14597/4393>
- Chonlong, J. P., & Pacheco, H. A. (2021). Estimación de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo mediante análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista Bases de la Ciencia*. e-ISSN 2588-0764, 6(1), 1.  
[https://doi.org/10.33936/rev\\_bas\\_de\\_la\\_ciencia.v6i1.2648](https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i1.2648)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

- Cobos, Y. (2022). Identificación de zonas con potencial agua subterránea mediante técnicas de teledetección, SIG y PJA en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21414>
- Díaz, F. (2018). Prospección de aguas subterráneas usando imágenes landsat 8 y áster gdem mediante el método de árbol de decisiones en el cuadrangulo 15 G - San Marcos—Cajamarca [Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1845>
- franzpc. (2018, marzo 20). Calcular la temperatura de la superficie terrestre con imágenes Landsat 8. El blog de franz. <https://acolita.com/calcular-temperatura-superficie-tierra-imagenes-landsat-8/>
- Fuentes, J. (1992). Aguas subterráneas. Ministerio de agricultura y alimentación.
- García, K., & Herrera, D. (2022). Potencial acuífero mediante la teledetección de humedales en la cuenca Cajamarca—2022 [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/32048>
- INAF. (2008). Estudio Hidrológico para el abastecimiento de agua con fines de riego en la quebrada Casitas-Bocapán—Tumbes.
- INRENA. (2005). Propuesta de asignación de agua en el bloque para la formalización de los derechos de uso de agua en el valle de Casitas—Bocapan y Quebrada Seca. Ministerio de agricultura.
- Joerg, W. (1996). Introducción a la hidrogeología (1a. ed.). Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080066373/1080066373.html>
- Macas-Espinosa, V. X., & López-Escobar, K. F. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista de Teledetección*, 51, 135-145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Maddio, R. A., Dufilho, A. C., & Gandini, M. (2023). Estimación de la recarga potencial de agua subterránea de un acuífero mediante teledetección y sistemas de información geográfica. *Revista de Geología Aplicada a la*

Ingeniería y al Ambiente, 50, e006.  
<https://doi.org/10.59069/24225703ee006>

- Mattar, C., Sobrino, J., Wigneron, J. P., Jiménez-Muñoz, J., & Kerr, Y. (2011). Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*.
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., & Garcia, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348-360.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Neuenschwander, A. (2021). NASA's Applied Remote Sensing Training Program. Universidad de Texas en Austin.
- Quirós, M., & Cabero, V. (2011). *Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Cartografía, Fotointerpretación, Teledetección y SIG: Vol. I (1-243)*. Universidad de Salamanca.
- Rivera-Vidal, R. (2024). Evaluación del cambio en las Zonas de Recarga de Acuíferos por Reforestación en la Cuenca del Diguillín: Un Enfoque de Multicriterio. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22232.10248>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process (2nd ed)*. Springer.
- Zambrano, C. (2024). Modelamiento geoespacial para delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea mediante procesos de análisis jerárquico: Cuenca Jequetepeque, Perú [Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/6742>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1. Cálculo del CR de los pesos normalizados

Wi	LAMDAi
0.31	0.31*3.03=0.95
0.15	0.15*7.92=1.19
0.20	0.20*5.25=1.04
0.10	0.10*12.83=1.23
0.07	0.07*16.50=1.19
0.07	0.07*14=0.99
0.04	0.04*22=0.96
0.06	0.06*16=0.88
<b>Suma</b>	<b>8.43</b>

$$Ci = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$Ci = \frac{8.43 - 8}{8 - 1}$$

$$Ci = 0.61834$$

$$Rci = \frac{1,98 * (n - 2)}{n}$$

$$Rci = \frac{1,98 * (8 - 2)}{8}$$

$$Rci = 1.485$$

$$CR = Ci/Rci$$

$$CR = 0.61834/1.485$$

$$CR = 0.0416$$

Valor aceptable (CR<1)

**Anexo 2.** Pozo anillado en la ribera de la quebrada Casitas-Bocapán, sector Cherrelique



**Anexo 3.** Pozo a tajo abierto con anillos de concreto, en el sector San Carlos - Bellavista



**Anexo 4. Fotografías de la ubicación de los pozos de agua en el área de estudio**









