

# Amner Homero Chávez Huamán

## Estudio de zonas potenciales de acuíferos subterráneos mediante imágenes de satélite en la región San Martín - Perú

 Revisión Repositorio Institucional

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:566076005

Fecha de entrega

10 mar 2026, 13:38 GMT-5

Fecha de descarga

10 mar 2026, 13:40 GMT-5

Nombre del archivo

Ing\_Sanitario\_Amner Homero Chávez Huamán 12-02-26 corregido.pdf

Tamaño del archivo

1.7 MB

51 páginas

11.004 palabras

66.529 caracteres




# 17% Similitud general

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

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 13%  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.

## Fuentes principales

- 16% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 13% 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	repositorio.ucv.edu.pe	5%
2	Internet	repositorio.unsm.edu.pe	3%
3	Internet	tesis.unsm.edu.pe	2%
4	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Martín on 2024-01-06	<1%
5	Internet	cursosihlla.bdh.org.ar	<1%
6	Internet	www.researchgate.net	<1%
7	Internet	hdl.handle.net	<1%
8	Internet	1library.co	<1%
9	Trabajos del estudiante	Universidad de Manizales on 2024-09-21	<1%
10	Trabajos del estudiante	Universidad de Cádiz on 2025-09-01	<1%
11	Internet	ojs.unemi.edu.ec	<1%

12	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Martín on 2024-01-08	<1%
13	Internet	riunet.upv.es	<1%
14	Internet	www.investigacion.biblioteca.uvigo.es	<1%
15	Internet	digital.csic.es	<1%
16	Internet	repository.unipiloto.edu.co	<1%
17	Publicación	Mamani Calla, Nilo. "El acceso al agua como derecho fundamental en la comunid..."	<1%
18	Internet	repositorio.uts.edu.co:8080	<1%
19	Internet	repositorio.unjfsc.edu.pe	<1%
20	Internet	dspace.ups.edu.ec	<1%
21	Internet	www.ciencias.holguin.cu	<1%
22	Internet	manglar.uninorte.edu.co	<1%
23	Trabajos del estudiante	UPAEP: Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla on 2024-08-01	<1%
24	Internet	repositorio.upsc.edu.pe	<1%
25	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Martín on 2024-01-16	<1%

26	Trabajos del estudiante	Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2025-11-15	<1%
27	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Martín on 2026-01-27	<1%
28	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2025-07-24	<1%
29	Internet	repositorio.ufpa.br	<1%
30	Internet	repository.eafit.edu.co	<1%
31	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Martín on 2026-02-24	<1%
32	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
33	Internet	repositorio.unp.edu.pe	<1%
34	Internet	repositorio.unsch.edu.pe	<1%
35	Internet	repositorio.uti.edu.ec	<1%
36	Internet	repository.udistrital.edu.co	<1%



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)  
Vea una copia de esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>



**FACULTAD DE ECOLOGÍA**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

**Estudio de zonas potenciales de acuíferos  
subterráneos mediante imágenes de satélite en la  
región San Martín - Perú**

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

**Autor:**

Amner Homero Chávez Huamán

<https://orcid.org/0009-0006-5128-2089>

**Asesor:**

Ing. M. Sc. Gerardo Cáceres Bardález

<https://orcid.org/0009-0007-3825-841X>

**Moyobamba, Perú**

**2025**



**FACULTAD DE ECOLOGÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA**

**Tesis**

**Estudio de zonas potenciales de acuíferos  
subterráneos mediante imágenes de satélite en la  
región San Martín - Perú**

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

**Autor:**

Amner Homero Chávez Huamán

Sustentado y aprobado el 17 de diciembre del 2025, ante el honorable jurado:

---

**Presidente de Jurado**

Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas  
Luna

---

**Secretario de Jurado**

Blga. M.Sc. Estela Bances  
Zapata

---

**Vocal de Jurado**

Ing. M.Sc. Luis Armando Cuzco  
Trigozo

---

**Asesor**

Ing. M.Sc. Gerardo Cáceres  
Bardález

**Moyobamba, Perú**

**2025**

**Declaratoria de autenticidad**

12

**Amner Homero Chávez Huamán**, con DNI N° 71695377, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Estudio de zonas potenciales de acuíferos subterráneos mediante imágenes de satélite en la región San Martín - Perú.**

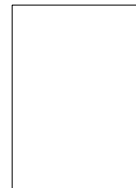
2

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de autoría propia.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 17 de diciembre del 2025.



---

**Amner Homero Chávez Huamán**

DNI N° 71695377

## Ficha de identificación

<b>Título:</b> Análisis de zonas potenciales de acuíferos subterráneas mediante imágenes en la región San Martín - Perú	<b>Área de investigación:</b> Ciencia y Tecnología Ambiental <b>Línea de investigación:</b> Hidráulica y Saneamiento Básico <b>Sublínea de investigación:</b> Abastecimiento de agua para consumo humano <b>Grupo de investigación:</b> Hidráulica y Saneamiento Básico (Resolución N° 293-2024-UNSM/CU-R) <b>Tipo de investigación:</b> Básica <input type="checkbox"/> , Aplicada <input checked="" type="checkbox"/> , Desarrollo experimental <input type="checkbox"/>
<b>Autor:</b> Amner Homero Chávez Huamán	Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria <a href="https://orcid.org/0009-0006-5128-2089">https://orcid.org/0009-0006-5128-2089</a>
<b>Asesor:</b> Ing. M. Sc. Gerardo Caceres Bardalez	<b>Dependencia local de soporte:</b> Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria <a href="https://orcid.org/0009-0007-3825-841X">https://orcid.org/0009-0007-3825-841X</a>

## Dedicatoria

A Dios por iluminar cada pasó que me permitió llegar a estas instancias en mi vida como este logro profesional

Este esfuerzo dedico a mis queridos padres Pedro Chavez H y Maria Ladis Huaman L, por su amor incondicional, con el esfuerzo del día a día que conllevó para poder cumplir cada una de mis metas,

A mis hermanos, Dorali, Lisbeth, Karin, Pedro, Aniley por su compañía, apoyo y las palabras de aliento en los momentos más difíciles que pasó en el transcurso de mi vida.

A mis Tíos, Homero y Luz Elena, por cuidar de mi en los tiempos de estudio, y por todo el cariño que me brindaron para poder culminar mi carrera profesional.

A mis tíos, amigos por su apoyo, consejos y por creer en todo lo que iba a lograr.

**Amner Homero**

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Martín y a los docentes por su gran vocación de enseñanza para lograr la superación académica y formarnos como verdaderos profesionales.

A cada uno de mis docentes que tuve el privilegio de ser su alumno en la que me brindaron su apoyo e inculcaron sus conocimientos

2

## Índice general

Ficha de identificación.....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimientos .....	7
Índice general.....	8
Índice de tablas .....	10
Índice de figuras.....	11
RESUMEN .....	12
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN .....	14
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. Antecedentes de la investigación .....	16
2.1.1. Internacional.....	16
2.1.2. Nacional .....	17
2.1.3. Local.....	18
2.2. Fundamentos teóricos.....	18
2.2.1. Teledetección.....	18
2.2.2. Agua subterránea .....	21
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación .....	23
3.1.1. Contexto de la investigación.....	23
3.1.2. Periodo de ejecución .....	23
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	23
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	23
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	23
3.2. Sistema de variables.....	23
3.2.1. Variables principales.....	23
3.3. Procedimientos de la investigación .....	24

3

3.3.1. Objetivo específico 1: Evaluar las características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas..... 24

3.3.2. Objetivo específico 2: Identificación de áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite.  
..... 28

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 30

4.1. Características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas..... 30

4.1.1. Reclasificación de la capa geología ..... 32

4.1.2. Reclasificación de la capa geomorfología..... 33

4.1.3. Reclasificación de la capa pendiente ..... 34

4.1.4. Reclasificación de la capa densidad de drenaje ..... 35

4.1.5. Reclasificación de la capa densidad de fracturamiento..... 36

4.1.6. Reclasificación de la capa uso y cobertura del suelo ..... 37

4.2. Áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite ..... 39

4.3. Discusiones ..... 43

## CONCLUSIONES ..... 45

## RECOMENDACIONES ..... 46

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 47

## ANEXOS..... 50

Anexo 1. Panel fotográfico ..... 50

Anexo 2. Plano de ubicación..... 51

## Índice de tablas

Tabla 1 Descripción de variables por objetivo específico .....	24
Tabla 2 Potencial por fracturamiento.....	25
Tabla 3 Clasificación de las unidades geomorfológicas .....	26
Tabla 4 Reclasificación de la pendiente .....	26
Tabla 5 Reclasificación a rangos de potencial - uso de suelo.....	27
Tabla 6 Escala de saaty.....	27
Tabla 7 Clasificación de la capa geología .....	30
Tabla 8 Reclasificación de potencial hidrogeológico .....	32
Tabla 9 Reclasificación - Geomorfología.....	33
Tabla 10 Reclasificación - Pendiente .....	34
Tabla 11 Reclasificación - densidad de drenaje.....	35
Tabla 12 Reclasificación - Densidad de fracturamiento.....	36
Tabla 13 Reclasificación - uso de suelo y cobertura de bosque .....	37
Tabla 14 Comportamiento de cada factor en base a los 5 rangos .....	38
Tabla 15 Matriz de Comparación de Pares (Escala de Saaty) .....	40
Tabla 16 Matriz Normalizada y Pesos Finales del Modelo .....	40
Tabla 17 Áreas de Potencial de aguas subterráneas en la Región San Martín.....	41

## Índice de figuras

Figura 1 Geología del departamento San Martín.....	33
Figura 2 Geomorfología del departamento San Martín.....	34
Figura 3 Pendiente del departamento San Martín. ....	35
Figura 4 Densidad de drenaje del departamento San Martín.....	36
Figura 5 Densidad de fracturamiento departamento San Martín.....	37
Figura 6 Uso y cobertura de suelo del departamento San Martín. ....	38
Figura 7 Distribución porcentual de áreas por clases de potencial para los seis factores condicionantes .....	39
Figura 8 Distribución de áreas (km <sup>2</sup> ) según la categoría de potencial hidrogeológico final. ....	40
Figura 9 Distribución de superficie (\$km <sup>2</sup> ) según categorías de potencial hidrogeológico final. ....	41
Figura 10 Potencial de agua subterránea en departamento San Martín.....	42

## RESUMEN

Análisis de zonas potenciales de acuíferos subterráneos mediante imágenes de satélite en la región San Martín - Perú

El análisis de zonas potenciales de acuíferos subterráneos en la región de San Martín, es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la zona. Para ello se evalúa áreas de interés y cuando son áreas grandes se utilizan imágenes satelitales como herramienta para identificar y evaluar áreas con alto potencial para el almacenamiento de agua subterránea, en acompañamiento de tecnologías geoespaciales que permiten optimizar la localización y explotación de acuíferos en una región clave para el desarrollo agrícola y urbano. En base a ello se planteó los siguientes objetivos específicos: Evaluar las características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas; Identificación de áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite. Cabe indicar que el área de estudio evaluada es toda la región San Martín en un periodo de evaluación de 6 meses que va del 09 – 06 – 2025 al 08 – 12 – 2025. En cuanto al aspecto metodológico se basó en determinar la hidrogeología de la región San Martín mediante la base de datos de la plataforma GEOGSPERU y EarthDATA, posterior a ello se determinó los acuíferos potenciales de la región mediante imágenes satelitales. Así mismo la población y muestra estuvo constituida por el área total de la región San Martín, equivalente a 51 253,31 km<sup>2</sup>. Se concluyó que la región San Martín presenta una heterogeneidad espacial en su aptitud para la recarga hídrica, donde factores como el drenaje y la geomorfología son favorables, mientras que la pendiente y el fracturamiento son limitantes. Aunque la geología es altamente favorable para el almacenamiento (60% de unidades porosas), el uso de suelo plantea un riesgo de contaminación por la predominante agricultura, y se determinó que el 36,76% de la región tiene condiciones favorables ("altas" y "muy altas") para el agua subterránea. La explotación eficiente requiere una localización precisa de acuíferos, ya que la mayor parte del territorio (52,93%) es una zona de tránsito hidrogeológico de potencial "medio" y solo un 1,15% constituye áreas de muy alto rendimiento.

**Palabras clave:** Pixeles, acuíferos, imágenes satelitales.

## ABSTRACT

### Analysis of potential underground aquifer zones using satellite imagery in the San Martín region - Peru

The analysis of potential underground aquifer zones in the San Martín region is fundamental for the sustainable management of water resources in the area. To this end, areas of interest are evaluated, and when dealing with large areas, satellite imagery is used as a tool to identify and assess areas with high potential for groundwater storage. This is complemented by geospatial technologies that allow for the optimization of aquifer location and exploitation in a region that is key for agricultural and urban development. Therefore, the following specific objectives were established: To evaluate the hydrogeological characteristics of the region that influence groundwater availability; and to identify areas with the greatest potential for underground aquifers in the San Martín region using satellite imagery. It should be noted that the study area evaluated is the entire San Martín region over a six-month evaluation period, from June 9, 2025, to December 8, 2025. Methodologically, the study was based on determining the hydrogeology of the San Martín region using the GEOGSPERU and EarthDATA databases. Subsequently, the region's potential aquifers were identified using satellite imagery. The population and sample comprised the entire area of the San Martín region, equivalent to 51,253.31 km<sup>2</sup>. The study concluded that the San Martín region exhibits spatial heterogeneity in its suitability for groundwater recharge, with factors such as drainage and geomorphology being favorable, while slope and fracturing are limiting factors. Although the geology is highly favorable for groundwater storage (60% porous units), land use poses a risk of contamination due to the predominant agricultural activity, and it was determined that 36.76% of the region has favorable conditions ("high" and "very high") for groundwater. Efficient exploitation requires precise aquifer location, since most of the territory (52.93%) is a hydrogeological transit zone with "medium" potential, and only 1.15% constitutes areas of very high yield.

**Keywords:** Pixels, aquifers, satellite images.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

En las últimas décadas, la apropiación, distribución y utilización del agua han generado una problemática que ha captado la atención de científicos, técnicos, políticos, así como de miembros de la sociedad civil y de los movimientos sociales, entre otros (Brignardello, 2013). Las causas de la escasez de agua son diversas, y la gestión del recurso hídrico ha dado prioridad a las actividades económicas de gran relevancia nacional por encima del agua destinada al consumo humano (Oppliger et al., 2019). Las proyecciones sobre la disponibilidad de agua, teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, estiman que para el año 2025, el 70% de la población de América del Sur vivirá en áreas con poca disponibilidad de agua (Carlos y Grijalva, 2012).

17 El acceso al agua se considera un derecho esencial e imprescindible para la vida y el desarrollo humano. La escasez de agua se presenta como una problemática grave para su distribución en el país, ya que no todos los habitantes del Perú cuentan con acceso a la red pública de agua (Fernández et al., 2023). Es necesario establecer políticas públicas que estén en sintonía con las necesidades locales (Drenkhan y Castro, 2023). Es crucial fomentar la gestión de los recursos hídricos para analizar los problemas relacionados con el agua no potable, identificar las enfermedades transmisibles y gastrointestinales vinculadas a ella, y crear conciencia sobre sus efectos (Gutiérrez y Baltazar, 2024).

En la Amazonía, también se observa un crecimiento de la población urbana. Este aumento en las áreas previamente menos habitadas, sumado al nuevo modelo económico basado en la explotación de recursos naturales, ha hecho que el agua se convierta principalmente en un factor de producción (Rondon, 2015). La escasez de agua potable podría ser solucionada con una inversión y mantenimiento adecuados, así como con el uso de tecnología avanzada. De esta forma, las empresas encargadas de este servicio podrían asegurar la calidad del servicio que ofrecen a la población (Pérez y Manchay, 2020). En distintas partes de la región San Martín no tiene acceso al agua potable o en su defecto la dotación diaria es racionada, la falta de cuerpos de agua que presentes características adecuadas para el consumo representa un grave problema, es por ello que la identificación de acuíferos potenciales es una alternativa frente a las problemáticas de escasez de agua en la región.

En base a lo mencionado se planteó como pregunta de investigación ¿Cuáles son las zonas potenciales de aguas subterráneas mediante imágenes de satélite en la región

2 San Martín?, además se planteó la hipótesis de investigación H: La región San Martín posee zonas con potencial hídrico subterráneo identificables mediante imágenes de satélite, además como objetivo general. Determinar las zonas potenciales de aguas subterráneas mediante imágenes de satélite en la región San Martín. Y finalmente los objetivos específicos: Evaluar las características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas, Identificación de áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite.

19

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

15

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Internacional

Alarcón (2018) realizó una cartografía de la Demarcación Hidrográfica Manabí con el objetivo de identificar las posibles zonas para la exploración de aguas subterráneas, utilizando imágenes de satélite, un modelo digital de altitudes, la distribución espacial de las lluvias y las propiedades geológicas de la región. El enfoque se fundamentó en un procedimiento de Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) implementado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Posteriormente, empleando la información del inventario de puntos de agua de Ecuador, se verificó el mapa obtenido, llevando a cabo un análisis de superposición. Se logró una efectividad del 77,4%, ya que el mismo porcentaje de puntos de agua se ubican en áreas con potencial positivo dentro del área de estudio.

6

Hernández et al. (2020) realizó su investigación en ciudad de México, donde consiguió detectar posibles áreas en agua subterránea a través de un estudio multicriterio utilizando la teoría de los sistemas de flujo (TSF). La combinación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Multicriterio (AMC) facilitó el reconocimiento de los lugares con un mayor potencial de recarga y descarga, estudiando geología, terreno, formas topográficas, inclinación, vegetación y el Índice Topográfico de Humedad (ITH). La superficie con un gran potencial de recarga oscila entre el 21% y el 80%, en cambio, la superficie de descarga oscila entre el 4% y el 30%. Las áreas potenciales de recarga más significativas incluyen la sierra de Cacoma-Manantlán, la sierra Verde, la sierra de Quila, la sierra de Tapalpa y el conjunto volcánico del Nevado de Colima. En cuanto a las áreas de descarga, principalmente se localizan en las llanuras costeras de las zonas costeras.

6

Roman (2022) este autor realizó una cartografía de la demarcación hidrográfica Manabí – Ecuador, con el objetivo de identificar las posibles zonas para la exploración de aguas subterráneas, utilizando imágenes de satélite, un modelo digital de altitudes, la distribución espacial de las lluvias y las propiedades geológicas de la región. El enfoque se fundamentó en un procedimiento de Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) implementado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Posteriormente, empleando la información del inventario de puntos de agua de Ecuador, se verificó el mapa obtenido, llevando a cabo un análisis de superposición. Se logró una efectividad

15

del 77,4%, ya que el mismo porcentaje de puntos de agua se ubican en áreas con potencial positivo dentro del área de estudio.

30 Vargas (2024) en su estudio realizado en Medellín-Colombia, se centró en la aplicación de la teledetección (imágenes satelitales y sensores remotos) como herramienta fundamental para la prospección de aguas subterráneas, con especial atención en el contexto de Colombia. Se examinan diversas metodologías probadas que permiten la identificación eficiente de zonas de recarga de acuíferos y la estimación del potencial hídrico subterráneo. En conclusión, subraya que la integración estratégica de estas tecnologías, ajustada a las particularidades geográficas y de recursos de cada área, es esencial para incrementar la precisión exploratoria. Finalmente, la combinación de datos aéreos y satelitales resulta ser la clave para una caracterización holística del subsuelo, vital para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en el país.

### 2.1.2. Nacional

8 Díaz (2018) este autor realizó su investigación en Jequetepeque – Cajamarca, consiguió imágenes satelitales Landsat 8; elaboró las imágenes satelitales que incluyen la corrección, unión y adquisición de parámetros para la clasificación en árbol, como son: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), temperatura y pendientes. Luego se llevó a cabo el análisis de estos parámetros para su inclusión en un clasificador en árbol; lo que resultó en la localización de áreas de recarga de agua subterránea. En resumen, este análisis permitió identificar áreas de recarga de agua subterránea mediante imágenes satelitales con una precisión media del 94%, basándose en los pozos presentes en el área de estudio.

7 7 Chilon y Rodríguez (2021) estos autores realizaron su estudio en la Encañada-Cajamarca, fijaron como meta principal detectar potenciales áreas de agua subterránea a través del estudio multispectral de parámetros superficiales con la plataforma Landsat 8 en la cuenca del río la Encañada, empleando la teledetección como medio para adquirir estos parámetros. Se llevó a cabo el cálculo de la descarga, calibración, determinación de parámetros superficiales y uso de un clasificador predictivo, identificando áreas con infiltración positiva y moderadamente positiva vinculadas a fuentes de agua subterránea. Basándose en estos parámetros superficiales, se concluyó que estas áreas concuerdan en un 69,16% con acuíferos porosos no consolidados y en un 24,50% con acuíferos fisurados, según la información hidrogeológica sugerida

### 2.1.3. Local

31 Nuñez e al. (2010) el estudio de INGEMMET sobre San Martín resalta que la configuración estructural del Frente Subandino genera fracturamientos críticos que facilitan la permeabilidad secundaria. Asimismo, identifica a los depósitos aluviales y fluviales en los valles del Huallaga y Mayo como unidades de alta permeabilidad aptas para el almacenamiento hídrico. Estos hallazgos validan científicamente el uso de la litología y el fracturamiento como variables principales en el modelamiento AHP de acuíferos para esta región.

## 2.2. Fundamentos teóricos

### 2.2.1. Teledetección

22 La teledetección es el método para obtener información de la superficie de la Tierra a través de sensores colocados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el suelo y el sensor produce una serie de datos que se procesan más adelante para adquirir datos de la Tierra que sean entendibles (Sánchez, 2018). El primer satélite destinado a la observación terrestre fue lanzado al espacio por los Estados Unidos en 1972, dando inicio a las técnicas de Teledetección, poco empleadas hasta hace poco debido al elevado costo que implicaba manipular imágenes de satélite. 20 Actualmente, debido a la disponibilidad de imágenes y al progreso de tecnologías emergentes, cada vez más empresas y entidades públicas incorporan el uso sistemático de imágenes en sus diversos proyectos. Esto se debe a que pueden ser muy 9 beneficiosas para una amplia gama de usos: obtención de información, identificación de cambios, agricultura (rendimiento de cultivos), vulcanología, seguimiento de catástrofes naturales... entre otros. El Plan Nacional de Teledetección (PNT) comenzó en 2004 bajo 9 la dirección del Instituto Geográfico Nacional, con el propósito principal de coordinar la obtención de imágenes de satélite en todo el territorio español, promover su uso en gran escala y el de sus productos resultantes (Instituto-Geográfico-Nacional, 2022)

#### 2.2.1.1. Tipos de sensores

##### a) Sensores activos (radar, Lidar)

34 Los sensores activos (como el radar o el sonar) tienen la habilidad de iluminar un objeto a través de su propia fuente radiativa. La luz provocará que un objeto emita radiación (fluorescencia) o que refleje la radiación generada por el sensor. Frecuentemente se emplean sensores activos cuando la radiación natural en una banda específica del espectro no basta para iluminar correctamente al objetivo, es decir, cuando la radiación natural se encuentra por debajo del límite de la señal de ruido (FAO, 2020).

## b) Sensores pasivos

En esta categoría, los sensores se conocen como radiómetros. Ellos captan y registran, en línea, la EMR que se refleja o emite por el suelo y la atmósfera. Los sensores pasivos, dependiendo del tipo de detector empleado, tienen la capacidad de capturar distintas secciones de la EMR en longitudes de onda ultravioleta a microondas. (FAO, 2020)

## c) Bandas espectrales

Un espectro de banda es un espectro de longitudes de onda en el espectro electromagnético (EM) que puede ser captado por un sensor a distancia. En el campo de la astronomía, hace referencia a la sección del espectro electromagnético donde un filtro estándar puede atravesar. Las bandas espectrales más utilizadas en el tema de teledetección son las siguientes:

- Espectro visible que tiene un rango de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ , hasta donde puede percibir nuestros ojos. Este espectro se divide 3 rangos, el azul (0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ).
- Infrarrojo próximo (0,7 – 1,2  $\mu\text{m}$ ): Se denomina infrarrojo reflejado y fotográfico. Es importante por su capacidad para discriminar masas vegetales.
- Infrarrojo medio (1,3 – 8  $\mu\text{m}$ ): Región donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre. 22
- Infrarrojo lejano o térmico (8 – 14  $\mu\text{m}$ ): incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- Microondas (a partir de 1 mm): Región de gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

## d) Órbita de los satélites

- Geoestacionarios: Características:
  - órbita circular a una altitud de 36000 km.
  - órbita en el plano ecuatorial.
  - bajas resoluciones espaciales.
  - aplicaciones: comunicación, meteorológicas (Meteosat, GOES), geológicas. etc. (Cursosihlla, 2021)
- Heliosincrónicos: Características:

- órbita casi polar.
- hora local fija a lo largo del año para una latitud dada.
- Escala de observación constante.
- cambios en los ángulos de visión sólo por variaciones estacionales del ángulo solar.
- altitudes mayores a los 300 km.
- comúnmente usados para observación terrestre y meteorología de alta resolución.
- Ej: SPOT, Landsat, Terra. (Cursosihlla, 2021).

1

### 2.2.1.2. Clasificación de imágenes

**Clasificación supervisada.** Esta técnica permite al usuario identificar áreas representativas de cada categoría, con la condición que el usuario cuente con un conocimiento previo de la zona de estudio, a partir de ahí el software que se esté utilizando para el procesamiento de la imagen, calcula las estadísticas elementales de cada categoría (media, rango, desvío estándar, etc., basada en los ND (niveles digitales) de cada pixel que definen a cada una de las clases, para posteriormente asignar el resto de los pixeles de la imagen a una de esas categorías en función a su similitud de niveles digitales de cada pixel.

1

**Clasificación no supervisada.** Por otro lado, a clasificación no supervisada, donde el usuario no cuenta con el conocimiento necesario o suficiente sobre el elemento de interés, fija el número inicial de categorías o más comúnmente llamado "clases" que desea obtener y luego el software asigna los píxeles automáticamente a las distintas clases en los que mayor similitud de niveles digitales encuentre en base a operaciones estadísticas.

1

### 2.2.1.3. Pendiente

La Pendiente del terreno es uno de los parámetros más utilizados para los temas de teledetección, topografía, hidrografía, ya que es el factor principal que determina y diferencia las formas del relieve. La pendiente es la razón matemática determinada por la relación proporcional que existe entre la diferencia de altitud y la distancia horizontal entre ambos puntos. Se puede expresar en porcentaje o en grados sexagesimales. A partir del máximo valor de gradiente de los 8 vecinos más próximos se calcula el valor de máxima pendiente. La máxima pendiente hacia abajo se calcula a partir del máximo 23 gradiente de las celdas que son  $< 0 =$  al valor de elevación de la celda central.

#### 2.2.1.4. Satélite Landsat 8

Es un satélite para la observación terrestre, integrado en un programa colaborativo entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El programa Landsat es uno de los de mayor antigüedad y ofrece imágenes de la Tierra a escala mundial (Rosales y Apaza, 2022).

#### 2.2.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) evalúa la luminosidad y la densidad de la vegetación que se observa en una imagen satelital. La flora saludable posee una curva espectral de reflectancia muy distintiva de la que podemos extraer provecho al calcular la diferencia entre dos bandas: la del rojo perceptible y la del infrarrojo próximo. El NDVI representa esa variación numérica expresada entre -1 y 1. (EOS, 2023)

#### 2.2.1.6. Temperatura de superficie

La temperatura superficial se refiere a la temperatura de la superficie exterior de un objeto, elemento, producto, maquinaria, radiador o dispositivo. Es posible medir de manera directa o a través de sondas de infrarrojos (Martínez, 2020).

### 2.2.2. Agua subterránea

Es aquel que circula y se aloja en el subsuelo llegando a conformar los acuíferos. La fuente de principal de aporte es el agua proveniente de las precipitaciones, a través del proceso de infiltración (Cerón et al. 2021). Otra fuente de alimentación se da por medio de los lagos, arroyos, ríos y lagunas. Esta agua se encuentra debajo del nivel freático y en ocasiones los poros o fisuras del terreno se encuentran saturadas logrando fluir a la superficie de manera natural en forma de manantiales o vertientes (Pino, 2021). Así mismo, el agua subterránea se presenta en variados ambientes y materiales geológicos, desde depósitos de sedimentos no consolidados (lacústricos y aluviales) a roca granítica fracturada, y cada uno de estos ambientes tiene características geológicas e hidrogeológicas específicas que determinan el comportamiento de los flujos subterráneos (Valdivielso, 2021).

#### 2.2.2.1. Afloramiento rocoso

Se refiere a la aparición de rocas en la superficie terrestre que se produce a causa de la erosión o la eliminación de sedimentos. Los afloramientos difieren en su magnitud y resultan útiles para los geólogos para analizar las propiedades y el pasado geológico de las rocas. Además, los fenómenos pueden desvelar sucesos geológicos anteriores y resultan esenciales para entender la geología de una zona (Arroyo y otros, 2023).

### 2.2.2.2. Depósitos eólicos o aluviales

1 Son masas de sedimentos de partículas de roca proveniente de erosión o meteorización que ha sido transportado por un río y depositado en llanuras del subsuelo. Su tamaño puede ser desde las rocas hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Sus texturas son arenosas y a veces pedregosas, ya que se encuentran al pie de la Cordillera en lechos de ríos (Guillerma et al. 2013).

### 2.2.2.3. Proceso analítico jerárquico - AHP

18 El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty, es una herramienta de decisión multicriterio que permite resolver problemas complejos mediante la estructuración jerárquica y la cuantificación de juicios subjetivos. Este método descompone el problema en una jerarquía de factores y utiliza matrices de comparación de pares para determinar la importancia relativa de cada variable (Merino & L. A. Bojórquez, 2021)

### 2.2.2.4. La escala de importancia relativa de Saaty

23 Para cuantificar las comparaciones entre los factores de recarga, el método AHP emplea una escala fundamental de medición que asigna valores del 1 al 9 según la intensidad de importancia de un elemento sobre otro. En tu modelo, esta escala permitió determinar, por ejemplo, que la Geología tiene una "importancia fuerte" (valor 3) o "muy fuerte" (valor 5) frente a variables como el fracturamiento o la pendiente.

Los niveles de la escala se definen de la siguiente manera:

- 13 - 1 (Igual importancia): Ambos factores contribuyen de la misma manera al objetivo.
- 3 (Importancia moderada): La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a un factor sobre otro.
- 14 - 5 (Importancia fuerte): Un factor es fuertemente favorecido sobre el otro.
- 7 (Importancia muy fuerte o demostrada): Un factor es dominante y su superioridad está demostrada en la práctica.
- 9 (Importancia extrema): La evidencia que favorece a un factor sobre otro es de la mayor jerarquía posible.
- Valores intermedios (2, 4, 6, 8): Se utilizan cuando se busca un compromiso entre las definiciones anteriores.

3

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

##### 3.1.1. Contexto de la investigación

###### 3.1.1.1. Ubicación política

El departamento de San Martín está ubicado en el país denominado Perú, dicho departamento tiene una división interna de 10 provincias y 77 distritos

###### 3.1.1.2. Ubicación geográfica

El departamento de San Martín tiene una extensión de 51,253.3 km<sup>2</sup>, lo que representa el 3,9% del total del territorio nacional. Se encuentra en la región nororiental de Perú y limita con los departamentos de Loreto al este, Amazonas al norte, La Libertad al oeste y Huánuco al sur (MIDAGRI, 2006). Ver anexo 02

##### 3.1.2. Periodo de ejecución

Se realizó en un periodo de 6 meses que va del 09 – 06 – 2025 al 08 – 12 – 2025

##### 3.1.3. Autorizaciones y permisos

No aplica.

##### 3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

No aplica.

##### 3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Se realizó la aplicación de los principios éticos generales de la investigación, entre los que destacan: totalidad/ integridad, respeto a las personas, respeto al ecosistema, beneficencia y justicia.

#### 3.2. Sistema de variables

##### 3.2.1. Variables principales

V: Acuíferos subterráneas

3

25

3

4

**Tabla 1***Descripción de variables por objetivo específico*

**Objetivo específico Nº 1:** Evaluar las características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas.

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Características hidrogeológicas	Geología Hidrogeología	Plataforma (GEOGPSERU)	Número de unidades geológicas e hidrológicas

**Objetivo específico Nº 2:** Identificación de áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite.

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Acuíferos subterráneos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acuíferos libres</li> <li>• Acuíferos confinados</li> <li>• Acuíferos semiconfinados</li> </ul>	ArcGIS (Imágenes de satélite)	Número de acuíferos

### 3.3. Procedimientos de la investigación

#### 3.3.1. Objetivo específico 1: Evaluar las características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas

Para el cumplimiento de este objetivo, se recopiló información geoespacial de fuentes oficiales, seleccionando factores críticos para la recarga y almacenamiento de agua subterránea. Los criterios considerados fueron:

- Geología. Definida como el factor determinante, ya que las formaciones aluviales y sedimentarias porosas facilitan el almacenamiento hídrico, a diferencia de las rocas ígneas o metamórficas compactas. La información se obtuvo de la plataforma GeoGPS Perú.(GeoGPS\_Perú, 2020)
- Geomorfología. Se consideraron las formas del relieve, como valles, llanuras aluviales y terrazas, por ser zonas preferenciales de acumulación (GeoGPS\_Perú\_, 2016).
- Estructuras (fallas y fracturas). Estas discontinuidades geológicas fueron integradas como conductos primarios para el flujo del agua subterránea.
- Suelos (edafología). Se analizó la permeabilidad según el tipo de suelo, priorizando los suelos arenosos sobre los arcillosos debido a su capacidad de infiltración (GeoGPS\_Perú., 2015).
- DEM. Se utilizó un sensor ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 metros, descargado de EarthDATA, para derivar variables topográficas (EarthDATA, 2020).

Toda la base de datos fue estandarizada mediante el sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 18S y delimitada al área de estudio utilizando el software ArcGIS. Para el procesamiento específico de la geología y las estructuras en la región San Martín, se ejecutó el siguiente protocolo:

Para la geología, se descargó la carta geológica del departamento de San Martín, los cuales fueron trabajados en el software ArcGIS, se aplicó lo siguiente:

- Unión de las cartas geológicas, mediante las herramientas merge y clip en ArcGIS, con los shapefile de fallas geológicas se procedió a realizar lo siguiente:
- Cálculo de densidad:
- Con la herramienta Line Density ubicada en Spatial Analyst Tools, se obtuvo un mapa ráster donde cada píxel tiene un valor (de 0 a 1,27) que representa los kilómetros de falla por cada kilómetro cuadrado.
- Posteriormente se reclasificó el ráster de densidad, con la herramienta Reclassify ubicado en Spatial Analyst Tools, se asignaron los rangos manualmente:

**Tabla 2**

*Potencial por fracturamiento*

Potencial Hidrogeológico	Justificación	Rango Asignado
Muy Bajo	Píxeles con valor 0 (sin fallas)	1
Bajo	Píxeles con densidad muy baja	2
Medio	Píxeles con densidad moderada	3
Alto	Píxeles con densidad alta	4
Muy Alto	Píxeles con la densidad más alta (las zonas más fracturadas)	5

Fuente: (Matas, 2018)

La geomorfología del área de estudio también fue procesada en ArcGIS. Para la reclasificación, se basó en que las unidades geomorfológicas que son planas y bajas (como los valles) son zonas de acumulación y, por lo tanto, tienen el mayor potencial. Las zonas altas e inclinadas (montañas) son zonas de escorrentía (el agua se va) y tienen el menor potencial. Es así que, las unidades geomorfológicas fueron clasificadas en los siguientes rangos, en el software ArcGIS:

**Tabla 3***Clasificación de las unidades geomorfológicas*

Rango	Potencial hidrogeológico	Unidad Geomorfológica	Descripción
1	Muy bajo	Montaña Ladera escarpada Cresta de montaña	Pendientes muy fuertes. El agua escurre casi en su totalidad. No hay acumulación.
2	Bajo	Colina moderada Ladera de montaña	Pendientes moderadas. Domina la escorrentía sobre la infiltración.
3	Medio	Piedemonte Abanico aluvial Colina baja	Zonas de transición. Tienen algo de pendiente, pero aún permiten la infiltración y acumulación.
4	Alto	Terraza media Terraza alta	Zonas planas, pero ligeramente más elevadas. Buena infiltración, pero el agua está más profunda.
5	Muy alto	Llanura aluvial Valle Terraza baja	Zonas planas, de baja energía, donde el agua se acumula y el nivel freático está cerca de la superficie.

Fuente: (INGEMMET, 2015)

Después de la reclasificación, se convirtió el shapefile en formato a raster, aplicando la herramienta polygon to raster.

Se descargó el DEM de toda el área de estudio, georreferenciándose en el software ArcGIS. Con ello, se elaboró el mapa de pendiente, con la herramienta slope y posteriormente se reclasificó en 5 rangos:

**Tabla 4***Reclasificación de la pendiente*

Rango	Potencial hidrogeológico	Inclinación (Grados)	Descripción
1	Muy bajo	> 30°	Escarpado. Escorrentía total, infiltración casi nula.
2	Bajo	15° – 30°	Fuerte. Domina la escorrentía, infiltración baja.
3	Medio	10° – 15°	Moderado. Infiltración y escorrentía están balanceadas.
4	Alto	5° – 10°	Suave. Infiltración buena, escorrentía baja.
5	Muy alto	0° – 5°	Plano. Infiltración máxima, escorrentía nula.

Fuente: (INGEMMET, 2015)

Después se elaboró el mapa de densidad de drenaje con la finalidad de conocer si el terreno drena eficientemente o no, es decir:

- Una alta densidad de ríos (muchos ríos juntos) es malo para el agua subterránea. Significa que el terreno tiene un drenaje eficiente, el agua se va rápido por la superficie escorrentía) y no tiene tiempo de infiltrarse.

- Una baja densidad de ríos (zonas planas sin cauces) es bueno. Significa que el agua se empoza, se estanca y tiene mucho tiempo para infiltrarse en el subsuelo.

Para generar el mapa de drenaje, se utilizó el shapefile de ríos y quebradas del gobierno regional de san Martín – GORESAM, después se utilizó la herramienta line density para generar un mapa de calor donde los valores altos indican muchos ríos, y los valores bajos (cerca de 0) indican pocas o ninguna quebrada. Finalmente se reclasifica la densidad de drenaje.

Así mismo se reclasificó el uso de suelo aplicando los rangos de 1 a 5:

**Tabla 5**

*Reclasificación a rangos de potencial - uso de suelo*

Clase	Rango de Potencial	Justificación
Agua	5	<b>Muy Alto.</b> Recarga directa al acuífero.
Bosque	4	<b>Alto.</b> El suelo y las raíces retienen el agua, alta infiltración.
Agricultura	3	<b>Medio.</b> El suelo arado permite infiltración moderada.
Suelo Desnudo	2	<b>Bajo.</b> Suelo compacto, genera más escorrentía (runoff).
Urbano	1	<b>Muy Bajo.</b> Suelo sellado (concreto). Infiltración nula.

Fuente: (Matas, 2018)

Finalmente, se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), una técnica de decisión multicriterio diseñada para estructurar problemas complejos mediante una jerarquía de factores y cuantificar juicios subjetivos a través de comparaciones binarias. Mediante el uso de la Escala de Saaty, este método permitió evaluar la importancia relativa de cada variable hídrica, transformando las comparaciones cualitativas en pesos ponderados numéricos para cada capa de información.

Primero se usó la escala de saaty que es de 1 al 9, es decir:

**Tabla 6**

*Escala de saaty*

	Definición (Importancia)
1	Igual (Ambos son igual de importantes)
3	Moderada (Uno es moderadamente más importante que el otro)
5	Fuerte (Uno es fuertemente más importante)
7	Muy Fuerte (Uno es mucho más importante)
9	Extrema (Uno es extremadamente más importante)
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

Fuente: (Merino y Bojórquez, 2021)

Siendo que si (Geología) es 3 veces más importante que (Pendiente), entonces (Pendiente) es  $1/3$  (0,33) veces tan importantes como (Geología). Se usa el valor recíproco.

Posteriormente, se construye la matriz de comparación, utilizando las 6 capas trabajadas:

- Geología: (La más importante). Define si la roca puede almacenar agua.
- Fracturamiento: (Muy importante). Define los caminos para que el agua se mueva.
- Geomorfología: Define dónde se acumula el agua superficialmente.
- Pendiente: Define si el agua se infiltra o escurre.
- Densidad de Drenaje: Define qué tan rápido escurre el agua.
- Clasificación (Uso de Suelo): (Importante, pero menos que la estructura). Define la primera capa de infiltración.

**Normalización y Obtención de Pesos:** Finalmente, se procedió a la normalización de la matriz dividiendo cada celda por la sumatoria de su columna y calculando el promedio por fila. Este procedimiento generó los pesos finales del modelo, donde la Geología (44%) y el Fracturamiento (22%) obtuvieron la mayor relevancia jerárquica para la identificación de acuíferos en la región San Martín.

### **3.3.2. Objetivo específico 2: Identificación de áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite.**

Para el cumplimiento de este objetivo, se integraron las variables procesadas en la fase anterior: geología, geomorfología, pendiente, cobertura de suelo (LULC), densidad de drenaje y fracturamiento. El modelamiento geoespacial se realizó mediante la técnica de Superposición Ponderada (Weighted Overlay), disponible en la caja de herramientas de ArcGIS.

Este proceso consistió en los siguientes pasos técnicos:

Ponderación mediante AHP: Se aplicaron los pesos específicos derivados del Proceso de Análisis Jerárquico de Saaty, donde la geología (44%) y el fracturamiento (22%) actuaron como los principales condicionantes del modelo.

Mapa Final = (Geología \* 44%) + (Fracturamiento \* 22%) + (Geomorfología \* 15%) + (Pendiente \* 9%) + (Drenaje \* 6%) + (LULC \* 4%).

Análisis Multicriterio: La herramienta Weighted Overlay ejecutó una suma ponderada de todos los ráster de entrada, donde cada píxel del mapa final representa el potencial de almacenamiento de agua subterránea basado en la influencia relativa calculada previamente.

El resultado de ello es un mapa que contiene píxeles con valores de 1, 2, 3, 4, 5, siendo los de valor 5 las zonas de potencial muy alto y los píxeles con valor 1 son las zonas de potencial muy bajo.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Características hidrogeológicas de la región que influyen en la disponibilidad de aguas subterráneas

Siguiendo la metodología descrita en el Capítulo III, se procesaron los seis factores. A continuación, se presentan los resultados de la distribución de áreas para cada factor

**Tabla 7**  
*Clasificación de la capa geológica*

Rango	Potencial Hidrogeológico	Unidad (Columna. UNIDAD)	Litología (Col. DESCRIP)	Análisis (Justificación del rango)
5	Muy Alto	Qh-al (Depósito aluvial)	Acumulación de grava, arena, limo y arcilla	Acuífero ideal. Material no consolidado, alta porosidad y permeabilidad.
5	Muy Alto	Q-fl (Depósito fluvial)	Acumulaciones de gravas, arenas, limos y arcillas	Acuífero ideal. Similar al aluvial, asociado a cauces. Alta permeabilidad.
5	Muy Alto	Q-glfl (Depósito glacial, fluvial)	Gravas, arenas en matriz limoarenosas	Acuífero ideal. Material no consolidado de alta porosidad.
4	Alto	Ks-v (Formación Vivian)	Arenisca cuarzosa	Acuífero bueno. Roca de arenisca porosa, permite el almacenamiento.
4	Alto	Ki-cu (Formación Cushabatay)	Areniscas cuarzosas (grano medio a grueso)	Acuífero bueno. Grano grueso indica buena porosidad y permeabilidad.
4	Alto	Ki-ac (Formación Agua Caliente)	Areniscas cuarzosas blancas	Acuífero bueno. Arenisca porosa.
4	Alto	Js-s (Formación Sarayaquillo)	Areniscas feldespáticas, conglomerados	Acuífero bueno. Areniscas y conglomerados son rocas porosas.
4	Alto	Ki-o (Grupo Oriente)	Areniscas cuarzosas, microconglomerados	Acuífero bueno. Areniscas y conglomerados son rocas porosas.
3	Medio	PET-m (Grupo Mitu)	Areniscas, conglomerados, brechas, lavas, tobos	Mixto. Areniscas (buenas) pero mezcladas con volcánicos (malos).
3	Medio	Ki-e (Formación Esperanza)	Areniscas, lutitas y margas	Mixto. Areniscas (buenas) intercaladas

				con lutitas y margas (impermeables).
3	Medio	P-y (Formación Yahuarango)	Areniscas (grano fino), lodolitas, limolitas	Mixto. Arenisca de grano fino (baja perm.) con rocas arcillosas (malas). Mixto. Areniscas (buenas) intercaladas con lutitas (impermeables). Mixto.
3	Medio	Cm-a (Grupo Ambo)	Areniscas cuarzosas, limolitas y lutitas	Areniscas/conglomerados (buenos) mezclados con arcillas (malas). Mixto.
3	Medio	PN-ch (Formación Chambira)	Arenisca, limonita y arcillas, conglomerados	Mixto. Areniscas (buenas) y lutitas (malas).
3	Medio	Ks-c,h (Fm. Cachiyacu, Huchpayacu)	Areniscas cuarzosas y lutitas	Acuicluido. Caliza de baja porosidad y presencia de arcillas (margas). Acuicluido. Caliza. Potencial bajo (a menos que esté muy fracturada).
2	Bajo	Kis-ch (Formación Chonta)	Calizas microlíticas, margas, limoarcillitas	Acuicluido. Caliza. Potencial bajo (a menos que esté muy fracturada).
2	Bajo	TsJi-p (Grupo Pucará)	Calizas gris azulinas	Acuicluido. Caliza. Potencial bajo (a menos que esté muy fracturada).
2	Bajo	Ji-a (Formación Aramachay)	Calizas arenosas negras	Acuicluido. Caliza. Potencial bajo (a menos que esté muy fracturada).
2	Bajo	Ji-c (Formación Condorsinga)	Calizas gris claras y oscuras	Acuicluido. Caliza. Potencial bajo (a menos que esté muy fracturada).
2	Bajo	Ts-ch (Formación Chambará)	Calizas blancas, calizas arenosas	Acuicluido. Arenisca de mala calidad (limosa) con arcillas (margas). Impermeable. Roca ígnea intrusiva (cristalina), sin porosidad.
2	Bajo	Nmp-i (Formación Ipururo)	Areniscas limosas, arcillitas, margas	Impermeable. Roca ígnea intrusiva (cristalina), sin porosidad.
1	Muy Bajo	C-csa-gd,tn (Plutón Cocalita)	Granodiorita, tonalita	Impermeable. Roca metamórfica (cristalina), sin porosidad.
1	Muy Bajo	Cm-mp-gr,tn (Metal Palina)	Granito, tonalita	Impermeable. Roca metamórfica (cristalina), sin porosidad.
1	Muy Bajo	NP-cm-esq,gn (Complejo Marañón)	Esquisto, gneis	Impermeable. Roca metamórfica, sin porosidad.
1	Muy Bajo	NP-cm-mtsed (Complejo Marañón)	Metasedimento	Impermeable. Roca arcillosa (Acuicludo).
1	Muy Bajo	Ks-c (Formación Cachiyacu)	Lutitas oscuras, arcillas margosas	Impermeable. Roca arcillosa (Lutita).
1	Muy Bajo	P-poz (Formación Pozo)	Lutitas grises, caliza grisácea	

1	Muy Bajo	Cm-l (Formación Lavasén)	Tufos dacíticos, riolíticos, brechas	Impermeable. Roca volcánica compactada), porosidad.	Roca (ceniza sin
1	Muy Bajo	Cp-u (Formación Uchiza)	Latitas, porfidos riolíticos, tobas	Impermeable. Roca volcánica compactada), porosidad.	Roca (ceniza sin
1	Muy Bajo	N-ri (Riolita)	Riolita	Impermeable. Roca volcánica, sin porosidad.	
1	Muy Bajo	N-dmsal (Domo - sal)	Domo de Sal	Impermeable. Roca evaporítica que además saliniza el agua.	
Nulo	Excluir	Laguna	Laguna	Cuerpo de Agua. Es agua superficial, se debe excluir (enmascarar).	
Nulo	Excluir	Río	Río	Cuerpo de Agua. Es agua superficial, se debe excluir (enmascarar).	

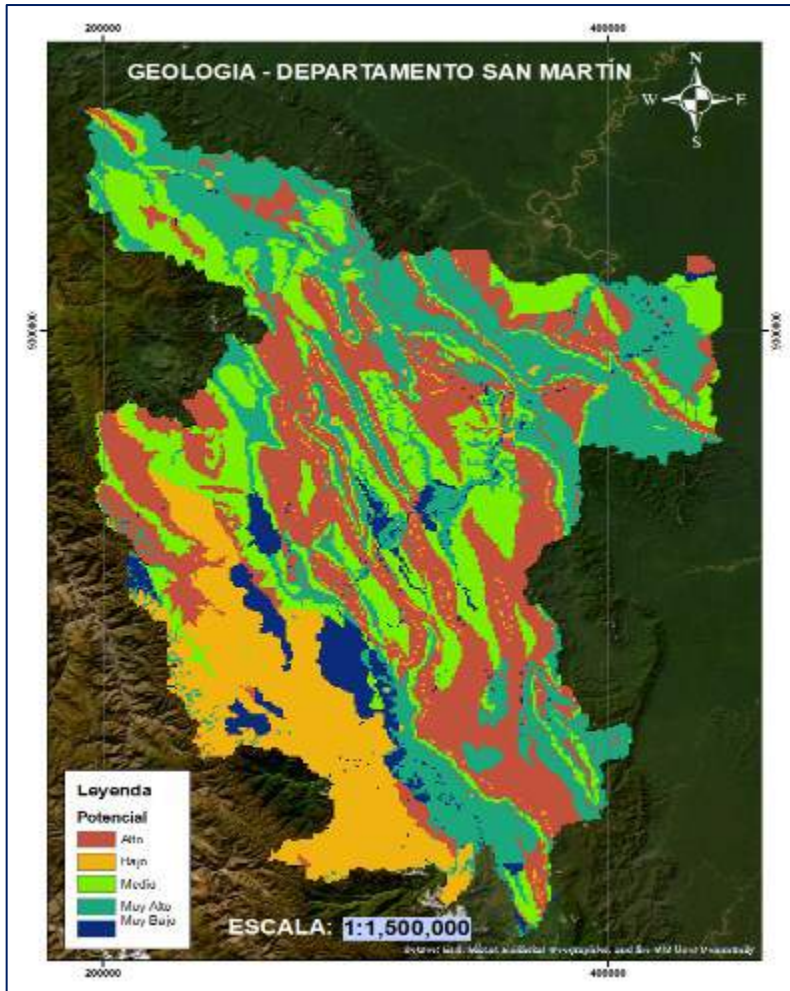
#### 4.1.1. Reclasificación de la capa geología

**Tabla 8**

*Reclasificación de potencial hidrogeológico*

Rango	Potencial	Conteo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje %
1	Muy Bajo	2,478	2,488.52	4,86
2	Bajo	7,389	7,420.36	14,49
3	Medio	10,872	10,918.15	21,32
4	Alto	15,371	15,436.24	30,14
5	Muy Alto	14,894	14,957.22	29,20
<b>Total</b>		<b>51,004</b>	<b>51,220.49</b>	

El análisis geológico (Figura 4.1) permitió identificar las unidades litoestratigráficas según su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua. Como se observa en la Tabla 8, las formaciones de potencial "Alto" y "Muy Alto" (depósitos cuaternarios aluviales y areniscas porosas) predominan en la región.



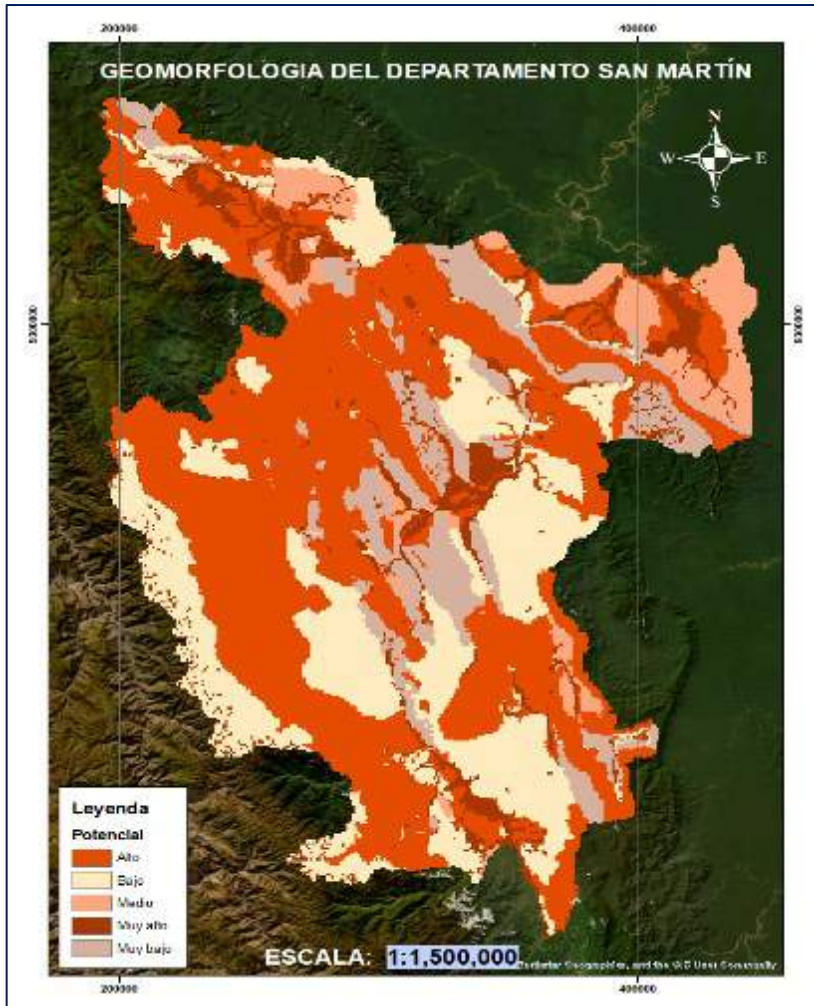
**Figura 1**  
Geología del departamento San Martín.

#### 4.1.2. Reclasificación de la capa geomorfología

**Tabla 9**  
Reclasificación - Geomorfología

N°	Rango	Potencial hidrogeológico	Conteo	Área (1 pixel = 1.0042 km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0	1	Muy Bajo	5 906	5 931,07	11,65
1	2	Bajo	12 687	12 740,85	25,02
2	3	Medio	3 377	3 391,33	6,66
3	4	Alto	24 890	24 995,65	49,08
4	5	Muy Alto	3 854	3 870,36	7,60
				50 929,26	100

La evaluación geomorfológica clasificó el terreno según las geformas favorables para la infiltración. Los resultados (Tabla 9) indican que el 49,08% del área de estudio presenta un potencial "Alto", correspondiendo principalmente a zonas de valles y llanuras que favorecen la acumulación de agua.



**Figura 2**  
Geomorfología del departamento San Martín.

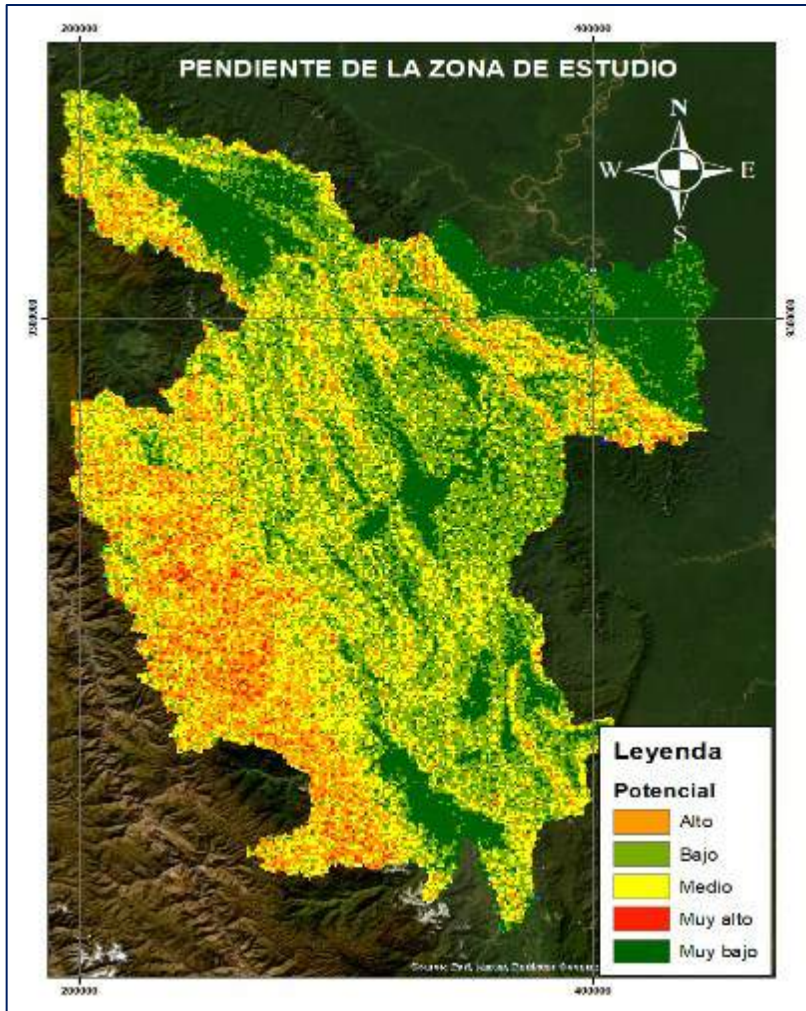
### 4.1.3. Reclasificación de la capa pendiente

**Tabla 10**

*Reclasificación - Pendiente*

N°	Rango	Potencial hidrogeológico	Inclinación (Grados)	Conteo	Área (1 pixel = 1.0042 km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0	1	Muy bajo	> 30°	11 742	11 791,84	22,93
1	2	Bajo	15° – 30°	16 651	16 721,68	32,51
2	3	Medio	10° – 15°	14 066	14 125,70	27,47
3	4	Alto	5° – 10°	7 582	7 614,18	14,81
4	5	Muy alto	0° – 5°	1 170	1 174,97	2,28
			<b>51 428,36</b>	<b>51 211</b>	<b>51 428,36</b>	<b>100,00</b>

La pendiente es un factor condicionante para la infiltración. Se aplicó una lógica inversa donde las zonas planas favorecen la recarga. La Tabla 10 muestra que solo el 2,28% del territorio corresponde a zonas planas óptimas (0° - 5°), mientras que las zonas de pendiente media-baja (Rango 4 y 3) ocupan una extensión significativa.



**Figura 3**  
Pendiente del departamento San Martín.

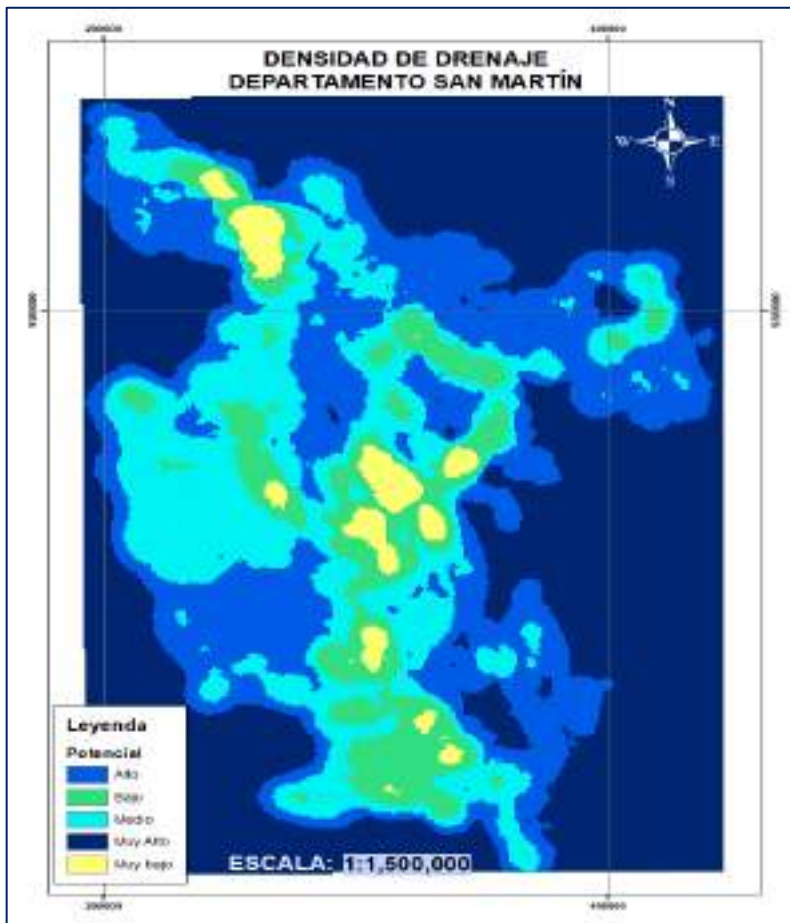
**4.1.4. Reclasificación de la capa densidad de drenaje**

**Tabla 11**

*Reclasificación - densidad de drenaje*

N °	Rango	Potencial hidrogeológico	Presencia de ríos	Conteo	Área (1 pixel = 1.0042 km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
0	5	Muy Alto	Ninguna quebrada- Máxima infiltración	45 678	45 871,88	47,80
1	4	Alto	Pocos ríos	22 760	22 856,60	23,82
2	3	Medio	Incremento de ríos	17 338	17 411,59	18,15
3	2	Bajo	Aumento de ríos	7 573	7 605,14	7,93
4	1	Muy Bajo	Muchos ríos - Máxima escorrentía	2 202	2211.35	2,30
				<b>SUMATORIA</b>	<b>95 956,57</b>	<b>100</b>

Para este factor se consideró que una menor densidad de drenaje superficial indica una mayor probabilidad de infiltración. La Tabla 11 revela que el 47,80% del área analizada posee un potencial "Muy Alto" (baja densidad de ríos), lo que sugiere condiciones favorables para la recarga en gran parte del territorio\*.



**Figura 4**  
Densidad de drenaje del departamento San Martín.

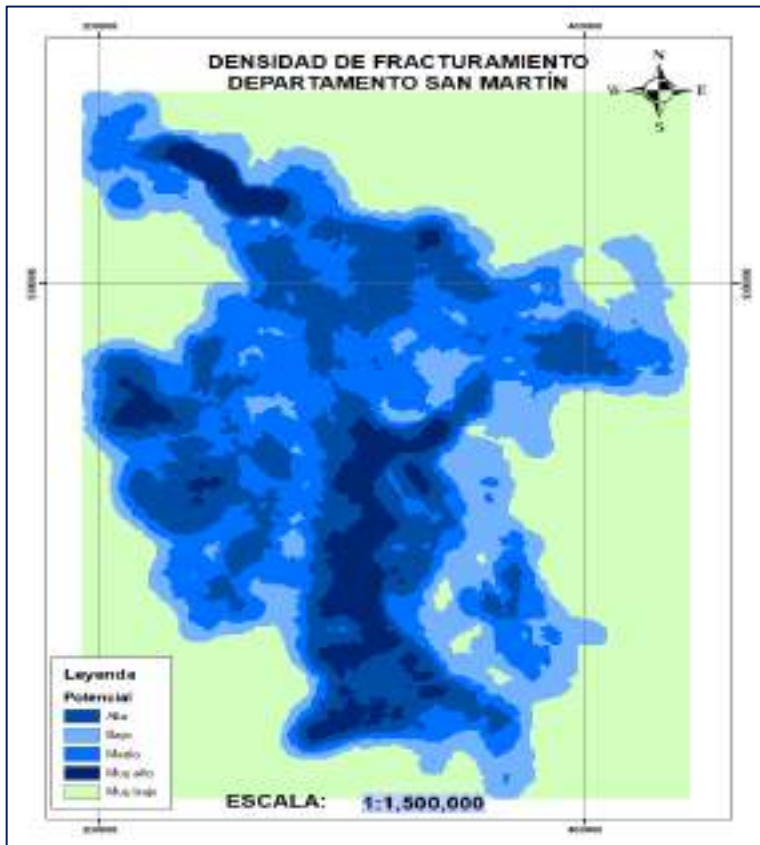
#### 4.1.5. Reclasificación de la capa densidad de fracturamiento

**Tabla 12**  
Reclasificación - Densidad de fracturamiento

Rango	Potencial	Conteo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
1	Muy Bajo	42,541	42,720	45.50%
2	Bajo	14,253	14,313.90	15.20%
3	Medio	18,067	18,142.10	19.30%
4	Alto	14,284	14,342.90	15.30%
5	Muy Alto	4,729	4,749	5.10%
Total		93,874	94,267.90	100.00%

La presencia de lineamientos y fallas geológicas incrementa la permeabilidad secundaria de la roca. Como se muestra en la Tabla 12, las zonas de "Muy Alto"

fracturamiento representan el 5,10% del área, constituyendo zonas claves para la infiltración profunda.



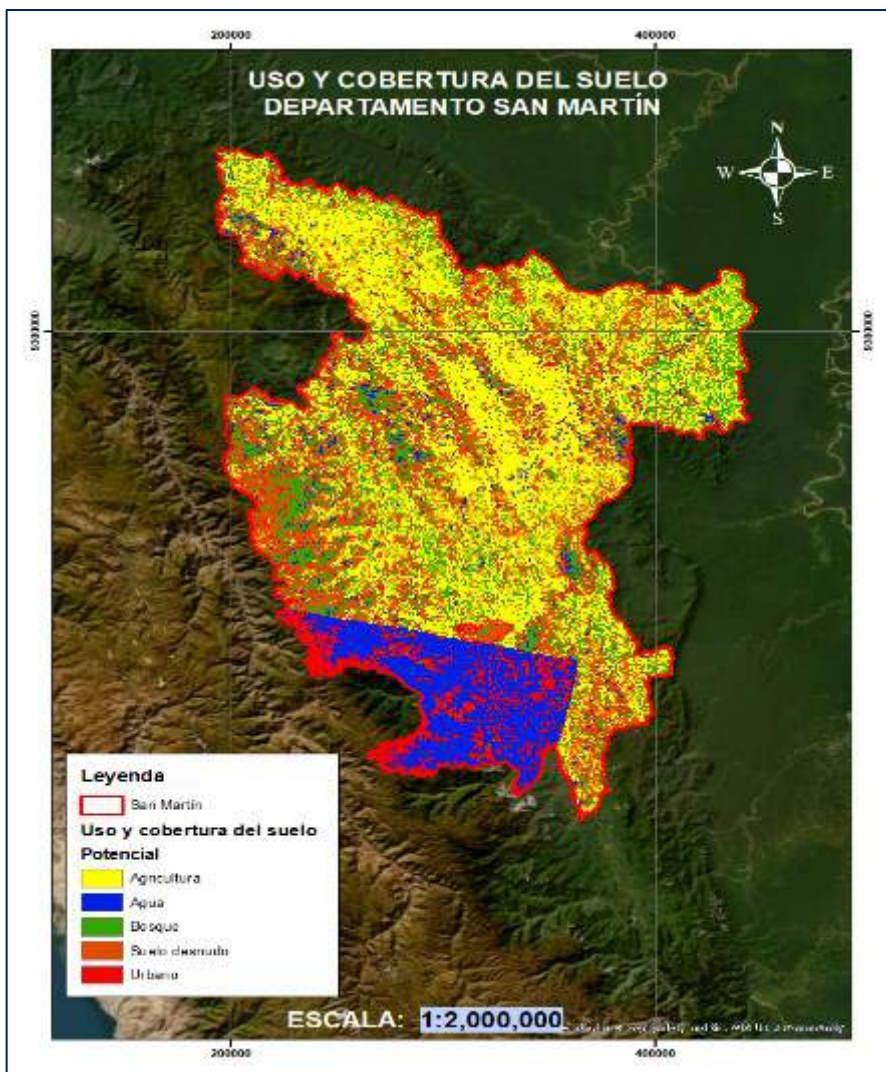
**Figura 5**  
*Densidad de fracturamiento departamento San Martín.*

#### 4.1.6. Reclasificación de la capa uso y cobertura del suelo

**Tabla 13**  
*Reclasificación - uso de suelo y cobertura de bosque*

Rango	Clase	Conteo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
1	Urbano	3,758	3,773.95	7,36
2	Suelo desnudo	12,685	12,738.84	24,83
3	Agricultura	19,645	19,728.38	38,46
4	Bosque	9,000	9,038.20	17,62
5	Agua	5,994	6,019.44	11,73
<b>Total</b>		<b>51,082</b>	<b>51,298.82</b>	<b>100</b>

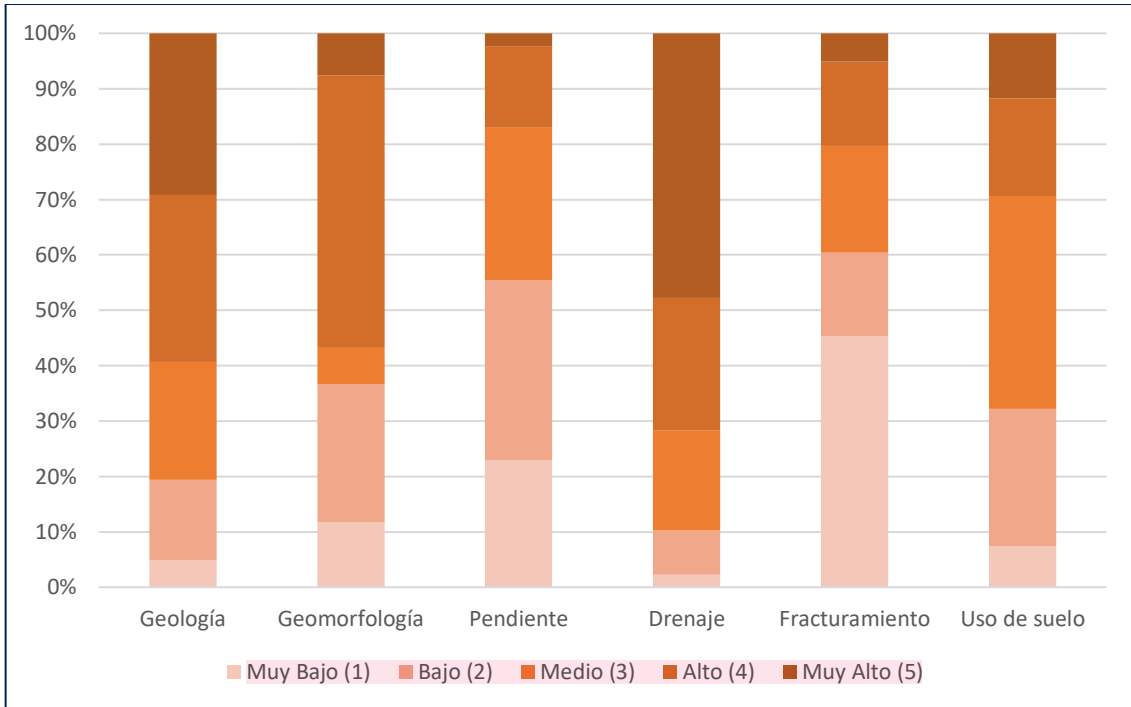
La cobertura vegetal juega un papel crucial en la retención e infiltración del agua. Según la Tabla 13, el 11,73% del área corresponde a cuerpos de agua (Potencial 5) y el 17,62% a bosques (Potencial 4), mientras que la agricultura, que ocupa el 38,46%, se clasificó con un potencial medio.



**Figura 6**  
*Uso y cobertura de suelo del departamento San Martín.*

**Tabla 14**  
*Comportamiento de cada factor en base a los 5 rangos*

Factor	Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)
Geología	4,86%	14,49%	21,32%	30,14%	29,20%
Geomorfología	11,65%	25,02%	6,66%	49,08%	7,60%
Pendiente	22,93%	32,51%	27,47%	14,81%	2,28%
Drenaje	2,30%	7,93%	18,15%	23,82%	47,80%
Fracturamiento	45,50%	15,20%	19,30%	15,30%	5,10%
Uso de suelo	7,36%	24,83%	38,46%	17,62%	11,73%



**Figura 7**  
*Distribución porcentual de áreas por clases de potencial para los seis factores condicionantes*

La Figura 7 presenta la distribución porcentual de las clases de potencial hidrogeológico para los seis factores condicionantes, permitiendo evidenciar la heterogeneidad espacial de las variables evaluadas. El análisis destaca al factor Drenaje como el más favorable para la recarga, con un predominio del rango "Muy Alto" (47.8%) debido a la baja densidad de escorrentía superficial en gran parte de la zona de estudio, seguido por la Geomorfología, que concentra un 49.1% en el nivel "Alto" asociado a geoformas de valles y llanuras. Por el contrario, los factores Fracturamiento y Pendiente exhiben un comportamiento limitante en la mayor parte del territorio, acumulando sus mayores porcentajes en los rangos "Muy Bajo" (45.5%) y "Bajo" respectivamente, lo cual refleja la naturaleza puntual de los sistemas de fallas y la topografía accidentada característica de la selva alta; esta variabilidad justifica la integración de todas las capas mediante el modelo AHP para determinar las zonas donde convergen las condiciones óptimas.

**4.2. Áreas con mayor potencial de acuíferos subterráneos en la región San Martín utilizando imágenes de satélite**

Para la integración de las variables, se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty. Este método permitió establecer pesos ponderados para cada factor en función de su importancia relativa en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.

21

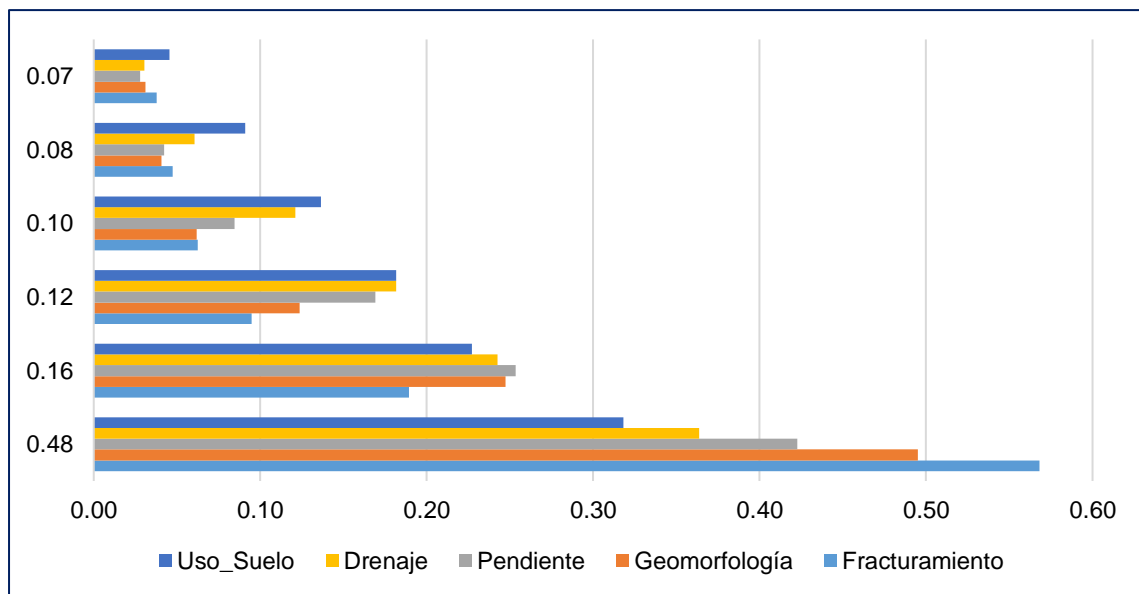
33

**Tabla 15**  
*Matriz de Comparación de Pares (Escala de Saaty)*

Factor	Geología	Fracturamiento	Geomorfología	Pendiente	Drenaje	LULC
Geología	1	3	4	5	6	7
Fracturamiento	0.33	1	2	3	4	5
Geomorfología	0.25	0.5	1	2	3	4
Pendiente	0.2	0.33	0.5	1	2	3
Drenaje	0.17	0.25	0.33	0.5	1	2
LULC	0.14	0.2	0.25	0.33	0.5	1
SUMATORIA	2.09	5.28	8.08	11.83	16.5	22

**Tabla 16**  
*Matriz Normalizada y Pesos Finales del Modelo*

Factor	Geología	Fracturamiento	Geomorfología	Pendiente	Drenaje	Uso suelo	Prom.	%
Geología	0.48	0.57	0.50	0.42	0.36	0.32	0.44	44
Fracturamiento	0.16	0.19	0.25	0.25	0.24	0.23	0.22	22
Geomorfología	0.12	0.09	0.12	0.17	0.18	0.18	0.15	15
Pendiente	0.10	0.06	0.06	0.08	0.12	0.14	0.09	9
Drenaje	0.08	0.05	0.04	0.04	0.06	0.09	0.06	6
Uso de suelo	0.07	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	4
SUMATORIA							100.00	



**Figura 8**  
*Distribución de áreas (km²) según la categoría de potencial hidrogeológico final.*

En la Figura 8, se visualiza la jerarquía de pesos normalizados del modelo AHP para la región San Martín, donde se evidencia una clara dominancia de los factores lito-estructurales sobre los ambientales. En el eje vertical, los niveles de agrupación definidos por la Geología muestran que este factor es el determinante principal con un peso del 44%, seguido por el Fracturamiento con un 22%, alcanzando este último pico

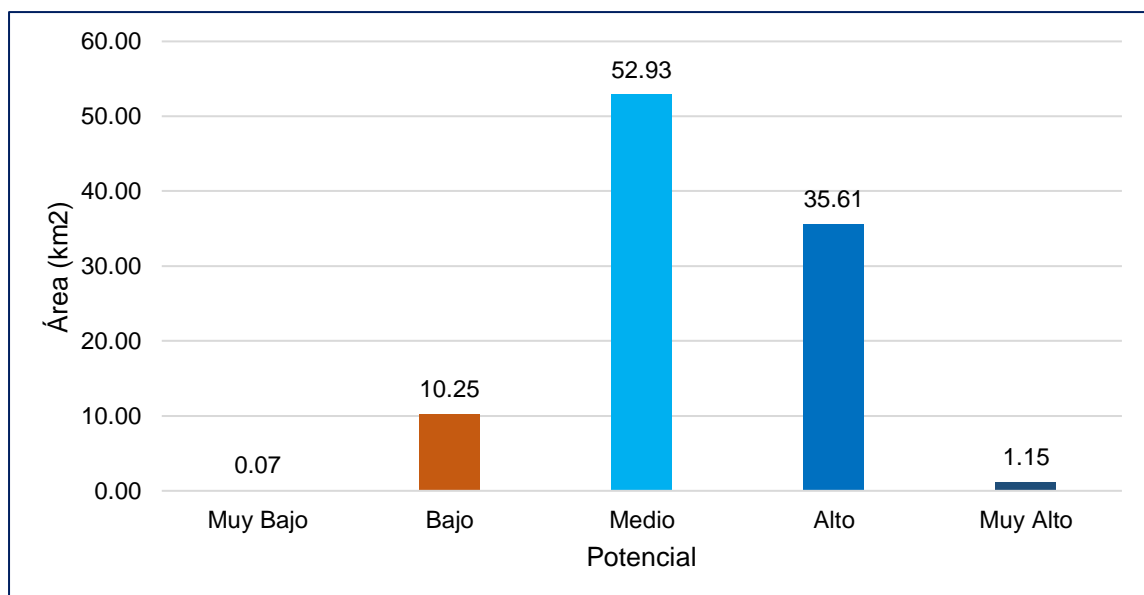
de normalización cercanos a 0.57 en su comparativa directa. La reducción progresiva en la longitud de las barras para la Geomorfología (15%), Pendiente (9%), Drenaje (6%) y Uso de Suelo (4%) confirma visualmente un modelo de potencial de acuíferos donde el 66% de la importancia relativa recae en la capacidad de infiltración y almacenamiento profundo del subsuelo, relegando a las variables de superficie a un plano secundario.

**Tabla 17***Áreas de Potencial de aguas subterráneas en la Región San Martín*

N°	Rango	Potencial Hidrogeológico	Conteo	Área (km <sup>2</sup> )	%
0	1	Muy Bajo	35	35.15	0.07
1	2	Bajo	5094	5,115.62	10.25
2	3	Medio	26298	26,409.62	52.93
3	4	Alto	17693	17,768.10	35.61
4	5	Muy Alto	569	571.42	1.15
		TOTAL	49689	49,899.90	100

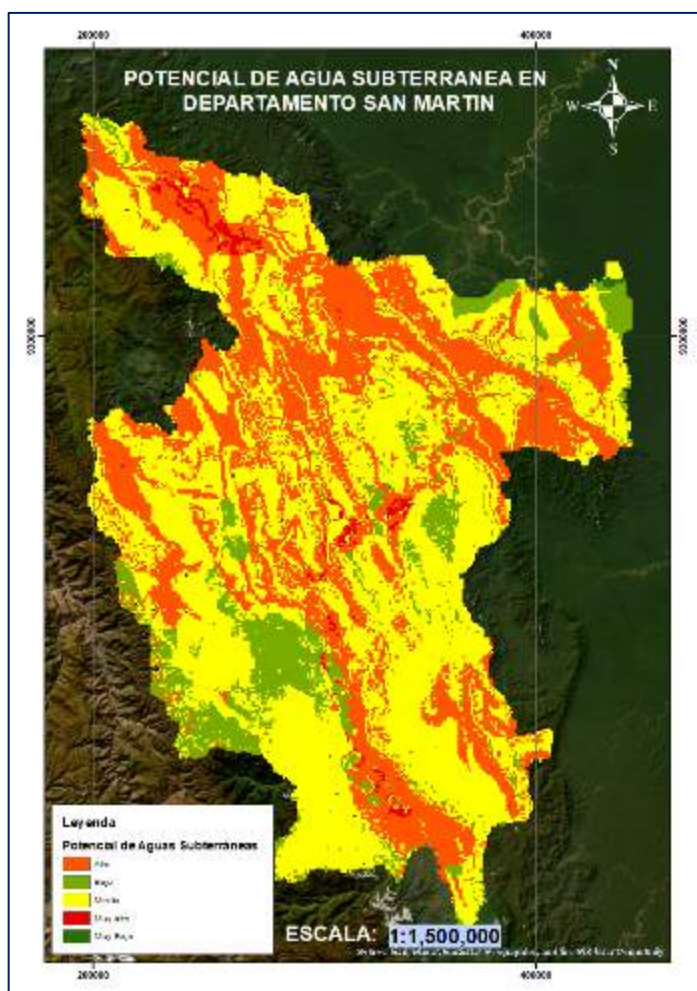
El análisis espacial indica que el 52,93% del territorio presenta un potencial "Medio", actuando como zonas de transición. Sin embargo, el hallazgo más relevante es que el 36,76% del área de estudio (la suma de los niveles Alto y Muy Alto, equivalentes a 18 339,52 km<sup>2</sup>) presenta condiciones favorables para la exploración hidrogeológica.

Las zonas de potencial "Muy Alto" (1,15%) son áreas críticas y estratégicas, restringidas principalmente a los valles aluviales planos con alta densidad de fracturamiento subyacente, donde convergen todos los factores positivos para la infiltración y almacenamiento del recurso hídrico.

**Figura 9**

*Distribución de superficie (km<sup>2</sup>) según categorías de potencial hidrogeológico final.*

Como se aprecia en la Figura 9, la distribución espacial del modelo sigue un comportamiento normal (tipo Campana de Gauss), donde las categorías extremas representan una minoría del territorio. La clase predominante es el potencial "Medio", que abarca el 52,93% (26 409,62\ km<sup>2</sup>) de la región, seguida por el potencial "Alto" con un 35,61% (17 768,10\ km<sup>2</sup>). Es importante destacar que la categoría "Muy Alto" comprende únicamente el 1,15% (571,42\ km<sup>2</sup>) del área total. Esta baja proporción no indica un error, sino la alta selectividad del modelo, el cual ha restringido la clasificación máxima exclusivamente a aquellas zonas (principalmente valles aluviales cuaternarios) donde convergen simultáneamente una litología permeable, una pendiente plana (<5°) y una baja densidad de drenaje, identificándolas como los objetivos prioritarios para la perforación de pozos productivos.



**Figura 10**  
*Potencial de agua subterránea en departamento San Martín.*

### 4.3. Discusiones

En la presente investigación, la aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) permitió integrar seis variables geoespaciales, logrando identificar que el 36,76% del territorio de San Martín posee un potencial "Alto" o "Muy Alto" para el almacenamiento de agua subterránea. Este resultado guarda una estrecha relación con lo reportado por Roman (2022) y Alarcón (2018), quienes aplicaron la misma metodología AHP en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, obteniendo una efectividad de validación del 77,4% al cruzar sus mapas con inventarios de puntos de agua. Al comparar ambos estudios, se confirma que la metodología de superposición ponderada es una herramienta robusta y confiable para la prospección hidrogeológica regional, ya que permite discriminar zonas con precisión aceptable sin la necesidad de costosas exploraciones geofísicas iniciales en la totalidad del territorio.

Los resultados obtenidos muestran una selectividad significativa en el modelo, donde las zonas de potencial "Muy Alto" representan apenas el 1,15% y las de potencial "Alto" el 35,61%, sumando una superficie favorable total del 36,76%. Estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos por Hernández et al. (2020), quienes en su estudio multicriterio en cuencas de México determinaron que la superficie con gran potencial de recarga oscila entre el 21% y el 80%. La coincidencia de los resultados de esta tesis con el límite inferior del rango de Hernández sugiere que el modelo aplicado en San Martín es conservador y realista, evitando la sobreestimación del recurso hídrico y alineándose con la geología compleja de la selva alta, a diferencia de otros modelos que podrían clasificar erróneamente grandes extensiones como zonas de recarga.

El análisis de factores determinó que la Geología es la variable más influyente (peso de 44%), identificando a los depósitos aluviales y areniscas como las unidades de mayor interés. Esto corrobora lo hallado por Chilon y Rodríguez (2021) en la cuenca del río La Encañada, quienes concluyeron que las áreas de infiltración positiva concuerdan en un 69.16% con acuíferos porosos no consolidados. La convergencia entre ambos estudios valida la decisión de otorgar el mayor peso ponderado a la litología en esta investigación, confirmando que, independientemente de la ubicación geográfica (Cajamarca o San Martín), la porosidad primaria de los materiales no consolidados sigue siendo el principal indicador directo de la presencia de agua subterránea.

Para la generación de las capas de Uso de Suelo (LULC) y Geomorfología, esta tesis utilizó procesamiento de imágenes satelitales y Modelos Digitales de Elevación (DEM). Esta técnica se alinea con lo expuesto por Díaz (2018), quien mediante imágenes Landsat 8 y el cálculo de índices como NDVI y NDWI, logró localizar áreas de recarga

con una precisión del 94%. Aunque Díaz utilizó un clasificador de árbol de decisión y esta tesis un modelo AHP, ambos estudios demuestran que la teledetección es indispensable para caracterizar la cobertura vegetal y la humedad del suelo, factores que en esta investigación (representados por el factor LULC y Drenaje) demostraron ser correctivos esenciales para no sobreestimar el potencial en zonas impermeabilizadas o de alta escorrentía.

En el modelo final, el factor Fracturamiento obtuvo el segundo mayor peso (22%), destacando zonas puntuales (5,1% del área) con muy alta densidad de fallas. Este hallazgo se complementa con lo descrito por Chilon y Rodríguez (2021), quienes identificaron que el 24.50% de sus zonas potenciales correspondían a acuíferos fisurados. Si bien en San Martín la proporción de áreas de alto fracturamiento es menor, la discusión resalta la importancia de la permeabilidad secundaria; tal como sugieren los antecedentes, las zonas donde la litología no es porosa (roca madre) dependen exclusivamente de estas estructuras geológicas identificadas en el mapa de densidad de fracturamiento para permitir la infiltración profunda.

El análisis de la variable Pendiente y Drenaje en esta tesis reveló que las zonas planas y con baja densidad de ríos (47,8% con potencial Muy Alto en drenaje) son las más favorables. Esto es consistente con el enfoque de Hernández et al. (2020), quienes incluyeron el Índice Topográfico de Humedad (ITH) y la inclinación como variables críticas para detectar zonas de descarga en llanuras. La comparación evidencia que, tanto en el estudio de Hernández como en el presente, la morfología del terreno actúa como el "contenedor" físico del agua; sin embargo, se observa una diferencia en la interpretación: mientras Hernández enfoca las llanuras como zonas de descarga, el presente modelo las valora también como zonas de recarga preferencial por infiltración directa, debido a la alta precipitación de la región San Martín.

## CONCLUSIONES

Se determinó que existe una marcada heterogeneidad espacial entre los factores condicionantes en la región San Martín. Mientras que los factores Drenaje y Geomorfología actúan como los principales promotores de la infiltración (con un 47,8% y 49,1% de áreas favorables respectivamente), la Pendiente y el Fracturamiento se comportan como factores limitantes en gran parte del territorio. Esto concluye que, aunque la región posee una aptitud natural para la recarga hídrica, esta se ve restringida geográficamente por la topografía accidentada de la selva alta y la localización puntual de los sistemas de fallas.

El análisis individual de los factores evidenció que la Geología es la variable más estable y favorable para el almacenamiento de agua, dado que cerca del 60% del área de estudio (sumando los rangos Alto y Muy Alto) está compuesta por unidades litoestratigráficas porosas como depósitos aluviales cuaternarios y areniscas fisuradas. Sin embargo, el factor Uso de Suelo advierte un riesgo potencial, ya que la cobertura predominante es la agricultura (38.46%), lo que sugiere que las zonas de recarga podrían estar expuestas a contaminación por agroquímicos si no se gestionan adecuadamente.

La integración mediante el modelo AHP permitió identificar que el 36,76% de la región San Martín (equivalente a 18 339,52 km<sup>2</sup>) presenta condiciones favorables ("Altas" y "Muy Altas") para la exploración de aguas subterráneas. El modelo demostró una alta selectividad al restringir la categoría "Muy Alto" a solo un 1.15% del territorio (571,42 km<sup>2</sup>); estas áreas críticas corresponden a la convergencia estratégica de valles aluviales planos, alta densidad de fracturamiento y baja escorrentía, validando la hipótesis de que los acuíferos más productivos se encuentran en zonas muy específicas y no generalizadas. La distribución estadística de los resultados finales sigue un comportamiento normal (Campana de Gauss) con un predominio del potencial "Medio" (52,93%), lo que caracteriza a San Martín como una región de transición hidrogeológica. Esto concluye que, si bien el recurso hídrico subterráneo es abundante, su explotación eficiente requiere de una localización precisa, ya que la mayoría del territorio actúa como zona de tránsito y recarga regional más que como reservorios de alto rendimiento para explotación inmediata.

## RECOMENDACIONES

35 A la gestión territorial y protección de zonas de recarga (dirigido al GORE San Martín y la ANA), se recomienda la implementación de políticas de Ordenamiento Territorial que otorguen un estatus de protección especial a las zonas con potencial de infiltración "Muy Alto", específicamente en las geoformas de valles y llanuras (49.08% de potencial Alto en Geomorfología). Dado que el factor Drenaje reveló que el 47.80% del territorio posee condiciones óptimas para la máxima infiltración, es imperativo restringir el cambio de uso de suelo y la expansión urbana en estos sectores para prevenir la impermeabilización del terreno y garantizar la sostenibilidad de los acuíferos libres.

Para la optimización de la prospección hidrogeológica (dirigido a la municipalidad y EPS), se sugiere utilizar el mapa de potencial hidrogeológico final como el instrumento técnico base para la planificación de obras de saneamiento. Se debe priorizar la inversión pública en prospección geofísica y perforación de pozos exclusivamente dentro del 1.15% (571.42 km<sup>2</sup>) del territorio categorizado como potencial "Muy Alto". Esta focalización estratégica minimiza el riesgo de inversión en "pozos secos" y asegura caudales productivos al intervenir en zonas donde convergen una litología permeable y una pendiente mínima.

En cuanto a la caracterización estructural de detalle (dirigido a consultores y geólogos): Dada la relevancia otorgada al fracturamiento (22% de peso en el AHP) y su escasa presencia en rango "Muy Alto" (5.10% del área), se recomienda que toda campaña de campo incluya un cartografiado geológico-estructural de detalle en estos lineamientos específicos. Es crítico validar in situ si las fallas identificadas por sensores remotos funcionan como canales de flujo o barreras hidráulicas antes de definir el diseño final de captación.

Para investigaciones futuras y monitoreo de cobertura de suelo (dirigido a la comunidad académica), se sugiere profundizar en el impacto del factor Uso y Cobertura del Suelo (LULC) mediante análisis multitemporales de alta resolución. Considerando que la actividad agrícola ocupa el 38.46% del territorio, es necesario investigar cómo la dinámica de deforestación en la última década ha alterado la capacidad de infiltración real. Se recomienda integrar el factor "Precipitación" en futuras versiones del modelo para transitar de un mapa de potencial de almacenamiento a uno de recarga hídrica efectiva.



- GeoGPS\_Perú. (2015). *Mapa de suelos del Perú*. Obtenido de <https://www.geogpsperu.com/2015/10/mapa-de-suelos-onern.html>
- GeoGPS\_Perú. (2016). *Geomorfología*. Obtenido de <https://www.geogpsperu.com/2016/06/geomorfologia-descargar-shapefile-gratis.html>
- Guillerma, O., Chiesa, J., y Gómez, D. (2013). *Los depósitos eólicos asociados a la planicie aluvial del Río Desaguadero, provincia de Mendoza, Argentina*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/317537240\\_Los\\_depositos\\_eolicos\\_a\\_sociados\\_a\\_la\\_planicie\\_aluvial\\_del\\_Rio\\_Desaguadero\\_provincia\\_de\\_Mendoza\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/317537240_Los_depositos_eolicos_a_sociados_a_la_planicie_aluvial_del_Rio_Desaguadero_provincia_de_Mendoza_Argentina)
- INGEMMET. (2015). *Hidrogeología*.
- Instituto-Geográfico-Nacional. (2022). *Instituto Geográfico Nacional*. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- Martínez, R. (2020). *Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque Bebedero (Costa Rica)*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4517/451763485001/451763485001.pdf>
- Matas, A. (2018). *Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión*. Obtenido de [https://scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1607-40412018000100038](https://scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1607-40412018000100038)
- Merino, B. T., y L. A. Bojórquez, T. (2021). *Manual proceso analítico jerárquico (AHP)*.
- MIDAGRI. (2006). *Características generales del Departamento de San Martín*. Obtenido de [https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/san\\_martin/principales\\_caracteristicas\\_san\\_martin.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/san_martin/principales_caracteristicas_san_martin.pdf)
- Núñez, S., Luque, G., y Pari, W. (2010). *Riesgo Geológico en la región San Martín*.
- Pino, E. (2021). *Sobreexplotación del agua subterránea y la agroexportación en el acuífero costero de la Yarada, Tacna, Perú*.
- Rondon, G. (2015). *Los territorios del agua en dos localidades de la Amazonía norte del Perú: los casos de Lamas (San Martín) y Santa María de Nieva (Amazonas)*. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/305192665\\_Los\\_territorios\\_del\\_agua\\_en\\_dos\\_localidades\\_de\\_la\\_Amazonia\\_norte\\_del\\_Peru\\_los\\_casos\\_de\\_Lamas\\_San\\_Martin\\_y\\_Santa\\_Maria\\_de\\_Nieva\\_Amazonas](https://www.researchgate.net/publication/305192665_Los_territorios_del_agua_en_dos_localidades_de_la_Amazonia_norte_del_Peru_los_casos_de_Lamas_San_Martin_y_Santa_Maria_de_Nieva_Amazonas)

Rosales, J., & Apaza, H. (2022). *Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección.*

Sánchez, B. (2018). *La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión.* Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-22532018000300243&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-22532018000300243&script=sci_arttext)

Valdivielso, A. (2021). *IAgua.* Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-subterranas>

Vargas, J. (2024). *Efectividad y aplicaciones de imágenes satelitales y sensores remotos en la exploración de aguas subterráneas: análisis y recomendaciones para el contexto Colombiano.* Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/eafcce9b-a0a3-4250-9733-0685d66f8a97/content>

## ANEXOS

### Anexo 1. Panel fotográfico



### Anexo 2. Plano de ubicación

