

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DECISIÓN  
MULTICRITERIO USANDO SENSORES REMOTOS PARA  
EVALUAR EL POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA  
EN LA CUENCA CAPLINA DEL DESIERTO  
DE ATACAMA**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Victor Manuel Pocco Riveros**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO**

**TACNA – PERÚ**

**2024**

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

TESIS

**"APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO  
USANDO SENSORES REMOTOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE AGUA  
SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA CAPLINA DEL  
DESIERTO DE ATACAMA"**

Tesis sustentada y aprobada el 26 de noviembre del 2024, con el siguiente Jurado:

PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Ing. Mario David Huamán Rodrigo

MIEMBRO - SECRETARIO

  
\_\_\_\_\_  
Mgr. Ing. Fredy Cleto Cabrera Olivera

MIEMBRO

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Jorge Pantaleón Barriga Gamarra

ASESOR DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Ph.D. Ing. Edwin Martín Pino Vargas

### CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 341-2023-FLAG/UNJBG de la tesis denominada: "APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO USANDO SENSORES REMOTOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA CAPLINA DEL DESIERTO DE ATACAMA", presentado por el Bachiller Victor Manuel Pocco Riveros, para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo - Geotécnico, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software Antiplagio TURNITIN cuenta con el nivel de similitud cuyo porcentaje es 10%, por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis, la cual está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención de título profesional.



---

FIRMA ASESOR  
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas  
DNI N°: 00486621



---

FIRMA AUTOR  
Bach. Victor Manuel Pocco Riveros  
DNI N°: 71924416

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mi familia, la cual siempre me ha brindado su apoyo y amor incondicional para culminar mis estudios.

A mis docentes y compañeros que me sirvieron de aliento para seguir adelante y son una motivación para seguir luchando por mis sueños.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por otorgarme salud y un día más de vida para continuar como profesional en esta hermosa carrera que es la Geología – Geotecnia. Agradezco a todos mis docentes que me enseñaron todo lo necesario para ser un excelente profesional y poder introducirme en el mundo laboral como un geólogo capaz.

Agradezco a mi asesor y mentor en la investigación PhD. Edwin Pino, así como al proyecto de investigación “Estudio de la recarga hidráulica en el acuífero Caplina, Tacna, Perú, para un manejo sostenible del agua subterránea” de la UNJBG, el cual me permitió la oportunidad de realizar este trabajo de tesis.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
HOJA DE JURADO .....	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	16
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES .....	18
1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	18
1.1.1. Ubicación .....	18
1.1.2. Clima.....	18
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2.1. Problema principal .....	20
1.2.2. Problemas específicos .....	20
1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
1.3.1. Objetivo principal.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	21

1.5. JUSTIFICACIÓN.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	24
2.1. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO .....	24
2.1.1. Geología .....	24
2.1.2. Geomorfología .....	35
2.1.3. Geología estructural .....	38
2.1.4. Hidrología – hidrogeología .....	42
2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	44
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	45
2.3.1. Agua subterránea.....	45
2.3.2. Sensores remotos.....	47
2.3.3. Toma de decisiones multicriterio .....	49
2.3.4. Proceso Analítico Jerárquico.....	50
2.3.5. Matriz de comparación por pares.....	51
2.3.6. Análisis de superposición ponderada .....	52
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	54
3.1. CONJUNTO DE DATOS Y FUENTES.....	54
3.2. ASIGNACIÓN DE PESO USANDO AHP .....	56
3.3. INTEGRACIÓN DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA.....	58
CAPÍTULO IV: DATA, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
4.1. CAPAS TEMÁTICAS .....	61
4.1.1. Influencia de la geología .....	61
4.1.2. Influencia de la geomorfología .....	63
4.1.3. Influencia de los suelos .....	65

4.1.4. Influencia de la densidad de drenaje .....	67
4.1.5. Influencia de la densidad de lineamientos estructurales .....	70
4.1.6. Influencia de la pendiente .....	72
4.1.7. Influencia de la precipitación acumulada.....	73
4.1.8. Influencia del LU/LC .....	77
4.1.9. Influencia del NDVI.....	79
4.2. MAPA DE ZONAS POTENCIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	83
4.3. VALIDACIÓN.....	85
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	89
CONCLUSIONES .....	92
RECOMENDACIONES .....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área del proyecto .....	19
Figura 2. Columna estratigráfica de la cuenca Caplina .....	34
Figura 3. Mapa geológico de la cuenca Caplina .....	35
Figura 4. Sistema de fallas Incapuquio en el sur del Perú .....	39
Figura 5. Sistema de fallas teclas de piano en el sur del Perú.....	41
Figura 6. Evolución de la línea de tendencia de balance frente al volumen de recarga .....	43
Figura 7. Clasificaciones de los acuíferos.....	47
Figura 8. Aplicación de los sensores remotos para la calidad del agua .....	48
Figura 9. Clasificación de los sensores remotos .....	49
Figura 10. Modelo estándar de la estructura MCDM .....	50
Figura 11. Patrón de cálculos implicados en la metodología AHP.....	51
Figura 12. Clasificación entre los PCM .....	36
Figura 13. Esquema conceptual del análisis de superposición ponderada.....	53
Figura 14. Esquema metodológico aplicado en este estudio.....	55
Figura 15. Capa temática – geología.....	63
Figura 16. Capa temática – geomorfología .....	65
Figura 17. Capa temática – suelos.....	67
Figura 18. Capa temática – densidad de drenaje.....	69
Figura 19. Capa temática – densidad de lineamientos .....	71
Figura 20. Capa temática - pendiente.....	73

Figura 21. Mapa de precipitaciones de la cuenca Caplina, SENAMHI.....	74
Figura 22. Capa temática – precipitación acumulada, Terraclimate.....	76
Figura 23. Capa temática – LU/LC.....	78
Figura 24. Capa temática – NDVI.....	80
Figura 25. Mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas .....	84
Figura 26. Esquema propuesto de las zonas de recarga y zonas de alimentación dentro de la cuenca Caplina .....	70
Figura 27. Validación del mapa de potencial de agua subterránea .....	88
Figura 28. Mapa de volúmenes de explotación del acuífero Caplina .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Caplina .....	38
Tabla 2. Conjunto de datos utilizado y su capa temática asociada .....	56
Tabla 3. Escala de importancia relativa de Satty .....	58
Tabla 4. Matriz de comparación por pares de las capas temáticas.....	59
Tabla 5. Peso normalizado de la matriz .....	60
Tabla 6. Reclasificación de la capa de geología .....	62
Tabla 7. Reclasificación de la capa de geomorfología.....	64
Tabla 8. Reclasificación de la capa de suelos .....	66
Tabla 9. Reclasificación de la capa de densidad de drenaje .....	68
Tabla 10. Reclasificación de la capa de densidad de lineamientos estructurales .....	70
Tabla 11. Reclasificación de la capa de pendiente.....	72
Tabla 12. Reclasificación de la capa de precipitación acumulada .....	75
Tabla 13. Reclasificación de la capa de LU/LC.....	77
Tabla 14. Reclasificación de la capa de NDVI .....	79
Tabla 15. Síntesis de los indicadores favorable .....	81
Tabla 16. Asignación de peso y ranking de las subclases para las capas temáticas .....	82

## RESUMEN

Este estudio propone realizar la tarea de un nuevo estudio de exploración de zonas potenciales de aguas subterráneas (GWPZs), ya que estos son de vital importancia para los tomadores de decisiones en recursos hídricos. En este sentido, el objetivo principal de esta investigación fue determinar fuentes potenciales de agua subterránea fuera de las zonas de los pozos de extracción utilizando una técnica de toma de decisiones multicriterio con sensores remotos en una región de condiciones desérticas y áridas, como es la región de Tacna. Se proporciona un método de exploración utilizando técnicas de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) aplicadas a datos de teledetección.

El método AHP permitió calcular la influencia entre los diversos factores influyentes en el proceso de recarga de agua subterránea y, junto con el entorno GIS, se pudo producir un mapa del potencial de existencia probable de las aguas subterráneas. Los resultados de GWPZs muestran cuatro tipos de clasificaciones porcentuales de potencial de agua subterránea: La distribución muestra a) 15,02 %, b) 23,93 %, c) 59,80 % y d) 1,25 % del área total con potencial alto, moderado, bajo y muy bajo, respectivamente. Los resultados obtenidos fueron validados con la información de litologías, geomorfologías y estructuras, que explican la distribución de las porosidades y permeabilidades en el área de estudio. Similarmente, se superponen datos de pozos existentes en el área de estudio, ofreciendo un porcentaje de similitud del 86,9 % con el modelo obtenido. Esto revela la eficacia del método AHP en un entorno GIS como estrategia para analizar potencial de aguas subterráneas en zonas áridas.

*Palabras clave:* Toma de decisiones multicriterio, sensores remotos, proceso de jerarquía analítica, agua subterránea.

## ABSTRACT

This study presents a new exploration study of potential groundwater zones (GWPZs), which are crucial resources for water management decision-makers. The primary objective of this research is to determine potential sources of groundwater outside the extraction well zones by using a Multicriteria Decision Making technique with remote sensing in a region of desert and arid conditions, such as the Tacna region. An exploration method is also provided using Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques applied to remote sensing data.

The AHP method allows us to calculate the influence between the various influencing factors in the groundwater recharge process and, together with the GIS environment, a map of the probable existence potential of groundwater was produced. The results of GWPZs show four types of percentage classifications of groundwater potential: The distribution shows a) 15,02 %, b) 23,93 %, c) 59,80 % and d) 1,25 % of the total area with high, moderate, low and very low potential, respectively. A validation process was carried on with information of lithologies, geomorphologies and structures, which explain the distribution of porosities and permeabilities in the study area. Similarly, data from existing wells in the study area are superimposed, offering a similarity percentage of 86,9% with the model obtained, highlighting the AHP-GIS method's effectiveness and precision in assessing groundwater potential in arid regions. Furthermore, high-potential GWP areas identified offer valuable insights for water resource development and management in the Caplina basin.

Keywords: Multi-Criteria Decision-Making, Remote Sensing, Analytical Hierarchy Process, Groundwater.

## INTRODUCCIÓN

La región andina en el sur del Perú se encuentra dentro de un contexto desértico hiperárido. Las instituciones internacionales como el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) han clasificado al desierto de Atacama como uno de los lugares más áridos del mundo con escasas precipitaciones anuales. Es así que, el impacto de la incertidumbre climática ya es evidente en las regiones semiáridas y áridas, que enfrentan una mayor vulnerabilidad a la escasez de agua. Un clima seco y el crecimiento de la población aumentan la demanda de los escasos recursos hídricos (Abrams et al., 2018). Por estos motivos, realizar estudios para comprender las posibles aguas subterráneas explotables es esencial para la gestión hídrica en la ciudad de Tacna.

El problema del agua no solo se atribuye a la naturaleza climática de nuestra área de estudio, sino también se atribuye al uso irresponsable del agua de los habitantes de Tacna. Es el caso más alarmante lo que vendría a ser el aumento desmedido de la agricultura, En estos últimos, se ha detectado un aumento de uso de aguas a actividades agrícolas a pesar de los limitados recursos presentes dentro de la cuenca. La sobreexplotación de pozos autorizados y no autorizados para riego y consumo afecta las aguas subterráneas, como es el caso del acuífero La Yarada, provocando su degradación cualitativa y cuantitativa (Balacco et al., 2022). Asimismo, el análisis de los proyectos elaborados de entidades como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) se ven obstruidos por los conflictos de gobernabilidad

que modifican las leyes relativas a la gestión de los recursos hídricos subterráneos y los regímenes de limitación (Pino et al., 2018).

En vista de esta evidente problemática, este trabajo de tesis tiene como enfoque principal desarrollar un nuevo estudio de prospección de aguas subterráneas por medio de la implementación de herramientas de teledetección. Por lo tanto, es necesario, primero, resolver la problemática del conocimiento de la hidrogeología, para luego identificar zonas potenciales de aguas subterráneas, el cual aún presenta un desafío en términos de tiempo y costo para resolver los problemas de escasez y manejo de estos recursos (Nigussie et al., 2019). Por lo tanto, la delimitación de las Zonas Potenciales de Agua Subterránea (GWPZ) es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en zonas áridas. Así mismo, la implementación de las herramientas tecnológicas geoespaciales, como el uso de datos satelitales (Sentinel, SRTM, Terraclimate), puede brindar un aporte relativo de análisis científico desde un punto de vista general hacia la solución de problemas hídricos.

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

#### ***1.1.1. Ubicación***

La cuenca Caplina se encuentra ubicada dentro del desierto de Atacama en el sur del Perú; políticamente, se encuentra dentro de la región de Tacna colindando con la frontera chilena. La cuenca Caplina tiene elevaciones que van desde los 0 hasta los 5660 msnm y un área total aproximada de 4230 km<sup>2</sup>. Limita al Oeste con la cuenca Sama, mientras que al Este limita con la cuenca Concordia, compartida por territorio peruano y chileno, y la cuenca Lluta, que pertenece a territorio chileno (figura 1 y anexo 1).

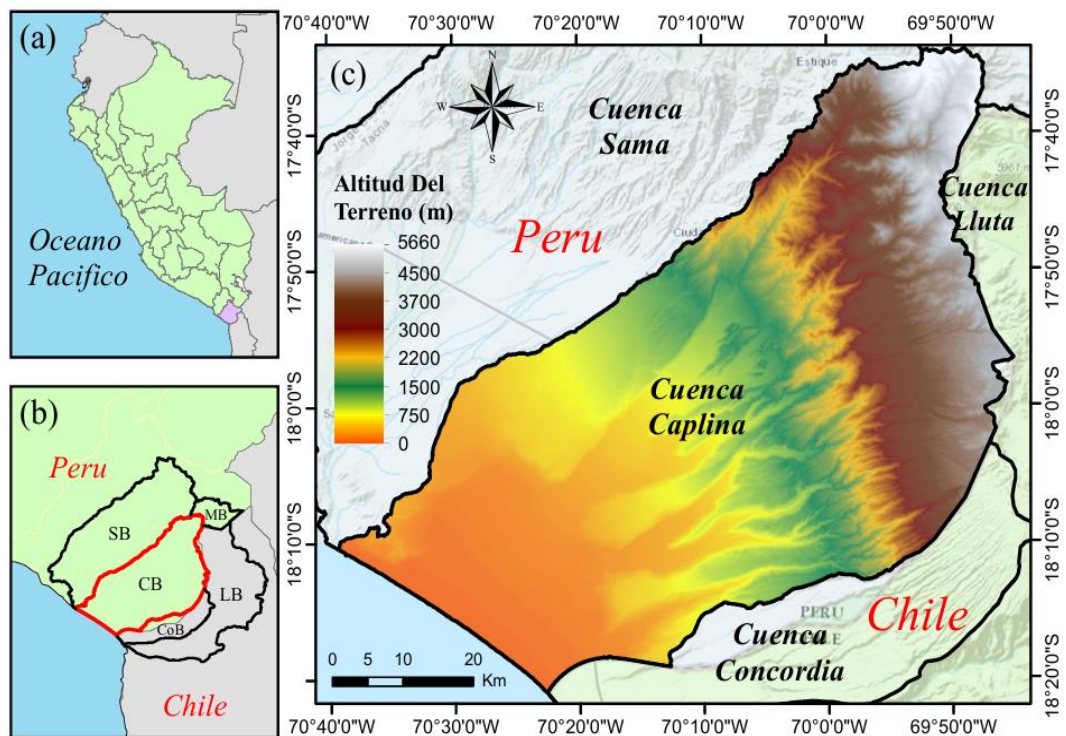
#### ***1.1.2. Clima***

Los institutos como el ANA, MINAM y diversos autores señalan que la cuenca Caplina se caracterizan por presentar un clima seco hiperárido con poca o nula precipitación (Houston y Hartley, 2003; MINAM, 2014; ANA, 2017). Esta presenta dos tipos de clima según su ubicación: un clima cálido-templado, desértico, con una amplitud térmica moderada en las zonas cercanas a la costa y un clima frío-húmedo en las partes altas de la cuenca (Peña et al., 2009; Machaca et al., 2022 y Condori et al., 2022). Adicionalmente, de acuerdo a los estudios del SENAMHI, señala que el clima más presente dentro del área de estudio es árido, con deficiencia de humedad todo el año, y templado; que se encuentra en una extensa franja entre el litoral y los 2 500 msnm. Siguiendo entre las cotas 2500 y

4000 msnm, se encuentra un clima es semiárido, sin humedad en invierno y primavera; varía entre frío y semifrío. Y, en altitudes superiores a 4500 msnm, el clima es lluvioso y frío, con invierno seco. En el distrito de Tacna, el clima es árido y templado, donde la temperatura máxima oscila entre 21°C en julio y 29°C en febrero, y la temperatura mínima, entre 10°C en julio y 17°C en febrero. La precipitación anual es de 34 mm, con acumulados de hasta 6 mm mensuales en los meses de enero, agosto y setiembre.

### Figura 1

*Ubicación del área del proyecto*



*Nota.* Ubicación y cuencas aledañas del área de estudio, Cuenca Caplina (mapa de altitudes).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### ***1.2.1. Problema principal***

La presencia de un clima seco y árido a hiperárido en la cuenca Caplina característica de nuestra área de estudio ha llevado a través de los años a una escasez de agua aprovechable para el consumo de la ciudad de Tacna. Esta situación, en conjunto con problemas de gestión y administración de recursos hídricos, lleva a la necesidad de proponer la realización proyectos sobre el agua subterránea disponible para el consumo humano. La limitada capacidad de producción de proyectos efectuadas por las autoridades respectivas en búsqueda de agua subterránea, lleva a ejecutar trabajos de perforación ilegales en la cuenca Caplina. Ello da lugar a proponer estudios diversos en la prospección de agua, por ese motivo la metodología propuesta en esta tesis usa métodos de teledetección con sensores remotos ópticos pasivos, en conjunto con softwares especializados en el campo de Sistemas de Información Geográfica como son ArcGIS y QGIS, para poder analizar las condiciones no favorables que presenta nuestra cuenca Caplina.

Según lo abordado nace la pregunta: ¿Cuáles serán los indicadores potenciales posibles de agua subterránea en la cuenca Caplina?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

La presencia de distintos parámetros indica la posible localización e identificación de los potenciales de agua subterránea, tales como la litología, geomorfología, tipo de suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamientos estructurales, pendiente, cobertura y uso de suelo (LU/LC), precipitación acumulada y NDVI; requieren definir una jerarquía en base a su importancia entre

estas. Así, el método AHP permite asignar valores de importancia entre la diversidad de parámetros a analizar, de esta forma, se plantean las siguientes interrogantes:

- ¿Qué parámetros presentarán mayor influencia en la determinación del potencial de aguas subterráneas en la cuenca Caplina?
- ¿La combinación de la técnica AHP con análisis de sensores remotos para predecir zonas de potencial prospectables de agua subterránea, mostrarán una validación confiable para la gestión de recursos hídricos en regiones áridas?

### **1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### ***1.3.1. Objetivo principal***

Identificar y localizar zonas potenciales prospectables de agua subterránea utilizando sensores remotos para la toma de decisiones multicriterio.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Determinar qué parámetros son más importantes en la prospección de agua subterránea en la cuenca Caplina.
- Validar los resultados y realizar el cruzamiento de datos aplicando la metodología ROC de evaluación de la precisión y confiabilidad del modelo.

### **1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

Las cualidades de AHP, como método de trabajo, en conjunto con softwares especializados como ArcGIS y QGIS, permitirán la ayuda de identificación de zonas potenciales prospectables de aguas subterráneas. Que muestre resultados

positivos en la validación con las estadísticas y datos utilizados. De esta forma, la técnica AHP sería adecuada para una evaluación preliminar la consistencia de los resultados, con los parámetros que estamos utilizando.

El uso de datos satelitales, como es el caso de sensores remotos pasivos, permitirá la obtención de distintos parámetros que indiquen la posible identificación de aguas subterráneas. En este sentido, la implementación de información satelital será capaz de proporcionar información detallada y adaptable en áreas de estudio de grandes dimensiones.

Los métodos de validación, específicamente la curva Receiver Operating Characteristic (ROC), permitirán la comprobación de la eficacia y confiabilidad del modelo de agua subterránea. De igual modo, los resultados obtenidos mostraran una asociación favorable con la información existente en la zona de estudio.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

Uno de los problemas más notables en la zona de interés del desierto de Atacama dado a sus condiciones de clima desértico hiperárido, es la baja o casi nula ocurrencia de lluvias, lo que genera escasez de agua superficial y subterránea para los diferentes usuarios de la región. Por lo tanto, la tarea de realizar nuevos estudios hidrogeológicos de exploración de zonas potenciales de aguas subterráneas (GWPZs) es importante para los tomadores de decisiones en recursos hídricos.

Por otro lado, en la cuenca Caplina, se realizaron varios estudios de monitoreo de la calidad del agua (Vera et al., 2021; Narvaez et al., 2022 y Chucuya et al., 2022). Estas investigaciones buscaron analizar las características hidrodinámicas, hidroquímicas e hidrogeoquímicas para definir el comportamiento

y factores presentes en el acuífero Caplina, el cual es un soporte vital para la gestión del recurso hídrico para los habitantes de las zonas. Sin embargo, estos estudios no se enfocaron en delimitar la extensión y volumen de las aguas subterráneas a nivel de cuenca, ni aplicaron la tecnología de sensores remotos como método de exploración e investigación.

La incorporación de múltiples datos, tales como la recuperación, adquisición y generación de información, como imágenes satelitales multitemporales, mapas, tablas y otros datos in situ, proporciona la información de referencia para establecer la base de datos necesaria para analizar las aguas subterráneas accesibles para científicos, investigadores y partes interesadas. Uno de los métodos predominantes y confiables para identificar la precisión del agua subterránea es usar una combinación de sensores remotos, GIS y AHP (Saaty, 1980).

Así, el beneficio del estudio es proponer un modelo para identificar y zonificar el potencial de las aguas subterráneas, basado en la metodología AHP-GIS y validar los resultados obtenidos a través de la información de los pozos existentes, ofreciendo así una investigación para el servicio de la sociedad que ayude a disminuir los problemas de localización del agua subterránea en la cuenca Caplina.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

##### 2.1.1. *Geología*

La geología como campo de estudio abarca parámetros importantes, tales como litología, la geología estructural, los aspectos geomorfológicos, entre otros. Estos parámetros geológicos desarrollan un rol fundamental en el desarrollo y ubicación de sistemas de agua superficiales y subterránea, la descripción de las diferentes litologías presentes en la cuenca Caplina juegan un rol importante gracias a las características favorables para la infiltración, tales como la porosidad y permeabilidad (figura 2 y 3). La información de geología recolectada ha sido obtenida gracias al estudio realizado por J. Wilson y W. García en 1962 de la Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca; entre otros autores que han estudiado la geología en esta región.

A fin de establecer una clasificación para nuestro estudio, se le ha asignado una puntuación entre el 1 al 5. Esta puntuación permite evaluar las capacidades de permeabilidad y porosidad de cada formación:

##### **Descripción litológica.**

- Complejo Basal de la Costa

El Complejo Basal de la Costa aflora cerca del km. 60 de la carretera Tacna-Tarata (Wilson y Garcia, 1962) como una faja angosta de gneis, que son las rocas

más antiguas de la región y se colocan en la base de la columna estratigráfica. Fuera de esta faja de 12 km. de largo por uno de ancho, no se ha encontrado gneis en otros lugares. En esta localidad, el gneis pasa por el lado Oeste debajo de sedimentos elásticos de la formación Machani, mientras que por el lado Este la unidad está cortada en casi todo su largo por una intrusión granodiorítica. Desde el punto de vista geomecánica, esta roca posee características impermeables y no porosas, no favorables para el almacenamiento de agua subterránea dentro de esta.

- Formación Machani

Descrito por Wilson y Gacia en 1962, se ha dado el nombre de Formación Machani a una secuencia de areniscas, conglomerados y lutitas negras en atención a su afloramiento mayor en el Cerro Machani. La formación está por encima al gneis del Precambriano, con discordancia angular y se encuentra subyacente a los volcánicos de la formación Junerata. La formación Machani consiste mayormente en areniscas de diferentes tipos, el tipo más común es la arenisca parda. Desde el punto de vista geomecánica, esta roca posee un grado medio de permeabilidad y porosidad.

- Formación Junerata (Ji-ju)

La Formación Junerata presenta sus afloramientos ubicados en la parte central de la cuenca del río Caplina, y se presenta como la base de toda la pila sedimentaria. La Formación Junerata sobre yace al Grupo Ambo e infra yace en contacto erosivo a la Formación Pelado. Litológicamente esta comprende de una serie de coladas basálticas que en algunos niveles se encuentran ínter estratificadas con bancos de sedimentos. Desde el punto de vista geomecánica, la formación

Junerata presenta una puntuación media con respecto a sus grados de permeabilidad y porosidad.

- Formación Pelado (Ji-pe)

La Formación Pelado litológicamente consiste de conglomerados con clastos de roca volcánica, seguido por lutitas y calizas fosilíferas gris oscuro. Esta formación se encuentra sobre yaciendo a las rocas volcánicas de la Formación Junerata en evidente contacto erosivo. El contacto de esta unidad con la suprayacente Formación San Francisco es también erosivo, demostrado por la presencia de clastos de roca calcárea perteneciente a la Formación Pelado dentro de los sedimentos de la Formación San Francisco. Desde el punto de vista geomecánica, gracias a su litología permeable y porosa de calizas tiene una puntuación alta.

- Grupo Yura

El Grupo Yura es bien conocido regionalmente en el sur del Perú; pero, localmente, está definido por las siguientes formaciones:

- Formación San Francisco (Jm-sf): Wilson y García (1962) definen a la Formación San Francisco que consisten de algunos centenares de metros de areniscas, lutitas y calizas. La Formación San Francisco supra yace a la Formación Pelado con un contacto erosivo, e infra yace a la Formación Ataspaca. Desde el punto de vista geomecánica, tiene una buena porosidad y la presencia de lutita le da cierta impermeabilidad.

➤ Formación Ataspaca (Js-a): La Formación Ataspaca ha sido definida por Wilson y García (1962), ubicado en la quebrada Chachacumane, donde describieron areniscas pardas, lutitas oscuras y calizas grisáceas, ínter estratificadas en capas delgadas. La Formación Ataspaca supra yace a la Formación San Francisco e infra yace a la Formación Chachacumane. Ambos contactos son concordantes y transicionales. Desde el punto de vista geomecánica, tiene una buena porosidad y la presencia de lutita le da cierta impermeabilidad.

- Formación Chulluncane (Ki-chu)

La Formación Chulluncane (Wilson y Garcia, 1962) consiste de areniscas grises, conglomerados compactos y derrames volcánicos basálticos a andesíticos. Se encuentra aflorando en el cerro Chulluncane, extendiéndose hasta el cerro Pantatire. El contacto inferior y superior está en discordancia angular con la Formación Chachacumane y los volcánicos de la Formación Huilacollo respectivamente. Desde el punto de vista geomecánica, esta formación posee muy buena permeabilidad y porosidad.

- Formación Toquepala (Kp-to)

Teniendo su nombre por los estudios realizados en una sección considerada típica, y que se ubica en el centro minero de Toquepala. Litológicamente, se caracteriza por presentar, hacia la base secuencia de lavas andesíticas (Monge y Cervantes, 2000). Se trata de rocas porfíricas, poco estratificadas, de color gris con intercalación de tobas. Esta unidad aflora en las quebradas Viñani, Cobani, Challapujio, Vilavilani, Chero, en la quebrada Caplina, en el cerro Junerata y en el

cerro Ancocalani. Desde el punto de vista geomecánica, esta formación posee características volcánicas que le dan un grado medio de permeabilidad y porosidad.

- Formación Tarata (Pe-ta)

Wilson y García (1962) levantaron la columna estratigráfica entre el poblado de Palquilla y el sinclinal de Jacnone al este de Palquilla. Litológicamente, consiste de una secuencia vulcano-sedimentaria, conformada por tobas gris clara bien compactada con presencia de cuarzo, biotita y pómez, intercalada con areniscas tobáceas de colores abigarrados en capas delgadas, niveles de conglomerados y areniscas con estratificación cruzada y un nivel delgado de calizas micrítica. Desde el punto de vista geomecánica, esta formación posee características volcánicas que le dan un grado medio de permeabilidad y porosidad.

- Formación Hualicollo (Po-hui)

La Formación Hualicollo es descrita como intercalaciones de brechas andesíticas, tobas dacíticas y riódacíticas con buena estratificación, algunos niveles se les puede considerar como areniscas tobáceas, los que infrayacen ligeramente y disconforme a la Formación Huaylillas. Su afloramiento típico se localiza en el cerro Huilacollo y en los cerros adyacentes como Cabacollo, Andamarca, Llaullacane, Quilla, Checocolloy cerro Tabañune. Desde el punto de vista geomecánica, esta formación posee características volcánicas que le dan un grado medio de permeabilidad y porosidad.

- Grupo Moquegua (Po-mo)

El Grupo Moquegua se caracteriza por poseer dos grandes formaciones presentes dentro de la cuenca Caplina, la Formación Moquegua Inferior y la Formación Moquegua Superior:

- Formación Moquegua Inferior: La Formación Moquegua Inferior se caracteriza por ser endorreica, es evaporítica, no tiene comunicación con el exterior, se va evaporando y se forman las sales, calcáreos/carbonatados en primera base, sulfatos en segunda base y cloruros en última fase. Con intercalación de areniscas, lutitas, riolitas. Fue descrito por Adams (1906) para una secuencia de capas continentales, compuestas por arcillas, areniscas, conglomerados, areniscas tufáceas y tufos de color rojizo a blanco amarillento, que afloran típicamente en el valle de Moquegua y en las partes bajas de la mina Toquepala. Se encuentra compuesto por una sucesión de depósitos detríticos que muestra en su mitad superior un nítido estrato con creencia de grano. Desde el punto geomecánica, son muy solubles al agua, hay una buena permeabilidad.
- Formación Moquegua Superior: La Formación Moquegua Superior se encuentra conformada principalmente por materiales detríticos, principalmente conglomerados que disminuyen en tamaño de grano hacia el suroeste. En las zonas proximales, se compone de una sucesión de conglomerados polimicticos con pequeños lentes de areniscas; mientras en las zonas dístales predominan las intercalaciones de areniscas y lentes de limolitas, con algunos

canales conglomerádicos. Desde el punto geomecánica, esta formación es una de las más capaces para el almacenamiento gracias al tamaño de sus granos otorgándole una buena porosidad y permeabilidad, pero cuando hay niveles muy finos la permeabilidad baja.

- Formación Huaylillas (Nm-hu)

La Formación Huaylillas (Wilson y Garcia, 1962) tiene una gran presencia en diversas partes de la región de Tacna. Se observa supra yaciendo a la Formación Moquegua superior y en discordancia con estratos Mesozoicos, en la región noreste. El miembro inferior está compuesto por tobas rosáceas con abundantes fragmentos de líticos y fragmentos de pómez. El miembro superior comprende una sucesión de tobas riolíticas y riolíticas, de color rosáceo, con fragmentos de pómez y líticos, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde. La Formación Huaylillas es de características ignimbritas, una ignimbrita es una lava incandescente muy acida que se expande muy rápido que cubre todo. Esto le otorga una alta porosidad y fuertemente permeables en este estudio.

- Depósitos de Piedemonte

Wilson (1962) describe que las pampas costaneras de la zona Sur consisten en depósitos de Piedemonte que se encuentran en el área sur occidental del cuadrángulo de Pachía, inclinados suavemente hacia el SO. Los cortes de la Carretera Panamericana entre Tacna y Sama nos presentan a estos depósitos que consisten en conglomerados, grava y arena con litología parecida a los de las terrazas fluviales. Es bastante común encontrar intercalaciones de ceniza volcánica

retrabajada cerca al tope de la unidad. Desde el punto de vista geomecánica, al rellenar los valles, poseen un alto grado de permeabilidad y porosidad por sus características sedimentarias.

- Formación Barroso (Nq-ba)

La Cordillera del Barroso se ubica en la parte norte de la zona de estudio, está formada por un complejo volcánico al cual se ha dado el nombre de Formación Barroso (Wilson y García, 1962). La Formación Barroso consiste en bancos bien definidos de tufos y lavas de composición traquítica, con cantidades menores de andesita. Típicamente, la roca es una traquita grisácea con fenocristales de sanidina y cristales microscópicos de biotita. Desde el punto de vista geomecánica, esta formación posee características volcánicas que le dan un grado medio de permeabilidad y porosidad.

- Depósitos fluvioglaciares (Qh-fg)

Wilson (1962) describe a estos depósitos por su amplia distribución característica en la zona del altiplano; al oeste, sobre yacen a los volcánicos Huilacollo y, hacia el noreste, a los volcánicos del grupo Tacaza, formando planicies suavemente onduladas. Su litología está compuesta de bloques polimícticos volcánicos mal clasificados, en una matriz de grava y arena. Desde el punto de vista geomecánica, estos depósitos poseen la más alta capacidad de permeabilidad y porosidad por su reciente depositación y ubicación.

- Depósitos aluviales (Qh-al)

Los depósitos aluviales presentan una morfología suave de lomadas que forman especies de anfiteatros con escarpas muy altas y casi verticales; la mayor parte de estos depósitos se han formado por derrumbes de la Formación Moquegua. Su litología se encuentra compuesta por bloques muy grandes de tobas riolíticas y diversos bloques mezclados en forma caótica con una matriz de arenas y limos provenientes del mismo material (Acosta et al., 2012). Estos depósitos aluviales forman pequeñas terrazas, las cuales son usadas como terrenos agrícolas por los pobladores de la zona. Desde el punto de vista geomecánica, estos depósitos poseen la más alta capacidad de permeabilidad y porosidad por su reciente depositación y ubicación.

- Intrusivo Yarabamba (Kp-ya)

El intrusivo Yarabamba aflora extensamente entre las quebradas Palca y Vilavilani. En la hoja de Pachia, al Sur, está un pequeño plutón en la quebrada Cobani; compuesto esencialmente por granodioritas, monzodioritas y dioritas, que intruyen a las formaciones Junerata y Pelado. Litológicamente, están compuestas de plagioclasas, ortosa (dándole un ligero tono rosáceo), cuarzo biotita y horblenda, son de color gris claro, grano grueso, de textura holocristalina, inequigranular hipidiomórfica (Clark et al., 1990). Desde el punto de vista geomecánica, las rocas ígneas poseen una baja permeabilidad y porosidad, no obstante, al encontrarse fisuradas por el accionar de los sistemas de fallas presentes en el sur del Perú, les da una capacidad de permeabilidad secundaria permitiendo el paso de las aguas subterráneas por medio de sus fracturas.

- Intrusivo Challaviento (Pe-cha)

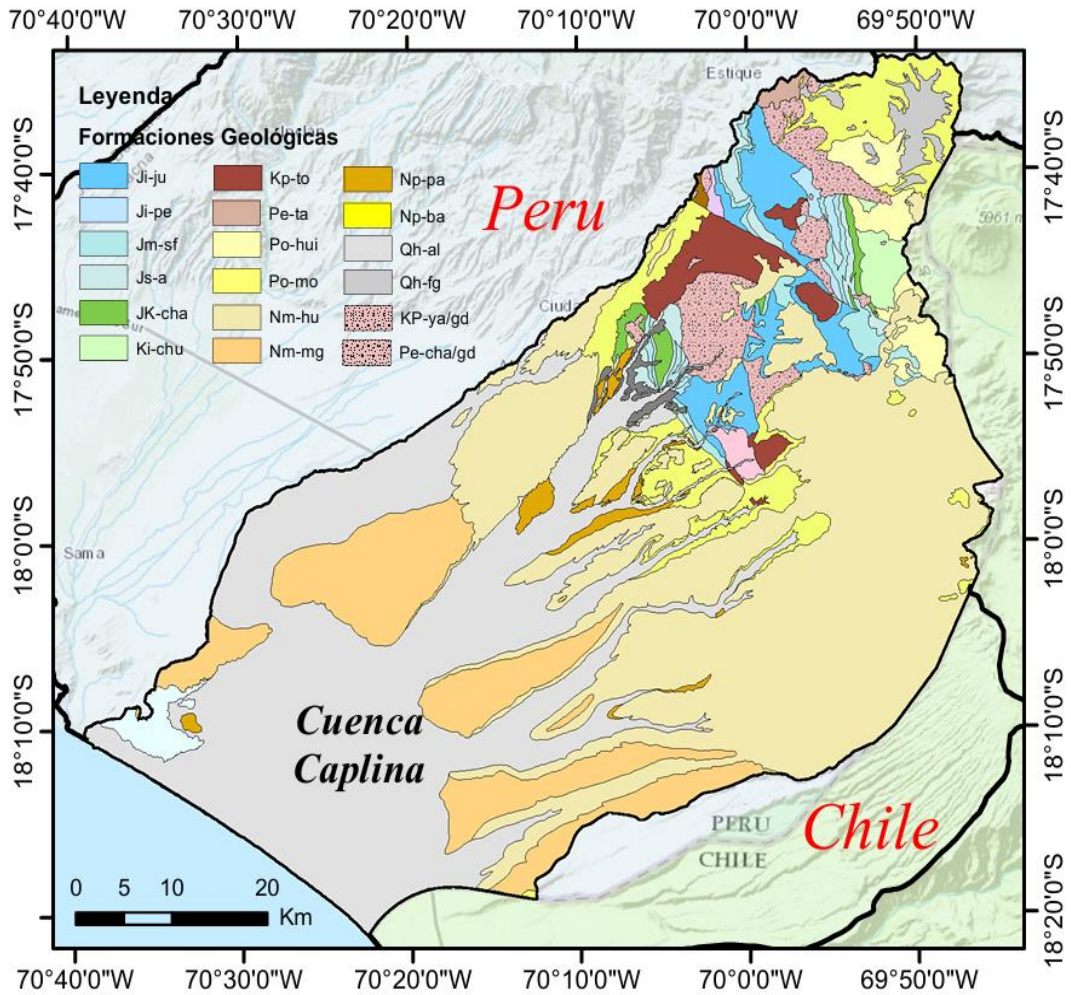
Se extiende desde los alrededores del poblado de Vilavilane hasta unos 4 kilómetros al noroeste del poblado de Ticaco. Alcanza una longitud aproximada de 45 kilómetros. En los plutones de Challaviento y de Ataspaca, se registran facies granodioríticas y monzodioríticas, mientras que en Chulpapalca y los pequeños intrusivos presentan facies granodioríticas. Estas rocas plutónicas son de color gris claro y el tamaño de grano varía de grueso a medio (Monge y Cervantes, 2000). Desde el punto de vista geomecánica, las rocas ígneas poseen una baja permeabilidad y porosidad, no obstante, al encontrarse fisuradas por el accionar de los sistemas de fallas presentes en el sur del Perú, les da una capacidad de permeabilidad secundaria permitiendo el paso de las aguas subterráneas por medio de sus fracturas.

**Columna estratigráfica.** La siguiente columna estratigráfica representa las formaciones presentes dentro de la cuenca Caplina comprendiendo los periodos del Terciario y Cuaternario. Ambos periodos mencionados son de gran importancia para el área de estudio, pues aquí se encuentran las formaciones más competentes gracias a la permeabilidad y porosidad analizada.



**Figura 3**

*Mapa geológico de la cuenca Caplina*



*Nota.* Escala 1:50000, adaptado del INGEMMET (2011)

### **2.1.2. Geomorfología**

Los aspectos geomorfológicos en la zona de estudio exhiben una relación con las diversas formaciones geológicas previamente descritas; de igual manera, el estudio de la geomorfología de la cuenca Caplina puede indicar el posible potencial favorable de aguas subterráneas. Las unidades geomorfológicas descritas han sido

basadas a partir de estudios realizados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (tabla 1).

- Cordillera

La cordillera se encuentra ubicada al noreste, en la cabecera de la cuenca Caplina. Esta cordillera presenta elevaciones entre los 4 500 y 5 600 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por presentar pendientes de alta inclinación.

- Altiplanicie

Las altiplanicies se ubican entre unos 3 800 y 4 500 metros sobre el nivel del mar y se encuentran caracterizadas por presentar zonas planas en altura. El relieve general varía de ondulado a moderadamente escarpado, posiblemente como consecuencia de la erosión y/o tectónica que afectaron este paisaje. Las planicies mencionadas se caracterizan por presentar una escasa vegetación compuesta en la cuenca Caplina.

- Flancos disectados

Los Flancos Disectados presentan una morfología muy accidentada originada por la actividad tectónica y la erosión de los ríos. Predominan las laderas de alta pendiente, entre unos 10 % a 15 %, por lo que las escorrentías son rápidas y en algunos lugares presentan saltos de agua. Se encuentran entre los 1 400 y 3 800 metros sobre el nivel del mar.

- Pampas Costanera

La Pampa Costanera ha sido formada a causa de la acción de los ríos Caplina, Uchusuma y las quebradas menores. Estas han provocado la erosión en los bordes de terrenos horizontales amplios, quedando así una morfología como zonas aisladas y elevadas a manera de lomas alargadas, con un perfil transversal casi trapezoidal. Las cumbres son planas y mantienen una altura constante con pendientes entre 2 a 2,5 %. Presentan una dirección noreste a suroeste y se encuentran entre 200 y 1 400 metros sobre el nivel del mar.

- Cadena costera

La Cadena Costera se encuentra emplazada paralelamente a la línea de costa y comprende los cerros La Yarada y La Morena, con una altura máxima de 300 msnm. La Cadena Costera presenta un comportamiento como estructura condicionante de almacenamiento de aguas subterráneas.

- Piso de valle

El piso de valle comprende los depósitos de origen fluvial dejados por el paso de los ríos Caplina y Uchusuma, y por una serie de quebradas menores. Los valles naturalmente se encuentran erosionados debido a la erosión evidente de los ríos. Por lo general, presentan pendientes de 1 a 2,5 % y su altitud tiene una variación de 0 a 1 400 msnm.

**Tabla 1***Parámetros geomorfológicos de la cuenca Caplina*

<b>Parámetros Geomorfológicos</b>	<b>Datos</b>
Área total de la cuenca	4230 km <sup>2</sup>
Perímetro de la cuenca	329 km
Elevación media	1820 msnm
Coefficiente de compacidad	1,42
Factor de forma	0,27
Densidad de drenaje	1,83 km/km <sup>2</sup>
Pendiente media de la cuenca	25,91 %

**2.1.3. Geología estructural**

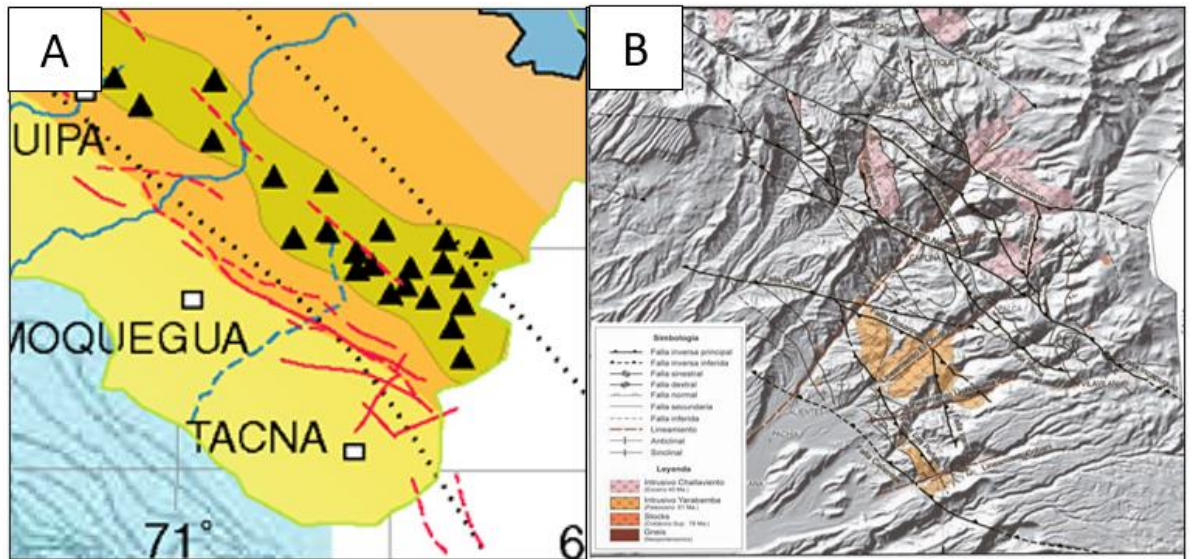
La geología estructural, como subrama de la geología, comprende una serie de rasgos que posibilitan un ideal almacenamiento de agua subterránea. A partir del trabajo de Wilson y García en 1962, se muestra como las rocas antiguas forman grandes bloques delimitados por un sistema bien definido de fallas y están cubiertas por rocas del Mioceno al Cuaternario que no han sufrido mayor deformación estructural. La dirección de buzamiento de las formaciones es constante dentro de un bloque y hay poco desarrollo de pliegues. De igual forma, las secuencias mesozoicas y las cenozoicas están afectadas por sistemas de fallas de orientación preferente noroeste sureste y lineamientos de dirección noreste suroeste.

**Sistemas de fallas Incapuquio.** El dominio del sistema de fallas Incapuquio (o también llamado como sistema de fallas de Piedemonte) es muy amplio y bastante complejo, puesto que contiene fallas activas e inactivas a lo largo de su historia geológica (figura 4). Wilson (1962) describe a este sistema de fallas Incapuquio localizándose al norte de Palca y es la prolongación del sistema de fallas

Incapuquio en los cuadrángulos de Moquegua y Tarata, cuyas estructuras principales tienen rumbo N 50°-60°O. El sistema de fallas Incapuquio limita 3 grandes estructuras geomorfoestructurales (figura 4), primero se tiene en amarillo al entorno de Piedemonte, esto separa del inicio de la zona batolítica donde se desarrolla la actividad minera de color anaranjado, y finalmente se tiene a la cordillera volcánica que se tiene dentro de Tacna comprendida de color mostaza. Este sistema de fallas ha funcionado del Terciario a todo el Cenozoico y que aún sigue funcionando, por lo tanto, a este sistema se le va ligar todo un sistema paralelo de fallas, microfallas y estructuras de fracturación muy densa que siguen desarrollándose dentro del área de estudio.

**Figura 4**

*Sistema de fallas Incapuquio en el sur del Perú*



*Nota.* (A) Vista regional y (B) Vista local

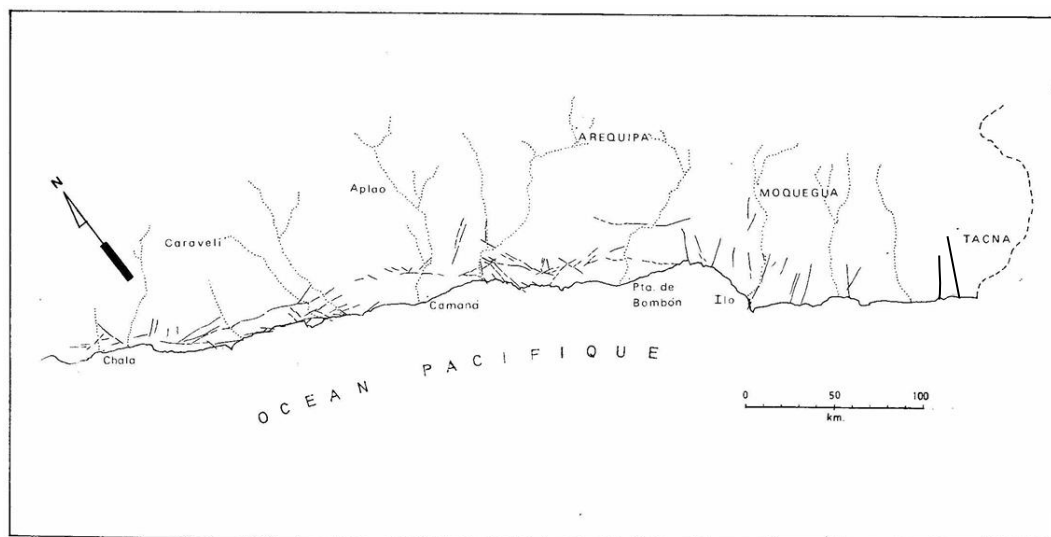
- Falla Challaviento: La falla Challaviento, en su recorrido por el cuadrángulo de Pachía, afecta rocas del Jurásico y Cretácico que están ubicadas entre la quebrada Chero y cerro Chari al noreste del cuadrángulo de Pachía (Acosta et al., 2010). Esta falla se entrelaza con la falla Incapuquio en el sector de Huacano Chico, configurando estructuras con dirección promedio E-O.
- Falla Incapuquio: Se considera como falla Incapuquio a una asociación de fallas de proporciones notables que en sí se encuentran alineadas o describen una cierta direccionalidad continua. Wilson (1962) observó cabalgamientos de rocas de edades entre Paleozoicas y Jurásicas sobre rocas de edad Cretácica y Terciaria. Se considera a esta falla como el trazo principal del gran sistema de fallas Incapuquio debido a que corresponde el límite de afloramientos de rocas del Grupo Maure ubicadas hacia el noreste y las rocas de la Formación Moquegua Superior cuyos afloramientos están restringidos hacia el suroeste.
- Falla Calientes  
Esta falla es de mucha importancia y de extensión regional; recorre la parte sureste y suroeste del cuadrángulo de Pachía y la parte suroeste del cuadrángulo de Palca. Su dirección promedio en lo extenso de su recorrido es NO-SE (Acosta et al., 2012). Es de tipo inverso con componente sinistral, con buzamiento de 65° a 68° al este. La falla Calientes se considera activa por estar relacionada a

movimientos sísmicos además de afectar sedimentos aluviales del Holoceno.

**Sistema de fallas teclas de piano.** Descritas inicialmente por Bellido y Guevara en 1963 como fallas transversales. Constituyen un sistema de fallas de rumbo general NE-SW, son transversales a la Cadena Costanera y en consecuencia casi perpendiculares al litoral (figura 5). Este sistema de fallas aparentemente de tipo normal, producen un desplazamiento en bloques del área. La forma ligeramente escalonada de las diversas pampas de la costa del Perú es el efecto de dicho fallamiento. No se tiene buenas evidencias para determinar el tipo de fallamiento, pero considerando el desplazamiento en bloques, el fuerte empinamiento de las escarpas y su agrupación más o menos paralela, se consideran como fallas normales.

### Figura 5

*Sistema de fallas teclas de piano en el sur del Perú*



*Nota.* Adaptado de Bellido y Guevara, 1963

#### **2.1.4. Hidrología – hidrogeología**

El análisis de la geología, geomorfología y geología estructural previamente descrito, es un indicador clave para entender la hidrogeología de la cuenca Caplina. El área de estudio se encuentra fuertemente controlado por el accionar de sistemas de fallas profundas, este aspecto es una posible teoría que explique el recorrido de las aguas subterráneas desde la cordillera occidental hasta las planicies costaneras donde se desarrolla la mayor explotación actual de los recursos hídricos en agricultura. Adicionalmente la geología del subsuelo comprende de formaciones de carácter sedimentario y flujos piroclásticos. Estas litologías de favorable carácter permeable y poroso, en conjunto con la geomorfología de pendiente suave que es el piso de valle, pueden señalarnos la posible ubicación de un alto potencial de agua subterránea.

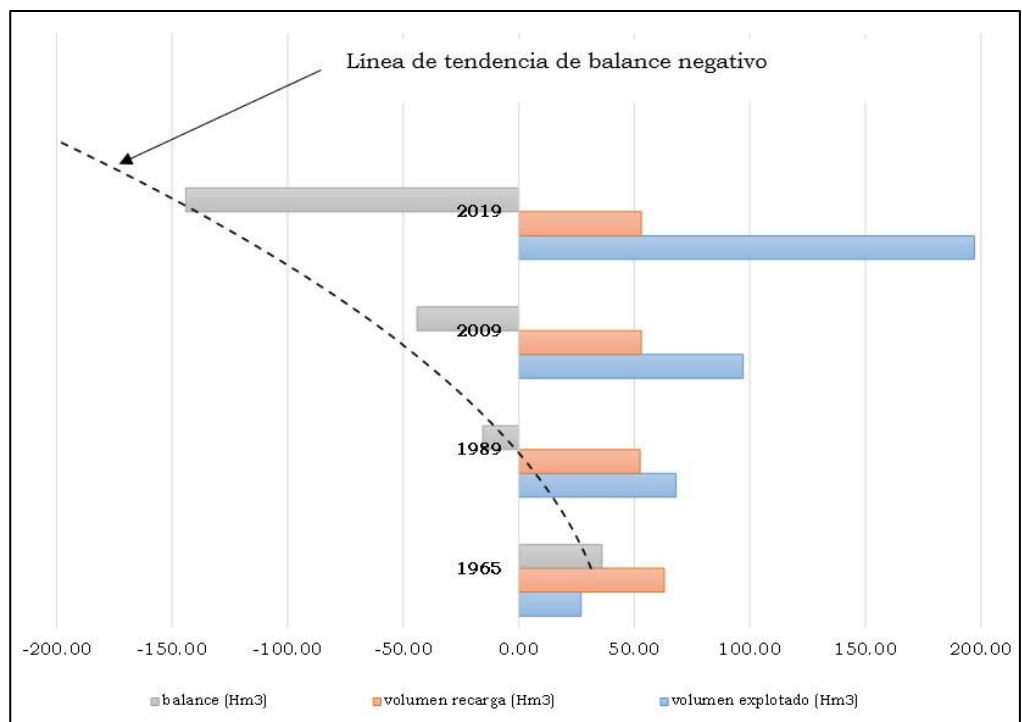
Del punto de vista hidrográfico, la cuenca Caplina se encuentra comprendida entre las localidades de Pachía y Tacna, presenta una forma de un polígono rectangular de fondo plano y con flancos escarpados. Aguas abajo, el cono deyectivo del río Caplina constituye una unidad fisiográfica que se inicia en la garganta de Magollo y se ensancha progresivamente hacia abajo en forma de delta hasta alcanzar la línea de playa. La tasa de recarga por precipitaciones en la cuenca Caplina resulta muy escasa hace varias décadas (Motta-Zamulloa, 1990). Análogamente, debido al clima árido que somete una cuenca hidrográfica, trae consigo un régimen lento de recarga (Foster et al., 2003); por lo que, es el estudio de la recarga hídrica al igual que las características hidrológicas de la cuenca es fundamental para el desarrollo sostenible del agua. Las condiciones de recarga y variación de flujo superficial se encuentran influenciadas por la topografía,

pendiente, área de drenaje, precipitación, temperatura, evapotranspiración, porcentaje de arena en el suelo y el tipo de uso de la tierra (Zomlot et al., 2015).

La napa contenida en el acuífero se encuentra en discusión, estando en debate si es confinada o fosilizada, presenta como fuentes principales de alimentación, las filtraciones de agua que se producen en el río Caplina, canal Uchusuma y los aportes de agua según ocurrencia de lluvias de las quebradas de Palca, Vilavilani, Viñani, Cauñani, Espíritus y quebrada. Honda, que discurren e infiltran en el valle y las pampas de La Yarada. Por otro lado, se tiene infiltración de agua que se produce en la zona de precipitaciones correspondientes a las partes altas de la cuenca; a través de fracturas o fallas, que posiblemente pasan posteriormente a los materiales clásticos de los depósitos cuaternarios.

### Figura 6

*Evolución de la línea de tendencia de balance frente al volumen de recarga*



Nota. Pino (2023)

La figura 6 describe cómo el sistema del acuífero Caplina seguirá siendo insostenible durante los próximos 20 años, independientemente de los escenarios de explotación que se impongan, y se sugiere que cualquier medida de mitigación requiera de la participación de los actores interesados (Narvaez et al., 2022; Pino et al., 2023). Este gráfico indica una línea de tendencia negativa con respecto al contraste entre el volumen de recarga y el volumen explotado, a partir del análisis recopilatorio de reportes por entidades como el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Minero (INIFM); en 1989, el Proyecto Especial Tacna (PET), adscrito al Instituto Nacional de Fomento (INADE); en 2009, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET); en 2019-2022, la Autoridad Nacional del Agua (ANA); muestran como la evolución del balance hídrico del acuífero Caplina ha ido en un alarmante decline entre los periodos 1965 a 2022 (figura 6).

## **2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Pino et al. (2017), en su investigación titulada *Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú*, examinaron parámetros geomorfológicos, geológicos, medio ambientales e hidrológicos para determinar con eficacia la calidad del agua en la cuenca Caplina. Donde lograron determinar entre sus resultados las fuentes con mayor influencia sobre la calidad del agua, siendo las geotermales Aruma y Paralocos que emanan aguas con alto contenido de Arsénico, Plomo y Sodio en concentraciones.

Vera et al. (2022), en su trabajo titulado *Metodología de ponderación morfométrica e hidrogeoquímica para clasificar la susceptibilidad a la*

*meteorización química en las subcuencas del río Caplina, Tacna, Perú*, buscaron estudiar la recarga hidrológica de una cuenca árida con meteorización química diferencial de formaciones geológicas en contacto debido a la salinización del flujo de agua. Determinando en su indagación acuíferos fisurados con alteración hidrotermal y acuitados intrusivos, que influyen en oxidación de sulfuros en la hidroquímica de la cuenca, a partir de las muestras recopiladas.

Rodas (2022), en su tesis titulada *Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina – Tacna*, se enfocó en evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca del río Caplina. La tesis planteó diversos modelos climáticos basándose en dos escenarios de emisión RCP4,5 y RCP8,5. Representative Concentration Pathways (RCP) hace referencia a posibles escenarios futuros de emisiones de aerosoles y gases de efecto invernadero. Sus resultados muestran que en todos los periodos futuros la disponibilidad hídrica tiene a disminuir, llevando a una relevancia de tomar medidas de gestión de recursos hídricos para la disponibilidad hídrica para la ciudad de Tacna.

## **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. Agua subterránea**

El agua subterránea es agua que existe bajo tierra en zonas saturadas inferior a la superficie terrestre. La superficie superior de la zona saturada se llama nivel freático. El agua en la zona saturada debajo del nivel freático se conoce como agua subterránea. El área saturada debajo del nivel freático se llama acuífero, y los acuíferos resultan ser enormes depósitos de agua acumulada (Percopo y Guerra,

2018). El agua subterránea se recarga mediante procesos naturales como la precipitación y el deshielo que se filtra a través del suelo y los acuíferos, así como mediante métodos artificiales como la inyección de agua a través de pozos, particularmente en el caso de los acuíferos profundos.

Un acuífero es una capa subterránea de roca o sedimento que contiene agua y que tiene la capacidad de producir agua. Es una formación geológica que almacena y transmite agua subterránea. Los acuíferos pueden estar formados por diferentes tipos de roca o sedimento, como arena, grava o roca fracturada, y varían en su capacidad para almacenar y transmitir agua. Los acuíferos son fuentes cruciales de agua dulce y desempeñan un papel vital en el apoyo a las actividades humanas, la agricultura y los ecosistemas (Salako y Adepelumi, 2017).

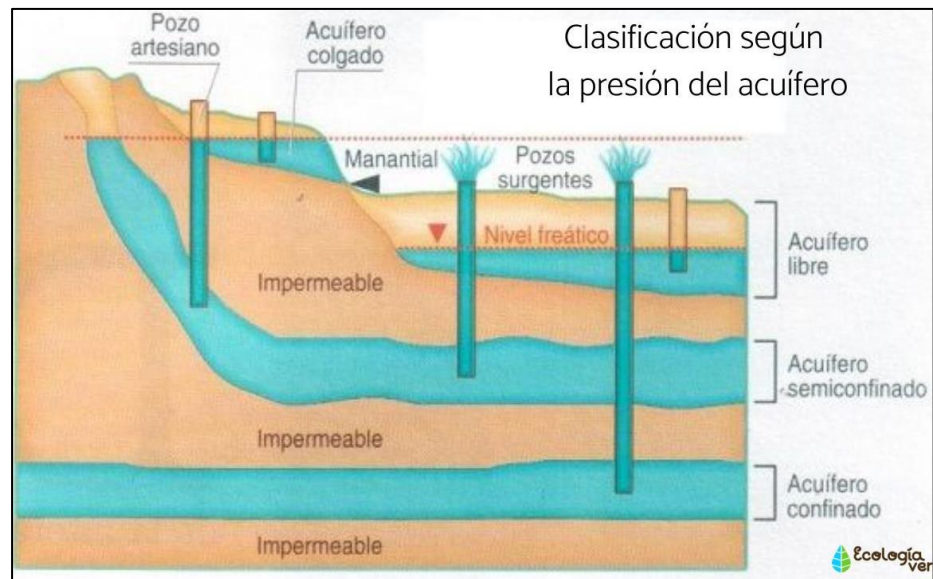
Los acuíferos dan lugar a tres tipos de clasificaciones (figura 7):

- **Acuífero libre:** Los acuíferos que están delimitados por una superficie libre, conocido como nivel freático, en el límite superior y una capa confinante en el límite inferior se denominan acuíferos libres. Los acuíferos libres reciben recarga directamente de la superficie suprayacente a través de la infiltración de lluvia o la percolación de cuerpos de agua superficiales.
- **Acuífero confinado:** Los acuíferos que están limitados tanto arriba como abajo por capas impermeables o semipermeables se denominan acuíferos confinados y el agua presente en estos acuíferos está bajo presión. Dado que el agua presente en un acuífero confinado está a una presión mayor que la presión atmosférica, el nivel del agua en un pozo que penetra se elevará por encima de la capa confinante superior del acuífero.

- Acuífero semiconfinado: Vienen a ser también acuíferos a presión, como los confinados descritos previamente; pero, a diferencia de que en estos acuíferos semiconfinados, existe una mayor permeabilidad.

**Figura 7**

*Clasificaciones de los acuíferos*



*Nota.* <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-acuiferos-3149>

### 2.3.2. *Sensores remotos*

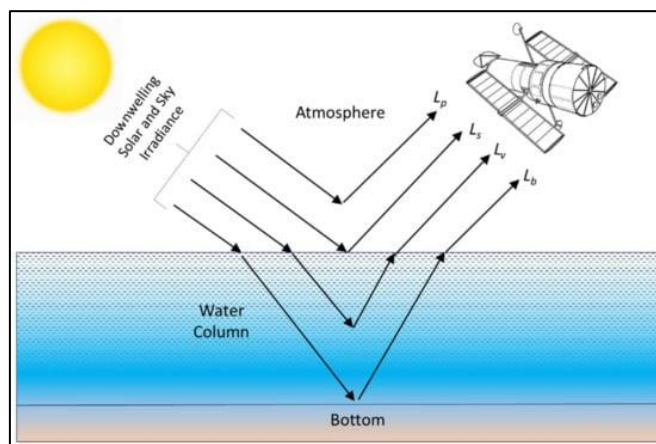
Los sensores remotos son instrumentos utilizados para registrar datos sobre un área o característica sin contacto físico. Estos sensores operan detectando y midiendo las características del objetivo desde una distancia y luego transmitiendo esos datos. La teledetección es el proceso de detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo su radiación reflejada y emitida a distancia (USGS, 2022).

En el contexto de las aguas subterráneas, el uso de tecnología de teledetección es crucial para monitorear y modelar la recarga y el flujo de aguas

subterráneas a diferentes escalas. Estos sensores proporcionan información valiosa para la gestión de recursos hídricos y la protección ambiental (figura 8). De este modo, la tecnología ayuda a comprender los procesos involucrados en la recarga y el flujo de aguas subterráneas, que están influenciados por el clima, la geología y la topografía (National Academies, 2019).

### Figura 8

*Aplicación de los sensores remotos para la calidad del agua*



*Nota.* Jensen (2006)

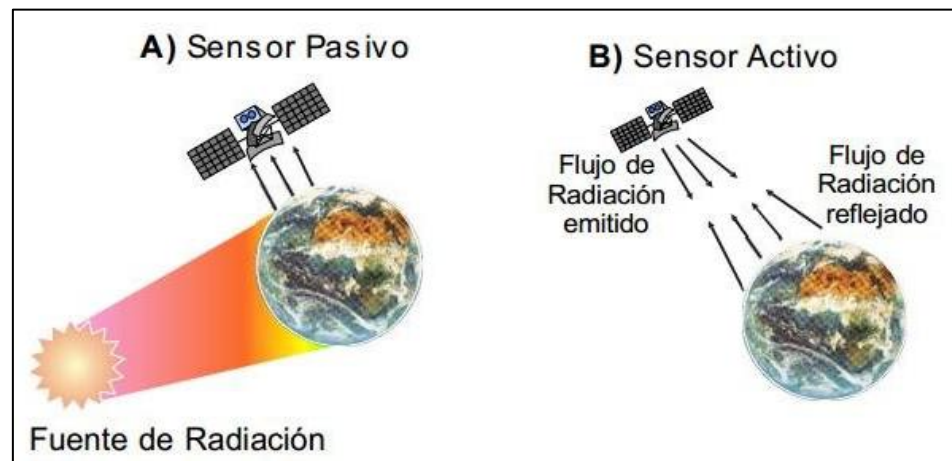
Los sensores remotos se clasifican en (figura 9):

- **Sensores activos:** Los sensores activos en la teledetección dirige su señal al objeto y luego verifica la respuesta, que vendría a ser la cantidad recibida. La mayoría de los dispositivos emplean microondas ya que son relativamente inmunes a las condiciones climáticas. Las técnicas de teledetección activa se diferencian por lo que transmiten, luz u ondas, y lo que vienen a determinar, por ejemplo, distancia, altura y entre otros.

- **Sensores pasivos:** Los sensores pasivos en teledetección no transmiten su propia energía al objeto o superficie investigada, a diferencia de los activos. La teledetección pasiva depende de la energía natural (rayos solares) que rebota el objetivo; de modo que la teledetección pasiva emplea sensores multiespectrales o hiperespectrales que miden la cantidad adquirida con múltiples combinaciones de bandas.

### Figura 9

*Clasificación de los sensores remotos*



*Nota.* Pérez (2007)

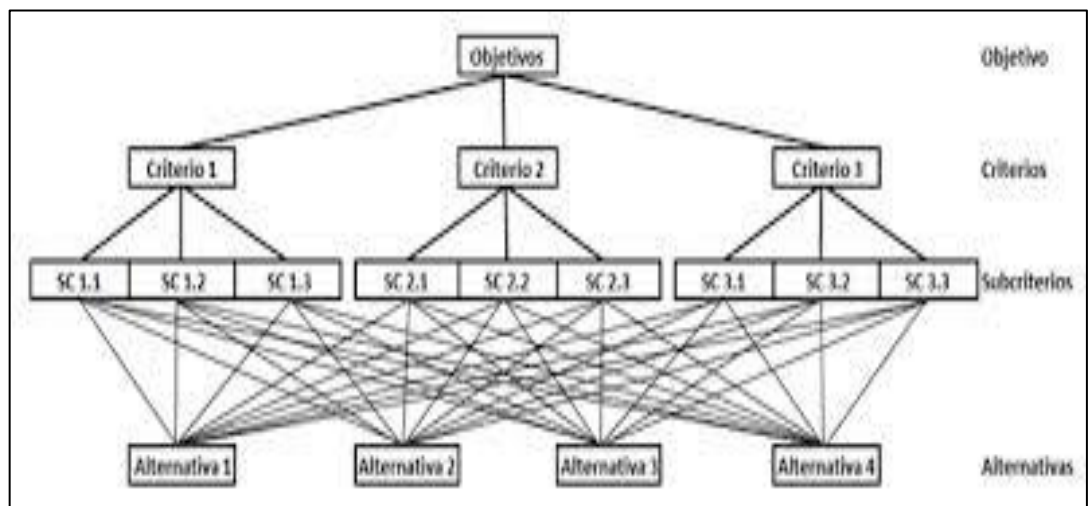
#### 2.3.3. *Toma de decisiones multicriterio*

El análisis de decisiones multicriterio, conocido como MCDM por sus siglas en inglés, consiste en una investigación de operaciones que implica evaluar múltiples criterios contradictorios al tomar decisiones. Esta metodología ayuda a estructurar y resolver problemas de decisión y planificación que tienen múltiples criterios. MCDM apoya a los participantes en la toma de decisiones al considerar múltiples criterios de manera explícita para la evaluación del problema planteado (figura 10).

El concepto de soluciones "no dominadas" se utiliza en MCDM, donde una solución no se puede mejorar en ningún criterio sin sacrificarla en otro. Los tomadores de decisiones eligen soluciones del conjunto de soluciones no dominadas. MCDM se basa en conocimientos de diversos campos, como matemáticas, análisis de decisiones, economía, tecnología informática, ingeniería de software y sistemas de información (Hwang y Yoon, 1981).

**Figura 10**

*Modelo estándar de la estructura MCDM*



*Nota.* Bravo (2021)

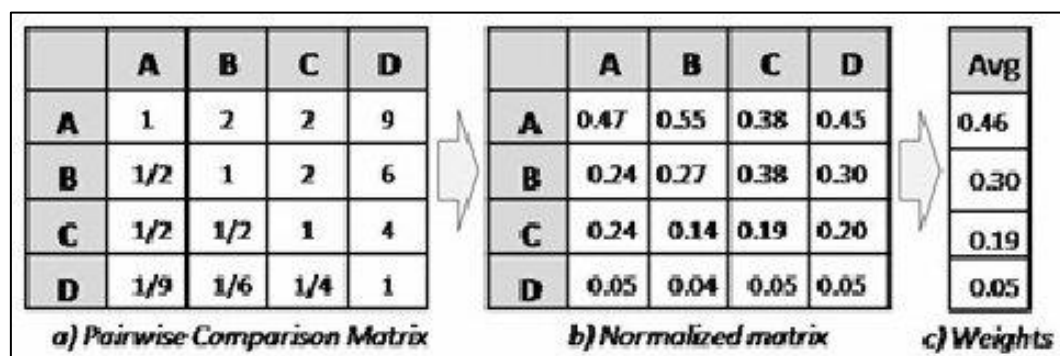
#### **2.3.4. Proceso Analítico Jerárquico**

El Proceso Analítico Jerárquico, conocido comúnmente AHP por sus siglas en inglés, comprende de una técnica de toma de decisiones que se utiliza para resolver problemas complejos estructurándolos en una jerarquía de criterios, partes interesadas y resultados. Implica dividir el problema de decisión en partes más pequeñas, comparar los elementos de estas partes y asignar pesos numéricos basados en comparaciones racionales (figura 11).

AHP se utiliza ampliamente en diversos campos, como gobierno, empresas, atención médica y educación, para elección, clasificación, priorización, asignación de recursos, evaluación comparativa, gestión de calidad y resolución de conflictos. Es un método que ayuda a los participantes a escoger la mejor alternativa de decisión en función de sus objetivos planteados y comprensión de los parámetros del problema observado (Youssef, 2019).

**Figura 11**

*Patrón de cálculos implicados en la metodología AHP*



Nota. Pawar (2008)

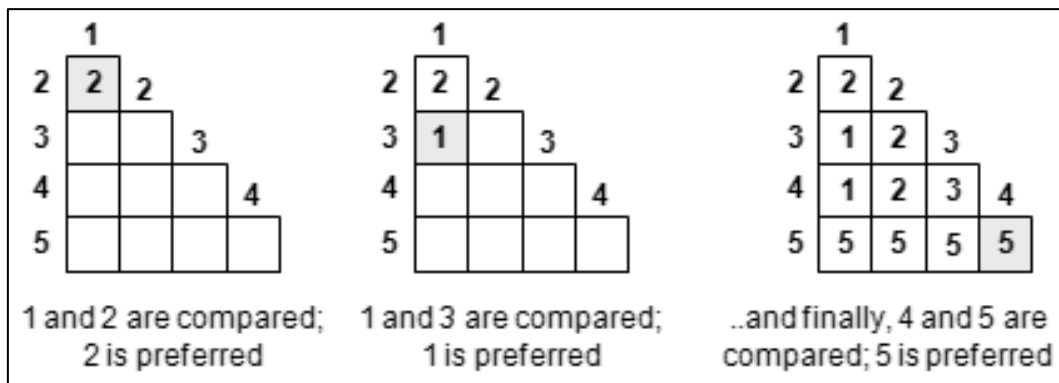
### 2.3.5. Matriz de comparación por pares

La matriz de comparación por pares (PCM) es una herramienta utilizada en el proceso de comparación por pares para evaluar y clasificar múltiples candidatos o criterios. Es una matriz cuadrada que representa las comparaciones realizadas entre cada par de ítems o factores evaluados (figura 12). La matriz está llena de valores que representan la importancia relativa o preferencia de un elemento sobre otro en cada par. Estos valores pueden basarse en juicios subjetivos o mediciones cuantitativas. Luego, la matriz de comparación por pares se utiliza para calcular las

clasificaciones o ponderaciones generales de los elementos o criterios que se comparan (DAU Program Managers Guide, 2023).

**Figura 12**

*Clasificación entre los PCM*



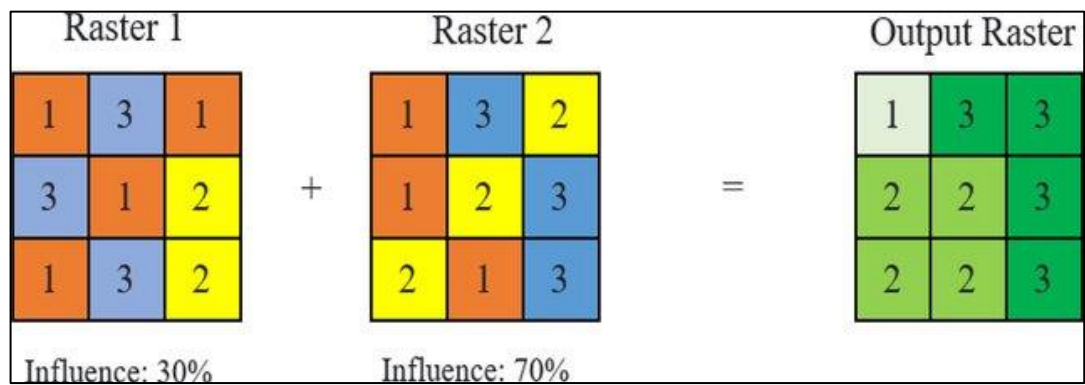
*Nota.* <https://acqnotes.com/acqnote/careerfields/pairwise-comparison>

### **2.3.6. Análisis de superposición ponderada**

El análisis de superposición ponderada es una técnica utilizada para combinar múltiples capas de datos espaciales para crear una única capa de salida compuesta. A cada capa de entrada, se le asigna un peso para representar su importancia relativa o influencia en el resultado final (figura 13). Estos pesos se determinan en función de las necesidades y preferencias de quien toma las decisiones. La técnica implica asignar valores a cada capa de entrada según criterios predefinidos y luego multiplicar estos valores por sus respectivos pesos. Los valores resultantes se suman y el valor más alto representa la ubicación o condición más favorable.

**Figura 13**

*Esquema conceptual del análisis de superposición ponderada*



*Nota.* Arun (2021)

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

Para determinar la presencia de agua subterránea en un área, se deben evaluar varios factores que afectan su distribución y recarga. En este estudio, se analizaron las variables relacionadas con geología, geomorfología, tipo de suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamientos, pendiente, cobertura y uso del suelo, precipitación acumulada y NDVI, como factores que juegan un papel importante en la definición de la ubicación de agua subterránea usando el método AHP de toma de decisiones de criterios múltiples junto con el método de superposición en GIS, se puede obtener el mapa final de GWPZ. Análogamente, como paso final, este mapa va a ser validado haciendo el cruzamiento de la información con modelos desarrollados dentro del área de estudio (figura 14).

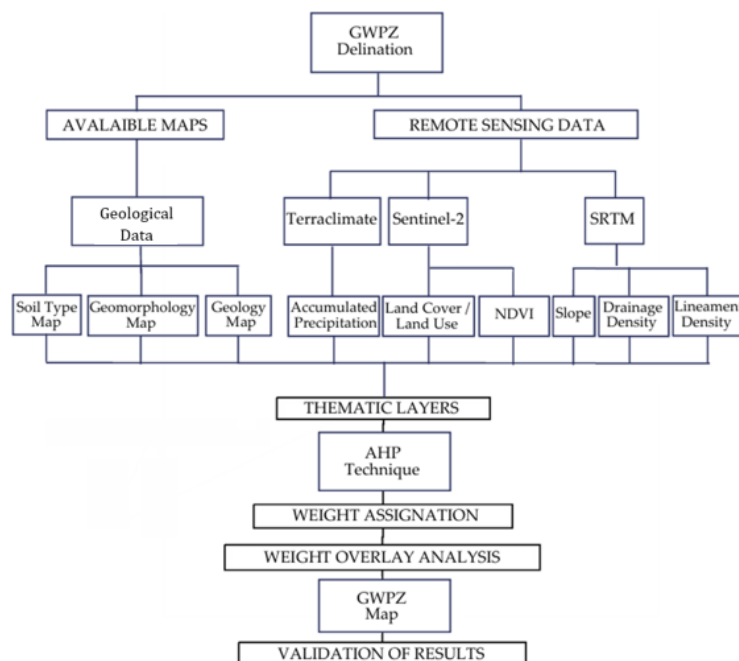
#### **3.1. CONJUNTO DE DATOS Y FUENTES**

Los sensores remotos continúan incrementando su desarrollo tecnológico a lo largo de los años; son una herramienta ideal para diversas áreas relacionadas con la hidrología, la geoquímica y los estudios en los que faltan datos de campo o estos son inadecuados (Yousif et al., 2018). La delimitación de las aguas subterráneas es posible mediante el uso de datos satelitales. De esta forma, la obtención de capas temáticas se realiza mediante tecnología de teledetección, de uso y descarga gratuita. Todas las fuentes descargadas se proyectaron en el sistema de coordenadas WGS84/UTM Zona 19S con una resolución espacial de 30 m. De cada sensor remoto, se obtuvo la información necesaria para generar las capas temáticas (tabla

2). Las capas de densidad de drenaje, densidad de lineamientos estructurales y pendiente se generan a partir del Modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 30 m de la Misión de topografía de radar de transbordador (SRTM). La capa de uso y cobertura del suelo (LU/LC) y la capa de índice de vegetación (NDVI) han sido obtenidos a partir de los datos de Sentinel-2 con una resolución de 10 m. La capa de LU/LC es derivada de imágenes Sentinel-2, que se han aplicado a modelos de clasificación utilizando inteligencia artificial, lo que permite obtener un mapa de 9 clases de superficie. La capa de precipitación acumulada se obtiene a partir de los datos del satélite Terraclimate, con una resolución de 4638 m; este sensor proporciona datos mensuales sobre el clima y el balance hídrico para las superficies terrestres (Abatzoglou et al., 2018).

**Figura 14**

*Esquema metodológico aplicado en este estudio*



*Nota.* La metodología implica etapas de recolección y agrupación de datos satelitales

**Tabla 2***Conjunto de datos utilizado y su capa temática asociada*

<b>Dataset</b>	<b>Fuente</b>	<b>Capas temáticas</b>
SRTM	USGS ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )	Densidad de lineamientos estructurales / Densidad de drenaje / Pendiente
Sentinel – 2	ArcGIS  ( <a href="https://www.arcgis.com/home/">https://www.arcgis.com/home/</a> )	Uso y cobertura del suelo /  NDVI
Terraclimate	Motor de Google Earth ( <a href="https://developers.google.com/earth-engine/datasets">https://developers.google.com/earth-engine/datasets</a> )	Precipitación acumulada anual
Geología	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico	Formaciones litológicas y estructuras
Geomorfología	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico	Unidades geomorfológicas
Suelo	Ministerio del Medio Ambiente	Tipo de suelo

*Nota.* Fuentes de cada conjunto de data aplicada en este estudio

### **3.2. ASIGNACIÓN DE PESO USANDO AHP**

El Proceso Jerárquico Analítico, conocido por sus siglas en inglés como Analytic Hierarchy Process (AHP), es un método de análisis de Toma de Decisiones de Criterios Múltiples (MCDM) propuesto por Saaty (Saaty, 1980); el método se basa en el uso de matrices de comparación por pares (PCM), que comparan los criterios generales entre sí para estimar el rango o el peso de cada criterio (Saaty, 1986; Saaty, 1988). Se establece un nivel de jerarquía entre las nueve capas temáticas propuestas para realizar la matriz de comparación por pares.

Para determinar la importancia relativa entre los estratos, se utiliza la escala de Saaty basada en valores numéricos del 1 al 9 (tabla 3); en el cual, el 1 representa una importancia baja entre los estratos evaluados, mientras que el 9 tiene una

importancia muy favorable. En este estudio, para establecer qué capa tiene una influencia más significativa que las otras, se analiza el impacto que estas tienen sobre el potencial hídrico subterráneo, con base en los resultados de investigación que se encuentran disponibles en la zona. Luego, para reducir la subjetividad asociada causada por la inconsistencia en el establecimiento de criterios personales, los pesos resultantes deben normalizarse a partir de la matriz de comparación por pares (tabla 4). De esta forma, se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_n = (GM / \sum_{n=1}^{N_f} GM_n)$$

Donde,  $GM_n$  representa la media geométrica de la n-ésima fila de la matriz, que se calcula de la siguiente manera:

$$GM = \sqrt[N_f]{A_{1n}A_{2n} \dots A_{Nf}}$$

Donde,  $A_{Nf}$  representa el peso de escala relativo de los factores por pares. Una vez obtenidos los pesos normalizados (tabla 5), se debe evaluar la confiabilidad del resultado. Para ello, se evalúa el valor de la Relación de Consistencia (CR), que controla el equilibrio entre los pesos asignados.

La ecuación CR es la siguiente.

$$CR = \frac{\text{Consistency Index (CI)}}{\text{Random Index (RI)}}$$

El índice de consistencia (IC) de la matriz se calcula utilizando la siguiente ecuación.

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

Donde,  $\lambda_{max}$  es el valor propio máximo de la matriz y  $n$  es el número de criterios, por lo tanto, si se cumple la condición  $CR < 1.0$ , el modelo es aceptable. Por otro lado, es necesario reevaluar los criterios utilizados a la hora de asignar los pesos. El estudio muestra un valor de CR de 0,065, considerado una consistencia aceptable.

**Tabla 3**

*Escala de importancia relativa de Satty*

Escala	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a un elemento sobre otro.
5	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre otro.
7	Importancia muy fuerte	Un elemento se ve fuertemente favorecido sobre otro.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece a un elemento sobre otro es igual al orden de afirmación más alto posible.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita compromiso.

*Nota.* La tabla muestra el contraste entre cada valor de la escala

### 3.3. INTEGRACIÓN DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA

Las capas temáticas se han unido utilizando el método de análisis de superposición ponderada aplicado en el entorno GIS para generar el mapa de potencial de aguas subterráneas. Para calcular el índice de probabilidad de ocurrencia de aguas subterráneas, se utiliza la siguiente ecuación:

$$GWPZ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_i * X_j$$

Donde,  $W_i$  expresa el peso normalizado de la  $i$ -ésima variable temática,  $X_j$  expresa el peso normalizado de la  $j$ -ésima clase de la variable,  $n$  representa el número total de variables, y  $m$  representa el número total de clases de una variable. El resultado obtenido de GWPZ se agrupó en cuatro clases: alto, moderado, bajo y muy bajo.

**Tabla 4**

*Matriz de comparación por pares de las capas temáticas*

	GL	SL	GM	AP	LU	SO	LD	DD	IV
GL	1	2,00	3,00	3,00	5,00	9,00	6,00	7,00	8,00
SL	0,50	1	2,00	4,00	5,00	7,00	5,00	7,00	6,00
GM	0,33	0,50	1	3,00	4,00	5,00	7,00	6,00	7,00
AP	0,33	0,25	0,33	1	2,00	3,00	5,00	7,00	6,00
LU	0,20	0,20	0,25	0,50	1	2,00	3,00	4,00	3,00
SO	0,11	0,14	0,20	0,33	0,50	1	2,00	3,00	3,00
LD	0,17	0,20	0,14	0,20	0,33	0,50	1	2,00	2,00
DD	0,14	0,14	0,17	0,14	0,25	0,33	0,50	1	3,00
IV	0,12	0,17	0,14	0,17	0,33	0,33	0,50	0,33	1
Suma	3,02	4,73	7,36	12,47	18,67	28,42	30,25	37,58	39,50

*Abreviaciones:* GL = geología; SL = pendiente; GM = geomorfología; AP = precipitación acumulada; LU = uso del suelo; SO = suelo; LD = densidad de lineamientos; DD = densidad de drenaje; IV = índice de vegetación.

**Tabla 5***Peso normalizado de la matriz*

	<b>GL</b>	<b>SL</b>	<b>GM</b>	<b>AP</b>	<b>LU</b>	<b>SO</b>	<b>IV</b>	<b>LD</b>	<b>DD</b>	<b>N<sub>wt</sub> %</b>
<b>GL</b>	0,331	0,423	0,408	0,241	0,268	0,317	0,203	0,198	0,186	28,00
<b>SL</b>	0,165	0,212	0,272	0,321	0,268	0,246	0,152	0,165	0,186	22,40
<b>GM</b>	0,110	0,106	0,136	0,241	0,214	0,176	0,177	0,231	0,160	17,40
<b>AP</b>	0,110	0,053	0,045	0,080	0,107	0,106	0,152	0,165	0,186	11,20
<b>LU</b>	0,066	0,042	0,034	0,040	0,054	0,070	0,076	0,099	0,106	6,50
<b>SO</b>	0,037	0,030	0,027	0,027	0,027	0,035	0,076	0,066	0,080	4,60
<b>IV</b>	0,078	0,061	0,036	0,023	0,031	0,021	0,025	0,016	0,038	3,60
<b>LD</b>	0,055	0,042	0,019	0,016	0,018	0,018	0,051	0,033	0,053	3,50
<b>DD</b>	0,047	0,030	0,023	0,011	0,013	0,012	0,076	0,017	0,027	2,90
<b>Suma</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	100,00

*Nota.* N<sub>wt</sub> % = peso normalizado

## CAPÍTULO IV

### DATA, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. CAPAS TEMÁTICAS

##### 4.1.1. *Influencia de la geología*

Las características geológicas y estructurales superficiales son cruciales para controlar la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas en climas áridos (Scanlon et al., 2006; Wheeler et al., 2010; Vera et al., 2022; Pino et al., 2019; Pino et al., 2017). De manera similar, la litología permite la predisposición de la porosidad y el movimiento de las aguas subterráneas (Ayazi et al., 2010); si la porosidad de la litología es mayor, tiende a producir más almacenamiento de agua subterránea. Los datos geológicos han sido obtenidos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). La geología esta región, donde se localiza la cuenca, abarca formaciones desde el Proterozoico hasta depósitos sedimentarios del Cuaternario (figura 15). Las unidades actuales que cubren las mayores áreas son la formación volcánica Huaylillas y los depósitos continentales (Grupo Moquegua y aluviales del Pliocuatnario). La formación Huaylillas, formada por tobas riolíticas y dacíticas, cubre el 34,7 % del área total. Mientras que los depósitos aluviales cubren el 30 % del área total, cubriendo gran parte de las áreas de baja pendiente de la cuenca.

Las rocas sedimentarias y los depósitos aluviales, debido a su alta permeabilidad y porosidad, favorecen la tasa de recarga de las aguas subterráneas; por lo tanto, se les asignó el mayor peso. Por otro lado, a las rocas volcánicas e intrusivas se les asignó el peso más bajo. La siguiente tabla agrupa la geología en

cinco clases de acuerdo al tipo de roca, para su análisis apropiado dentro del marco metodológico AHP.

A partir de las litologías descritas en el capítulo III, se organizó todas las formaciones en una tabla de evaluación de su competencia de permeabilidad y porosidad (tabla 6).

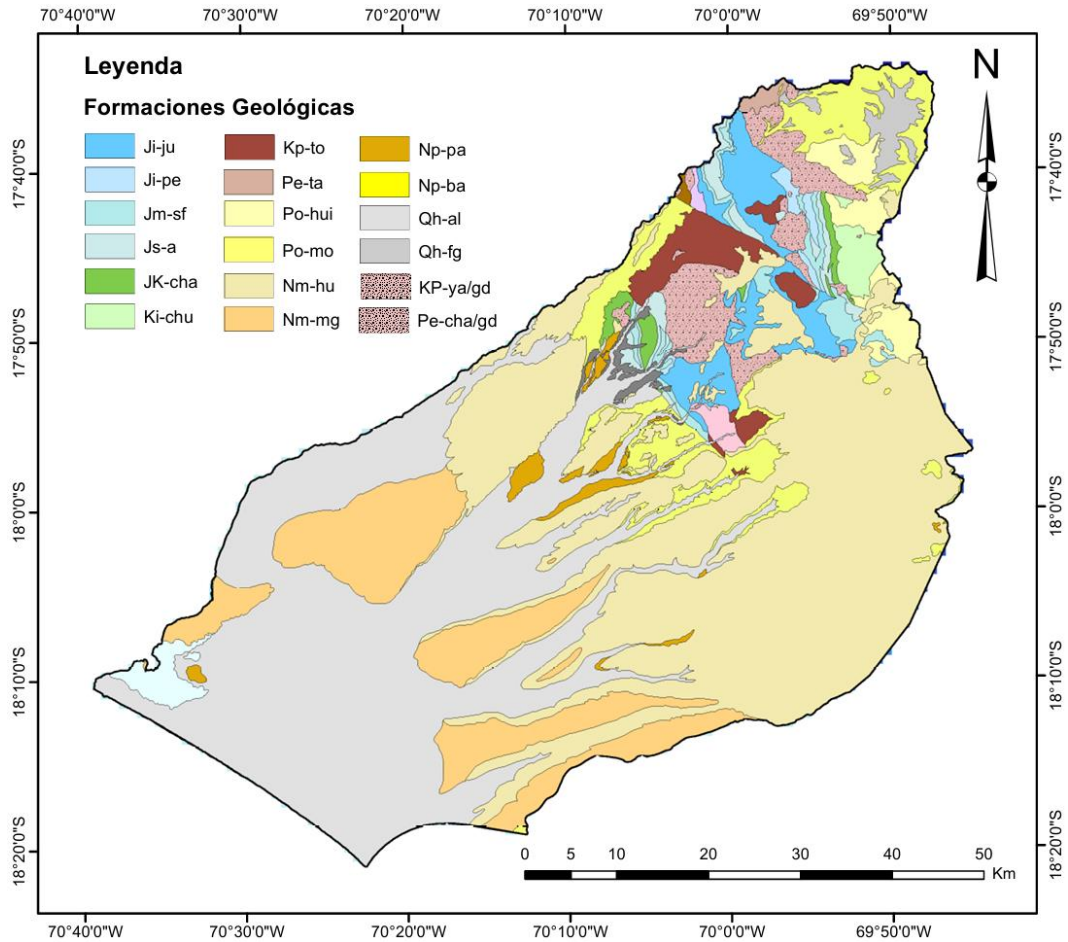
**Tabla 6**

*Reclasificación de la capa de geología*

<b>Geología</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Rocas sedimentarias antiguas</b>	
Formación Junerata	3
Formación Pelado	3
Formación San Francisco	3
Formación Ataspaca	3
<b>Rocas sedimentarias continentales</b>	
Formación Moquegua Inferior	3
Formación Moquegua Superior	4
Depositos de Piedemonte	5
Depositos aluviales	5
Depositos fluvioglaciares	4
<b>Rocas magmáticas intrusivas</b>	
Intrusivo Yarabamba	1
Intrusivo Challaviento	1
<b>Rocas magmáticas extrusivas</b>	
Formación Chilluncana	2
Formación Toquepala	2
Formación Tarata	2
Formación Huilacollo	2
Formación Huaylillas	3
Formación Barroso	2

**Figura 15**

*Capa temática - geología*



*Nota.* 1: Formación Junerata, 2: Formación Pelado, 3: Formación San Francisco, 4: Formación Ataspaca, 5: Formación Chachacumane, 6: Formación Chulluncane, 7: Formación Toquepala, 8: Formación Tarata, 9: Formación Huilacollo, 10: Formación Moquegua, 11: Formación Huaylillas, 12: Formación Magollo, 13: Formación Pachía, 14: Formación Barroso, 15: Depósitos aluviales, 16: Depósitos fluvio-glaciares, 17: Intrusivo Yarabamba, 18: Intrusivo Challaviento

#### **4.1.2. Influencia de la geomorfología**

Las características geomorfológicas de una cuenca juegan un papel crucial en la delimitación del potencial de aguas subterráneas. La geomorfología del área tiene un carácter más tangible y una conexión directa entre el movimiento de las

aguas subterráneas en el subsuelo (Avinash et al., 2011), lo que caracteriza el potencial de las aguas subterráneas según su forma dada (Chowdary et al., 2009). La información geomorfológica se obtuvo del mapa publicado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Geomorfológicamente, la cuenca presenta colinas, acantilados, lomas, montañas, picos nevados, mesetas, laderas y valles (figura 16). Las colinas cubren 1658 km<sup>2</sup> del área total, predominando en el suroeste y centro de la cuenca. Las montañas ocupan 946 km<sup>2</sup> del área total, ubicadas en el lado noreste de la cuenca. Asimismo, las mesetas cubren 713 km<sup>2</sup> de área, en su mayoría cerca de la costa y media de la cuenca. El mayor peso se asignó a las mesetas, mientras que el menor peso se asignó a las zonas de alta pendiente como montañas y laderas (tabla 7).

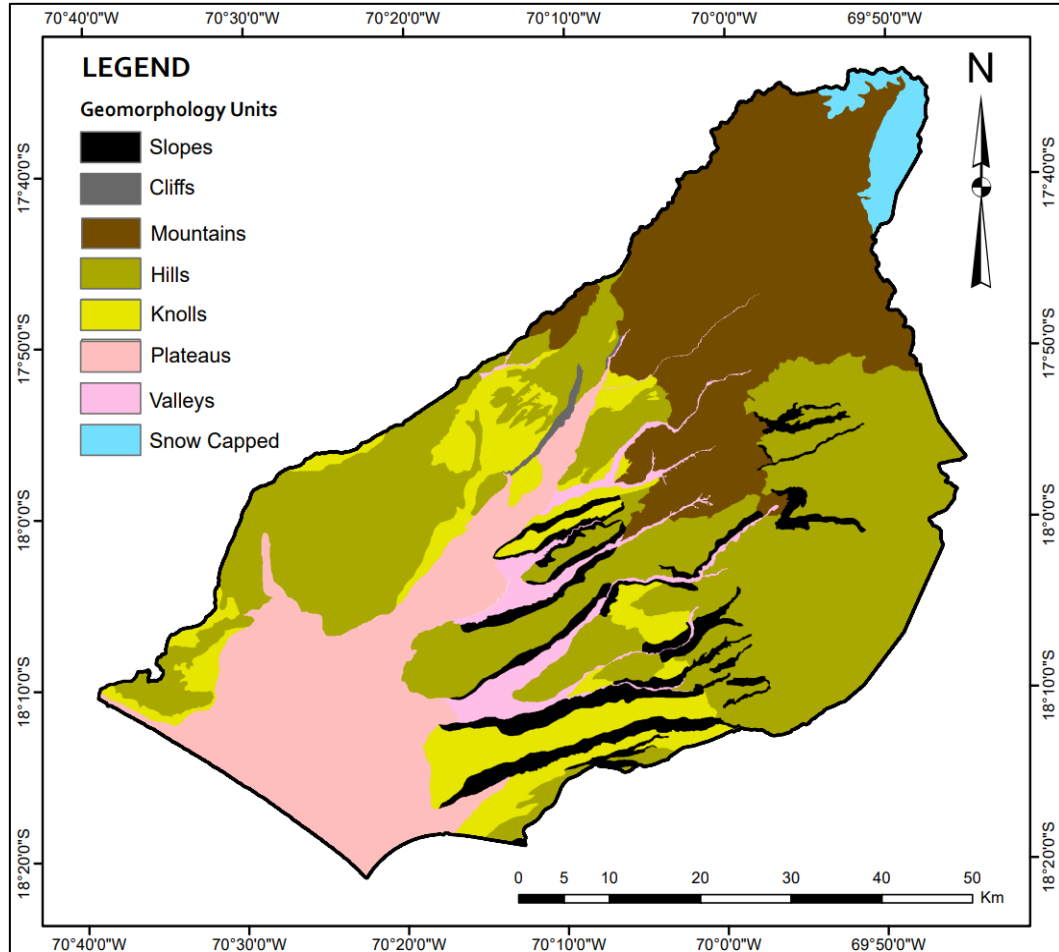
**Tabla 7**

*Reclasificación de la capa de geomorfología*

<b>Geomorfología</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Superficies rugosas</b>	
Lomas	3
Escarpes	2
Montañas	1
Pendientes	1
Cubiertos de nieve	4
<b>Superficies Planas</b>	
Llanuras	5
Valles	4
Colinas	2

**Figura 16**

*Capa temática - Geomorfología*



*Nota.* Elaboración propia

#### **4.1.3. Influencia de los suelos**

Desde el punto de vista geológico, el tipo de suelo puede ser dividido en Suelo Rocosos y Suelo Suelto. Un suelo rocoso está relacionado al accionar erosivo de un macizo rocoso, tanto por efecto de alteración y meteorización de la roca al contacto de la superficie. Un suelo suelto vendría a ser generado por los efectos de deposición de un río, estos suelos gracias a su falta de cohesión entre sus granos permiten una gran capacidad permeable. Los tipos de suelo juegan un papel

importante en la cantidad de agua que puede infiltrarse en las formaciones del subsuelo y, por lo tanto, afectar la recarga de agua subterránea (Das, 2011; Ibrahim y Ahmed, 2016). Los suelos de grano fino tienen una infiltración limitada debido a una permeabilidad relativamente baja, a diferencia de los suelos de grano grueso, donde el agua se infiltra fácilmente debido a su alta permeabilidad (Nigussie et al., 2019).

Los datos de suelo se obtuvieron del Ministerio del Ambiente (MINAM). La cuenca Caplina presenta cuatro tipos de suelos (figura 17), distrito Leptosol - Afloramiento Lítico (LPd-R), Distrito Leptosol - Andosol Víttrico (LPd-ANz), Leptosol Lítico - Afloramiento Lítico (LPq-R) y Solonchak Háplico - Éútrico Leptosol (SCh-LPe). LPd-R cubre el área más grande de la cuenca, el 72% de un área total de 3036 km<sup>2</sup> (figura 16). Debido a su mayor capacidad de infiltración, el mayor peso se le asignó al SCh-LPe y el menor peso al LPd-ANz (Tabla 8).

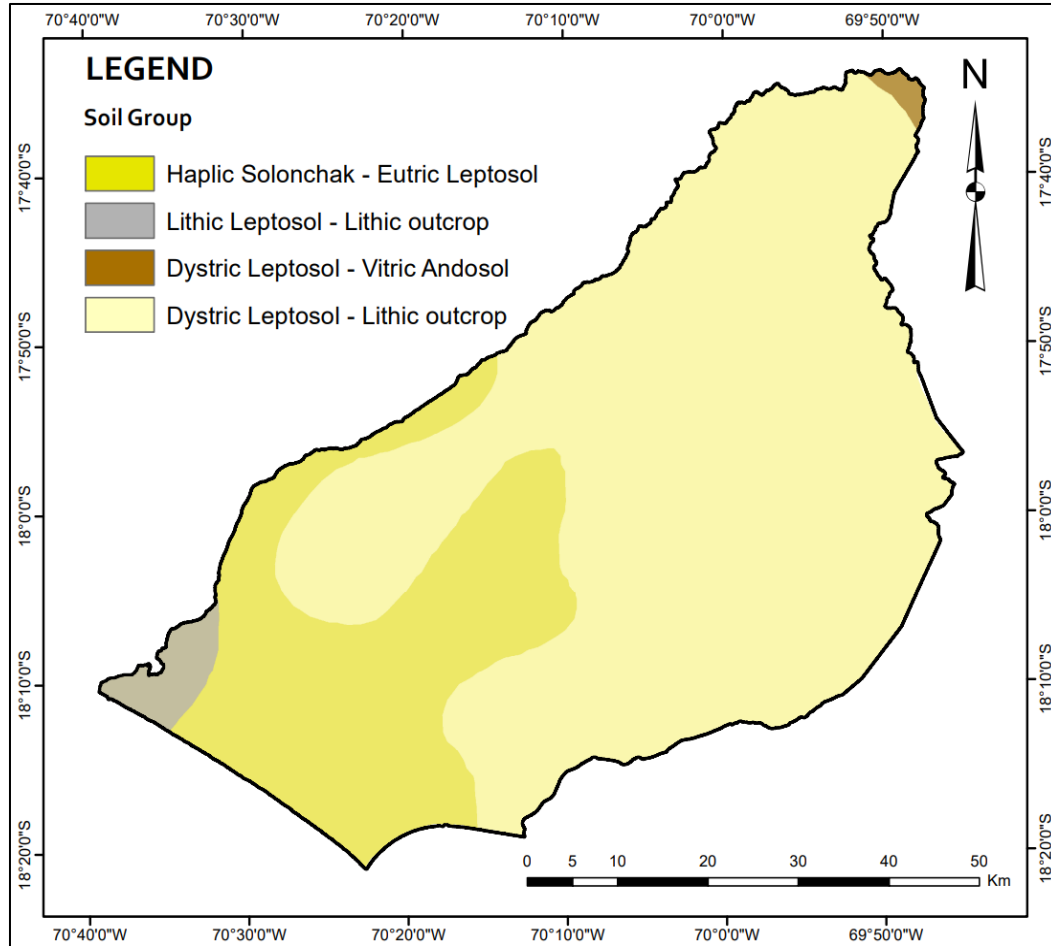
**Tabla 8**

*Reclasificación de la capa de suelos*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Clasificación</b>
SCh-LPe	1	LPd-ANz	4
LPq-R	3	LPd-R	5

**Figura 17**

*Capa temática - suelos*



*Nota.* Elaboración propia

#### **4.1.4. Influencia de la densidad de drenaje**

Desde el punto de vista geomorfológico, las redes de drenaje nos permiten identificar el tipo de roca presente. Es el caso por ejemplo de una red dendrítica va relacionado a rocas incompetentes y de alta porosidad, como vendría a ser el caso de las ignimbritas. Por otro lado, los drenajes rectilíneos se asocian a las rocas intrusivas, donde el paso de las aguas superficiales se da por las fracturas; pero, estas fracturas mencionadas pueden tener la capacidad a la vez de almacenar agua

profundamente según sea el caso. La densidad de drenaje es importante para evaluar el potencial de las aguas subterráneas y tiene una relación inversa con la permeabilidad (Shekhar y Pandey, 2015). Para la obtención de los resultados, se trabajó con el DEM utilizando la herramienta de interpolación Line Density.

Los resultados del procesamiento muestran rangos de densidad de 0 a 1,93 km<sup>2</sup>. Luego, se reclasificaron los valores, agrupándolos en cinco nuevas subclases (figura 18), muy bajo (0 – 0,38 km<sup>2</sup>), bajo (0,38 – 0,76 km<sup>2</sup>), medio (0,76 – 1,15 km<sup>2</sup>), alto (1,15 – 1,53 km<sup>2</sup>) y muy alto (1,53 – 1,93 km<sup>2</sup>). Las áreas de muy baja densidad de drenaje están relacionadas con una alta tasa de infiltración, lo que da un potencial positivo para las aguas subterráneas. Por el contrario, al área de densidad de drenaje excepcionalmente alta se le asignó el peso más bajo (tabla 9).

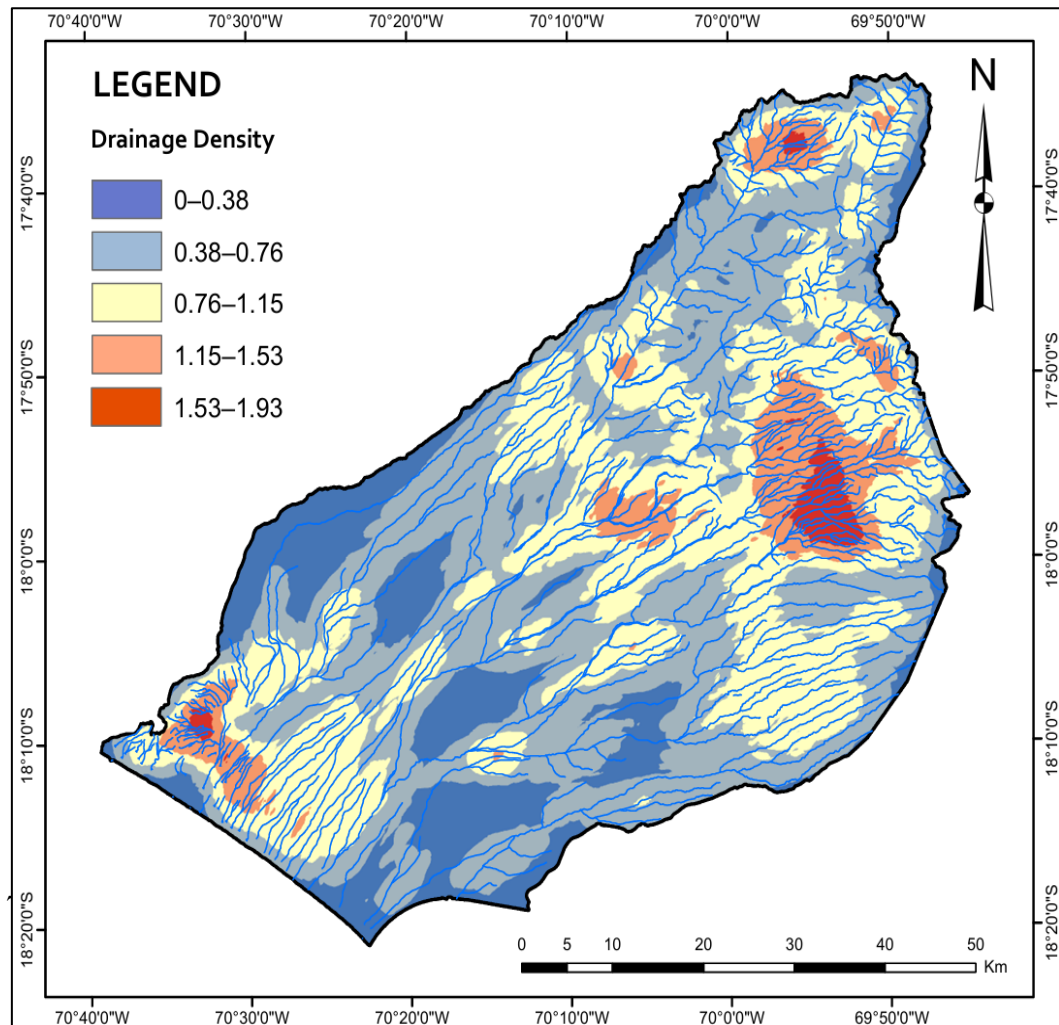
**Tabla 9**

*Reclasificación de la capa de densidad de drenaje*

Densidad drenaje	Clasificación	Densidad drenaje	Clasificación
0-0,38	5	1,15-1,53	2
0,38-0,76	4	1,53-1,93	1
0,76-1,15	3		

**Figura 18**

*Capa temática – Densidad de drenaje*



*Nota.* Densidades de drenaje muy bajo (0 – 0,38 km<sup>2</sup>), bajo (0,38 – 0,76 km<sup>2</sup>), medio (0,76 – 1,15 km<sup>2</sup>), alto (1,15 – 1,53 km<sup>2</sup>) y muy alto (1,53 – 1,93 km<sup>2</sup>)

#### 4.1.5. Influencia de la densidad de lineamientos estructurales

Los lineamientos estructurales obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes satelitales presentan una relación con la información de geología estructural recopilada. En el mapa de lineamientos, se puede apreciar el Sistema de Fallas Incapuquio con un rumbo general de N 55°-50° W, y el Sistema de Fallas de Teclas de Piano con un rumbo general de NE-SW (figura 19). La presencia de estos lineamientos en terrenos de roca competentes es indicativa de la presencia de un buen almacenamiento de agua subterránea (Ankana y Dhanaraj, 2021). Estos lineamientos sirven como conductos para el movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas en el acuífero (Ghoneim, 2008).

El mapa de lineamientos se obtuvo utilizando el DEM y la herramienta Lineament Density en el entorno QGIS, y la densidad de lineamientos oscila entre 0 y 3,88 km<sup>2</sup>. Estos valores fueron reclasificados en cinco subclases (figura 18), muy bajo (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), bajo (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), medio (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), alto (0 – 0,77 km<sup>2</sup>) y muy alto (0 – 0,77 km<sup>2</sup>). Las densidades de lineamientos muy altas se ubican en el medio de la cuenca, y se asignó el mayor peso a esta clasificación. En cambio, a las densidades muy bajas se les asignó el peso más bajo (tabla 10).

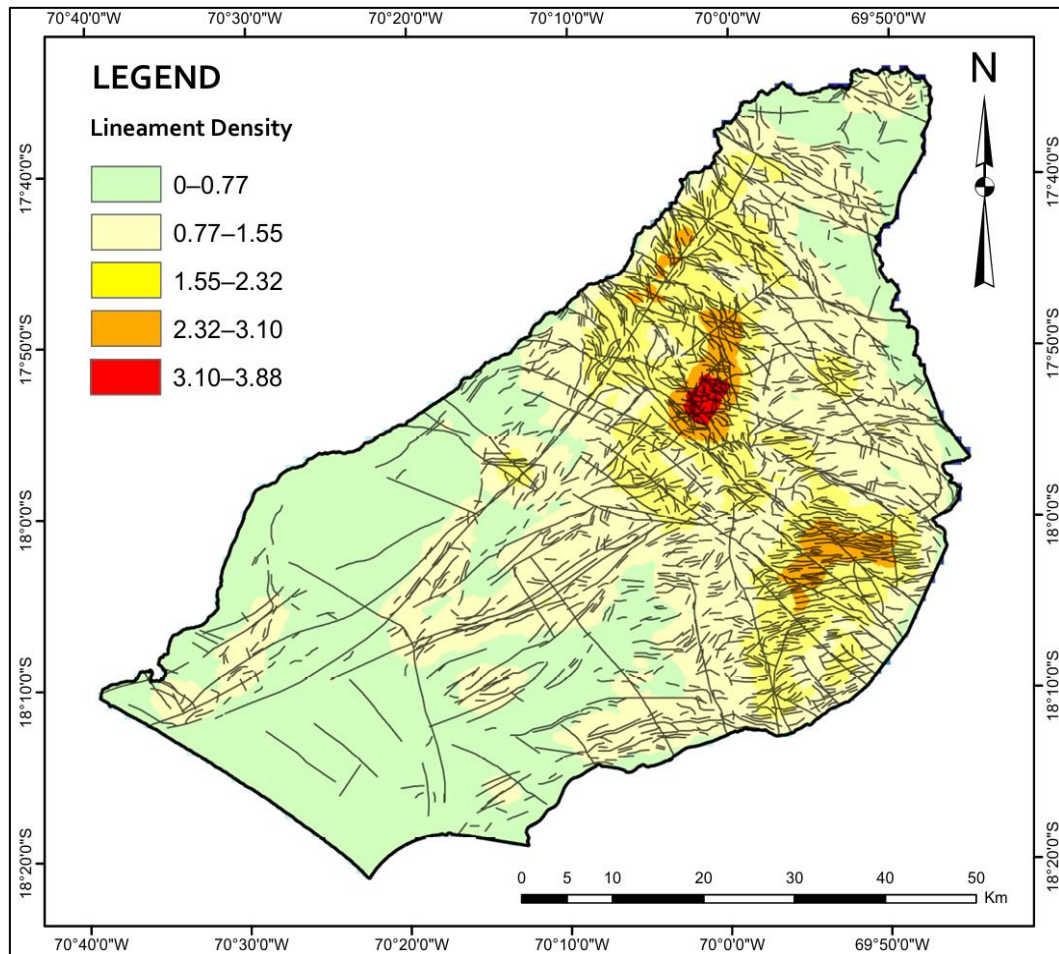
**Tabla 10**

*Reclasificación de la capa de densidad de lineamientos estructurales*

Densidad lineamientos	Clasificación	Densidad lineamientos	Clasificación
0–0,77	1	2,32–3,10	4
0,77–1,55	2	3,10–3,88	5
1,55–2,32	3		

**Figura 19**

*Capa temática – Densidad de lineamientos estructurales*



*Nota.* Densidades de lineamientos estructurales muy bajo (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), bajo (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), medio (0 – 0,77 km<sup>2</sup>), alto (0 – 0,77 km<sup>2</sup>) y muy alto (0 – 0,77 km<sup>2</sup>).

#### **4.1.6. Influencia de la pendiente**

La pendiente tiene una relación positiva con la escurriencia y, por tanto, tiene una influencia inversa en la capacidad de infiltración y recarga. Con el aumento de los valores del ángulo de la pendiente, la velocidad del flujo superficial aumentará (Tehrany et al., 2014; Tehrany et al., 2015). Las pendientes más altas producen menos recarga ya que el agua recibida de la precipitación fluye rápidamente por una pendiente empinada durante la lluvia. Por ende, necesita tiempo de residencia para infiltrarse y recargar la zona saturada (De Reu et al., 2013).

El mapa de pendientes es el resultado de aplicar la herramienta de análisis de pendiente del terreno en el DEM en el entorno QGIS. El área de estudio presenta pendientes entre 0° a 75° (figura 20). Se realizó una reclasificación de valores agrupándolos en cinco subclases, zonas de pendiente plana (0° - 3°), suave (3° - 7°), media (7° - 14°), fuerte (14° - 30°) y muy fuerte (30° - 75°). Las áreas planas y de suave pendiente tienen una relación de infiltración más alta. Así, se les asignó el peso más alto y, a las áreas de pendiente muy fuerte, se les asignó el peso más bajo (tabla 11).

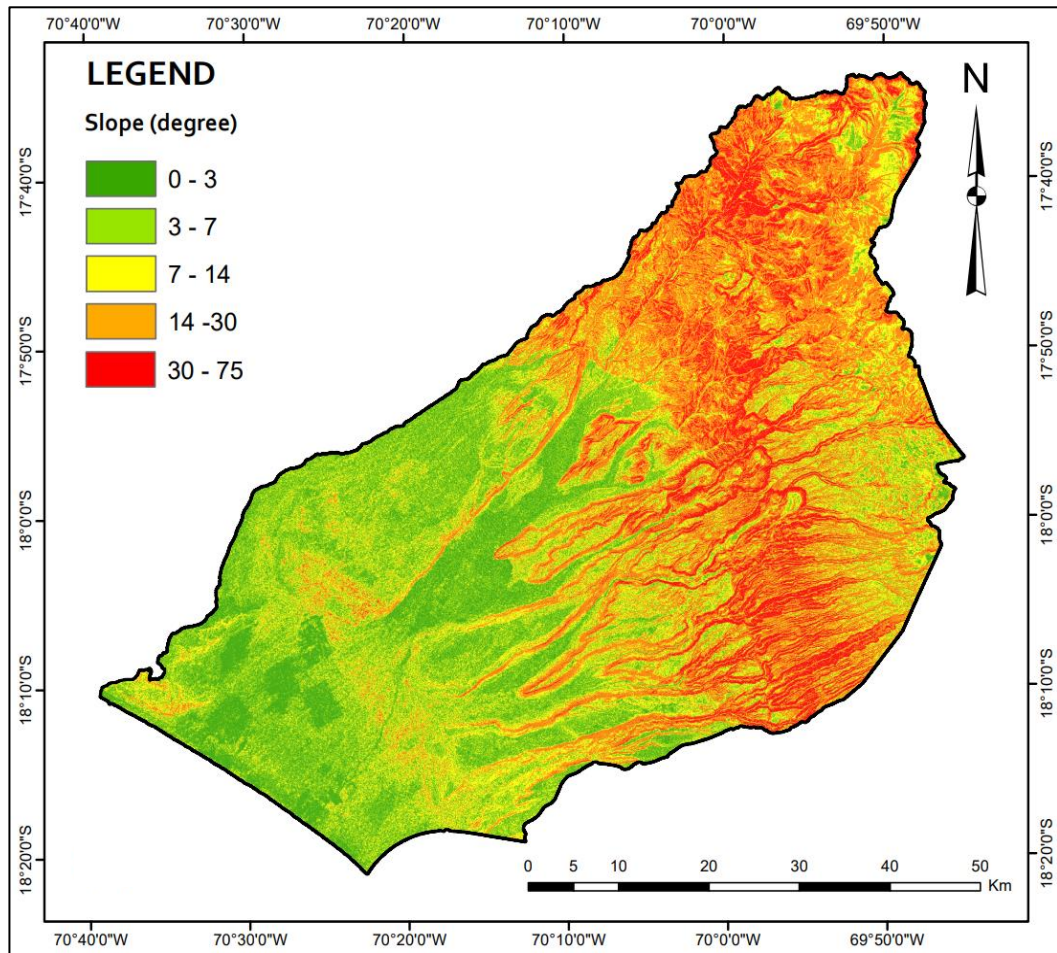
**Tabla 11**

*Reclasificación de la capa de pendiente*

<b>Pendiente</b>	<b>Clasificación</b>
0–3	5
3–7	4
7–14	3
14–30	2
30–75	1

**Figura 20**

*Capa temática – Pendiente*



*Nota.* Pendientes planas ( $0^{\circ}$  -  $3^{\circ}$ ), suaves ( $3^{\circ}$  -  $7^{\circ}$ ), medias ( $7^{\circ}$  -  $14^{\circ}$ ), fuertes ( $14^{\circ}$  -  $30^{\circ}$ ) y muy fuertes ( $30^{\circ}$  -  $75^{\circ}$ )

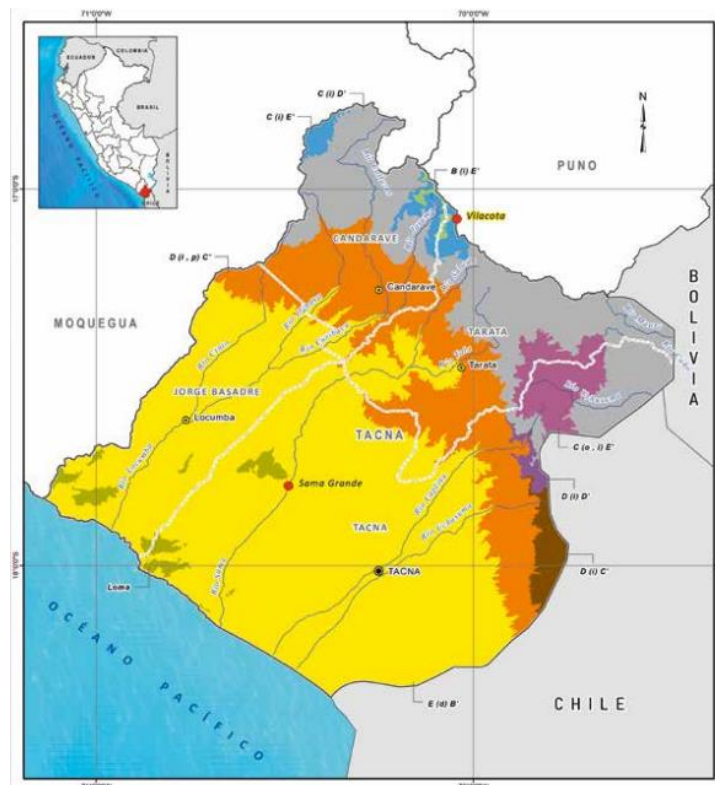
#### ***4.1.7. Influencia de la precipitación acumulada***

De acuerdo a la información del SENAMHI, la cuenca Caplina comprende de tres zonas de humedad principales que controlan los niveles de precipitaciones anuales presentes (figura 21). Primero se tiene un clima de tipo árido con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año asociado a la costa peruana del sur del Perú, las precipitaciones anuales varían entre 0 mm a 5 mm. Luego, se tiene un

clima tipo semiárido, frío y con invierno y primavera seca estando asociado a cotas de 2000 msnm a 2500 msnm. Estas zonas presentan precipitaciones anuales entre 50 mm y 120 mm aproximadamente. Finalmente, en la parte más altas de la cuenca Caplina, se tiene un clima de tipo semiseco, frígido y con otoño e invierno seco, estas zonas presentan precipitaciones anuales entre 300 mm a 500 mm aproximadamente.

### Figura 21

*Mapa de Precipitaciones de la Cuenca Caplina, SENAMHI*



*Nota.* SENAMHI, 2020

La lluvia es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y es la principal fuente de recarga de las aguas subterráneas (Shrestha y Sthapit, 2016). Existe una fuerte correlación positiva entre la precipitación y los niveles de agua subterránea, ya que la fluctuación del nivel freático está influenciada por la

precipitación en la cuenca. Una región con altos niveles de lluvia se considera un área con mayor potencial hídrico y viceversa (Rejith et al., 2019). La capa de precipitación acumulada se obtuvo a partir de los datos climáticos y de balance hídrico anual proporcionados por el sensor remoto terraclimate. Esta información recolectada del SENAMHI muestra una evidente correlación con los datos obtenidos de la información satelital empleada. En el área de estudio, los datos obtenidos fueron extraídos en el periodo anual del año 2020, mostrando la presencia de precipitación entre 0 mm a 468 mm/año (figura 22), los cuales presentan una relación favorable con la información del SENAMHI recolectada. Los altos niveles de precipitación se ubican en el noroeste de la cuenca, asociados a zonas de gran altura; por lo tanto, se le asignó el mayor peso. Por otro lado, los niveles bajos de precipitación se encuentran en áreas de baja elevación; por lo que se les asignó el peso más bajo (tabla 12).

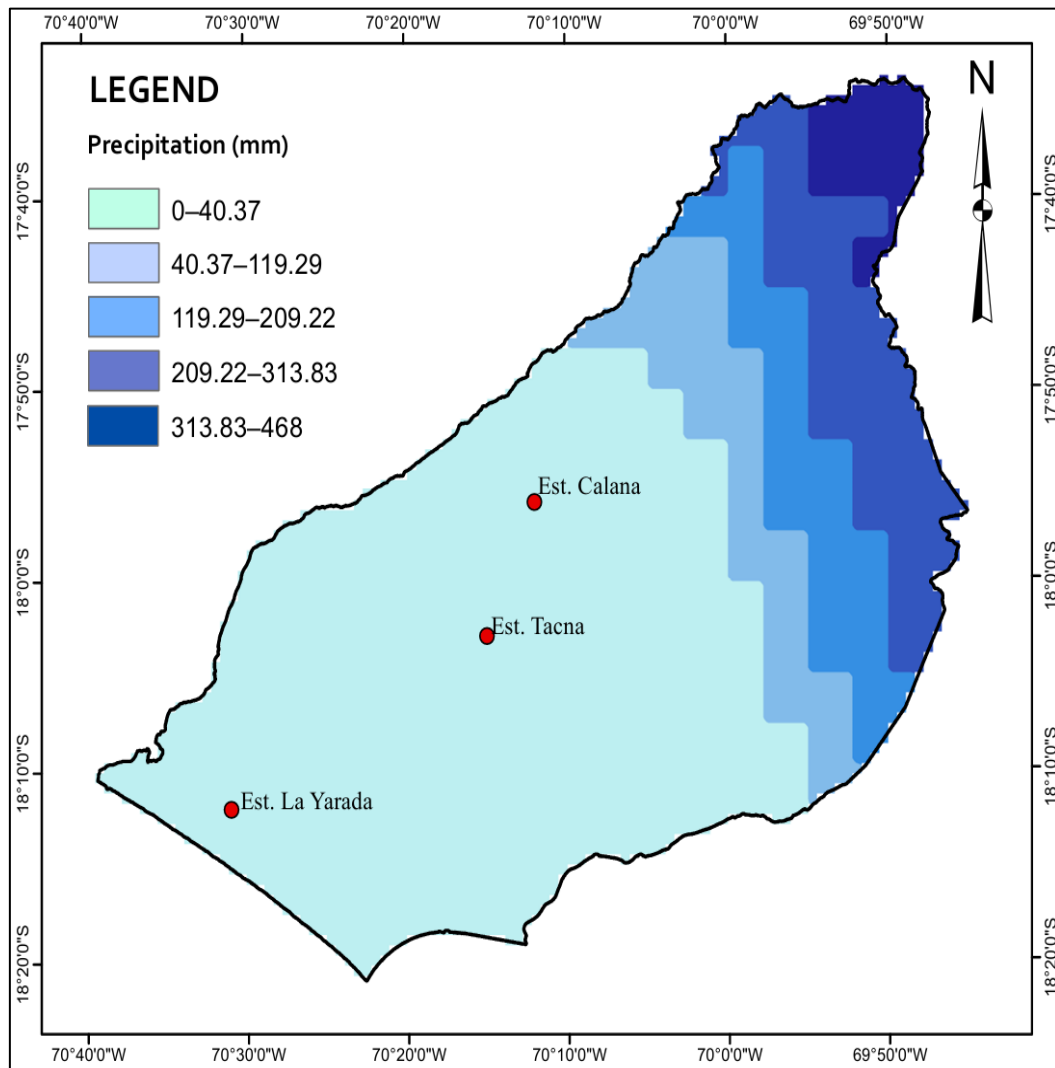
**Tabla 12**

*Reclasificación de la capa de precipitación acumulada*

<b>Precipitación</b>	<b>Clasificación</b>
0–40,37	1
40,37–119,29	2
119,29–209,22	3
209,22–313,83	4
313,83–468	5

**Figura 22**

*Capa temática – Precipitación acumulada anual 2020, Terraclimate*



*Nota.* Elaboración propia

La figura 22 muestra 3 estaciones dentro de la Cuenca Caplina. No obstante, existe una falta de datos de precipitaciones continuas, provocando una amplia brecha de datos vacíos que limitan la evaluación de los datos de precipitaciones en nuestra zona de estudio.

#### **4.1.8. Influencia del LU/LC**

El uso de la tierra afecta las aguas subterráneas a través de cambios en la recarga y la demanda. Además, el agua subterránea está estrechamente relacionada con el paisaje y la cobertura del suelo. (Lerner y Harris, 2009). El tiempo y la cantidad de recarga de agua subterránea están controlados por la cobertura del suelo, lo que afecta la escorrentía y la evapotranspiración (Guzha et al., 2018). La capa LU/LC se obtuvo a partir de imágenes Sentinel-2 de 10 m de uso del suelo/cobertura del suelo.

El área de estudio presenta principalmente cuatro clases de cobertura, siendo estos, Tierras de cultivo, matorrales, área urbana y suelo desnudo (figura 23). Los matorrales son la unidad más extensa de la cuenca, ocupando el 62 % del área total, seguido por la clasificación de suelo desnudo, comprendiendo una extensión del 29,7 % dentro del área de estudio. Los valores de peso más altos se asignaron a las áreas de cultivo y cuerpos de agua debido a su notable asociación con la recarga de aguas subterráneas. Las áreas de suelo desnudo afectan negativamente las áreas potenciales de agua subterránea (tabla 13).

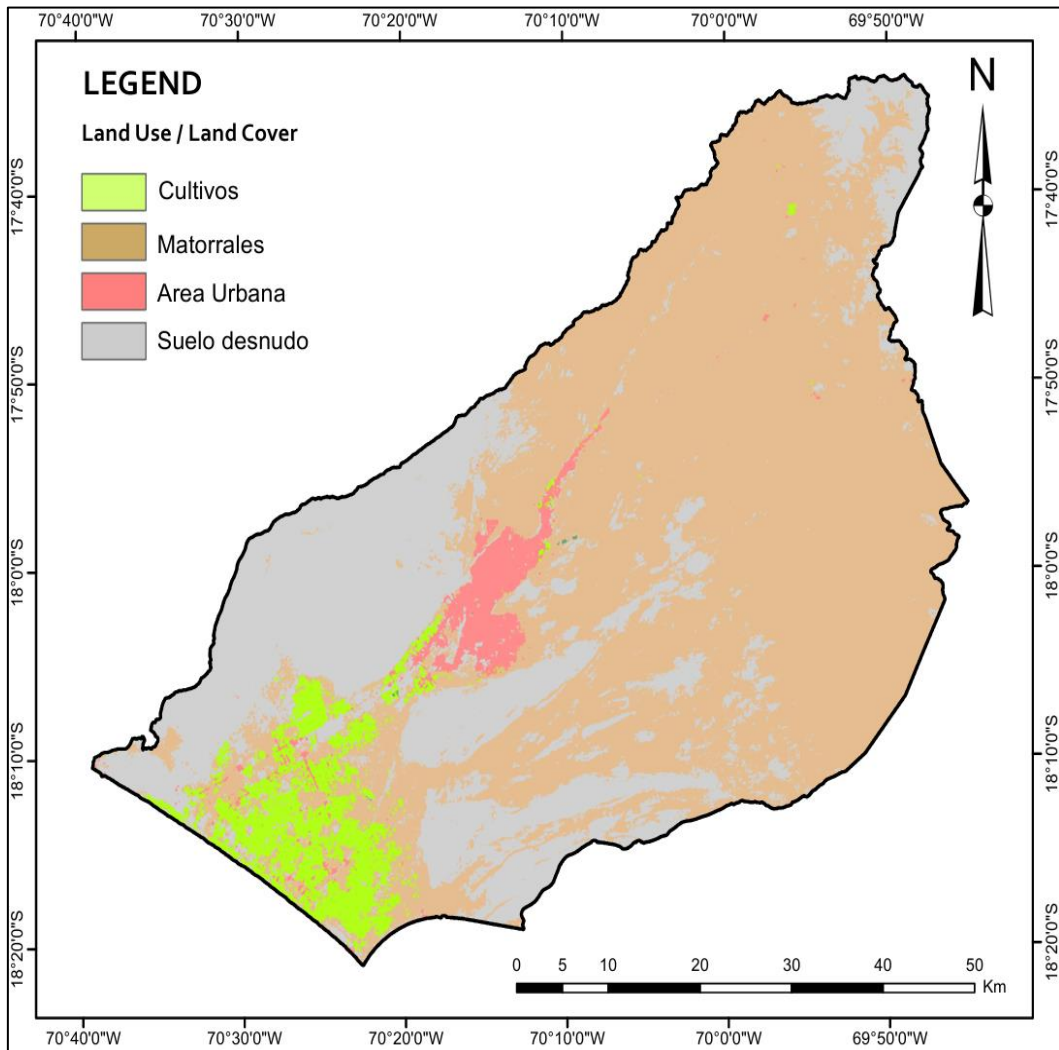
**Tabla 13**

*Reclasificación de la capa de LU/LC*

<b>LU/LC</b>	<b>Clasificación</b>
Tierras de cultivo	5
Matorrales	3
Área urbana	2
Suelo desnudo	1

**Figura 23**

*Capa temática – LU/LC*



*Nota.* Elaboración propia

#### **4.1.9. Influencia del NDVI**

El índice de vegetación (NDVI), conocida por sus siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index, indica un indicio favorable de potencial de presencia de agua subterránea, dado que el NDVI mide la cantidad de vegetación verde viva en un área (Helbich, 2019). La capa de NDVI ha sido extraída gracias al procesamiento de las imágenes Sentinel-2, obteniendo rangos de índice de vegetación entre -0,46 a 0,62 (figura 24).

El área de estudio, los valores arrojados por el procesamiento de las imágenes Sentinel empleadas se clasifico en dos valores que representan la evidente vegetación detectada, comprendiendo valores  $<0,25$ ; contra la aridez que domina la cuenca Caplina, que comprende los valores  $>0,25$ . Los valores más predominantes son los rangos que representan aridez, estos rangos representan el suelo desnudo que ocupa un total de 93 % del área total de la cuenca; en contraste con un porcentaje de área total de 7 % para el índice de vegetación detectado. De este modo, se le asignó los pesos mayores a los valores más altos de acuerdo al índice de vegetación hallado (tabla 14).

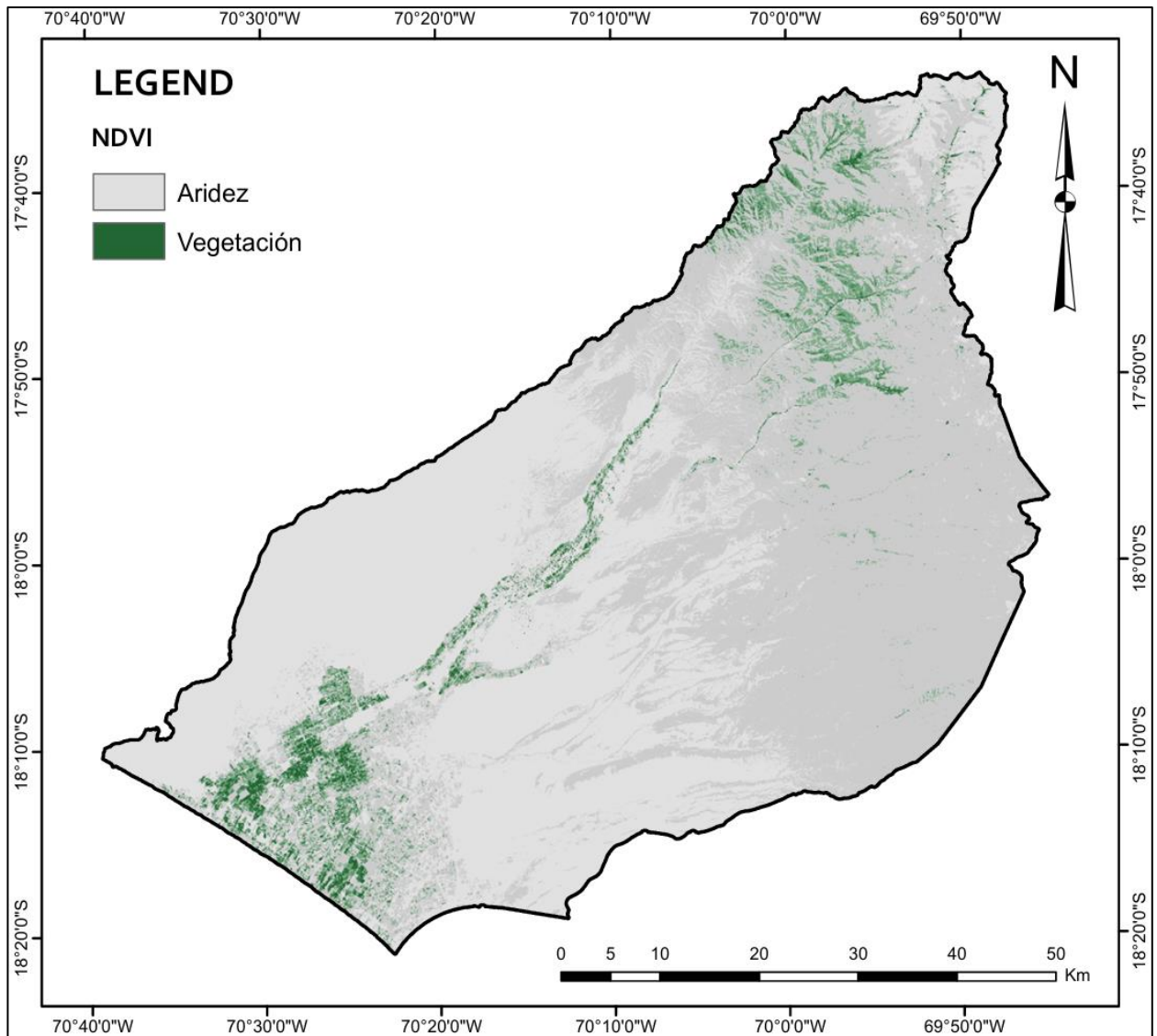
**Tabla 14**

*Reclasificación de la capa de NDVI*

<b>NDVI</b>	<b>Clasificación</b>
Aridez	1
Vegetación	2

**Figura 24**

*Capa temática – NDVI*



*Nota.* Elaboración propia

Con respecto al cálculo del índice de vegetación se aplicó la siguiente fórmula, donde NIR y RED representan las bandas del infrarrojo cercano y roja, respectivamente:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

- Asignación de peso a los factores influyentes

**Tabla 15**

*Síntesis de los indicadores favorables de cada parámetro*

<b><u>CAPAS TEMÁTICAS</u></b>	
<b>Litología</b>	<i>Las litologías más favorables dentro de la cuenca Caplina son las Formaciones del Moquegua Superior, los depósitos de Piedemonte y depósitos aluviales.</i>
<b>Geomorfología</b>	<i>La geoforma más adecuada para albergar agua subterránea son las planicies costaneras, seguida por los valles de la cuenca Caplina.</i>
<b>Tipo de suelo</b>	<i>El tipo de suelo más favorable es el Distrito Leptosol - Afloramiento Lítico (LPd-R), el cual comprende de un suelo somero con una mezcla de suelos volcánicos fértiles cercanos a la línea de la costa.</i>
<b>Densidad de drenaje</b>	<i>Las densidades de drenaje menos densas comprenden las zonas indicadoras más favorables de agua subterránea en la cuenca Caplina.</i>
<b>Densidad de lineamientos</b>	<i>Las zonas de más alta densidad de lineamientos estructurales nos indican las zonas potenciales de recarga en la cuenca Caplina.</i>
<b>Pendientes</b>	<i>Las zonas de pendientes más suaves, por su capacidad almacenadora, son señales de un alto potencial de agua subterránea dentro de la cuenca Caplina.</i>
<b>Uso cobertura de suelo</b>	<i>El tipo de suelo de tierras de cultivos es el más favorable para el posible almacenamiento de agua subterránea en la cuenca Caplina.</i>
<b>Precipitaciones acumuladas</b>	<i>Las zonas de precipitaciones más altas, ubicadas en la Cordillera Occidental, son las áreas más favorables de agua subterránea de la cuenca Caplina.</i>
<b>NDVI</b>	<i>Las pequeñas áreas de vegetación distribuidas dentro de la cuenca Caplina son un indicio ideal para ubicar un alto potencial de agua subterránea.</i>

De la tabla 16, se puede resaltar cómo existen indicadores importantes que relacionan como una capa influye sobre otra, es el caso así de la densidad de drenaje muestra una relación significativa con la geomorfología. Una densidad de drenaje

permite indicar el tipo de roca en base a la morfoestructural que desarrolla sobre esta, siendo un aporte rectilíneo o dentrítico.

**Tabla 16**

*Asignación de peso y ranking de las subclases para las capas temáticas*

Thematic Layer	Assigned Weight	Classes	Rank
Geology	0.28	Sedimentary rocks	4
		Volcanic rocks	1
		Volcano-sedimentary	2
		Intrusive rocks	1
		Alluvial deposits	5
		Fluvio-glacial deposits	3
Geomorphology	0.17	Hills	2
		Escarps	2
		Mountains	1
		Snow covered	3
		Plains	5
		Slope	1
		Valleys	4
		Hydromorphic	2
Soil	0.05	SCh - LPe	1
		LPq - R	3
		LPd - ANz	4
		LPd - R	5
Drainage density	0.02	0 - 0.38	5
		0.38 - 0.76	4
		0.76 - 1.15	3
		1.15 - 1.53	2
		1.53 - 1.93	1
Lineament density	0.03	0 - 0.77	1
		0.77 - 1.55	2
		1.55 - 2.32	3
		2.32 - 3.10	4
		3.10 - 3.88	5
Slope	0.22	0 - 3	5
		3 - 7	4
		7 - 14	3
		14 - 30	2
NDVI	0.04	30 - 75	1
		-0,46 - 0,1	1
		-0,1 - 0,25	2
		-0,25 - 0,37	3
		0,37 - 0,42	4
0,42 - 0,62	5		
Precipitation	0.11	0 - 40.37	1
		40.37 - 119.29	2
		119.29 - 209.22	3
		209.22 - 313.83	4
		313.83 - 468	5
LU/LC	0.07	Waterbodies	4
		Trees	2
		Grass	4
		Cropland	5
		Shrubland	3
		Urban Area	2
		Bare Land	1
		Snow	4

#### **4.2. MAPA DE ZONAS POTENCIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA**

El concepto de AHP como un método de toma de decisiones multicriterio fue introducido por Saaty en los años 80 (Saaty, 1980). Varias décadas después, esta metodología ha evolucionado hasta alcanzar su aplicación en ramas de estudio detalladas como la hidrología, la geoquímica y disciplinas afines a las ciencias de la tierra (Lee y Pradhan, 2007; Photiraj, 2013; Manap et al., 2014). Las cualidades de AHP como método de trabajo, usando el software QGIS, muestran resultados positivos en la validación con las estadísticas y datos utilizados. Para establecer las posibles zonas freáticas potenciales, se analizó la influencia de 9 capas temáticas: geología, geomorfología, tipo de suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamientos, pendiente, cobertura del suelo, precipitación acumulada y NDVI (figura 14).

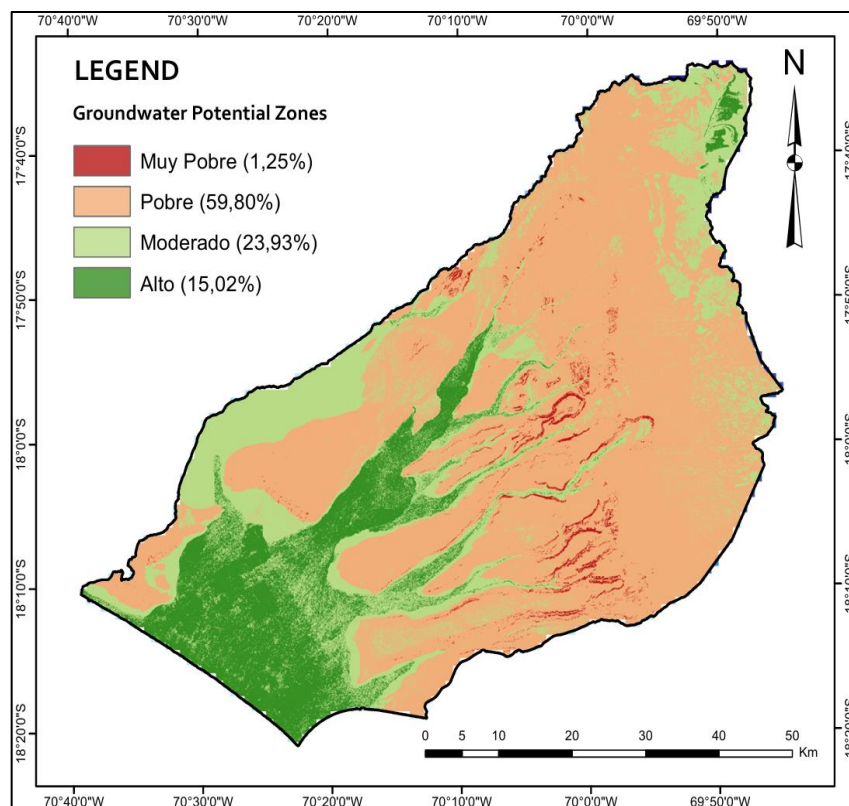
La fiabilidad de los criterios utilizados ha sido evaluada mediante el análisis del Ratio de Consistencia, mostrando un valor aceptable de  $CR=0,065$ . De igual forma, para la validación se utilizó la curva Receiver Operating Characteristic (ROC), mostrando buenos resultados que reflejan los datos reales del área de estudio. Sin embargo, la cuenca de Caplina, debido a su clima árido, enfrenta un problema constante de escasez de agua y requiere proyectos de sostenibilidad para sus recursos hídricos potenciales. El mapa GWPZs muestra cuatro clasificaciones, potencial alto, moderado, bajo y muy bajo (figura 25).

Las zonas de alto potencial están asociadas con características de pendiente baja, litologías permeables y densidades de drenaje bajas. Las zonas de alto potencial se ubican mayoritariamente en el suroeste y pequeñas áreas al noreste de la cuenca Caplina, cubriendo  $696 \text{ km}^2$  (15,02 %) del área total (Pino et al., 2020).

En el caso de las zonas de potencial moderado, abarcan 1111 km<sup>2</sup> (23,93 %) de la cuenca; se encuentran dispersos por toda la cuenca representando una menor relevancia de las aguas subterráneas. Las zonas de potencial bajo y muy bajo ocupan 2776 km<sup>2</sup> (59,80 %) y 58 km<sup>2</sup> (1,25 %), respectivamente, siendo estos valores bajos los grupos más abundantes en la cuenca Caplina. El estudio muestra, entonces, una clara relación entre la geología, la geomorfología y la pendiente como los principales factores determinantes en la ubicación de las aguas subterráneas. Además, otros estudios en esta área coinciden con los factores mencionados como indicadores de la ocurrencia y recarga de aguas subterráneas (Pino, 2021; Pino y Chávarri, 2022; Alvan et al., 2020; Shrestha y Sthapit, 2016).

### Figura 25

*Mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas*



*Nota.* Se distinguen 4 clasificaciones: alto, moderado, pobre y muy pobre

### **4.3. VALIDACIÓN**

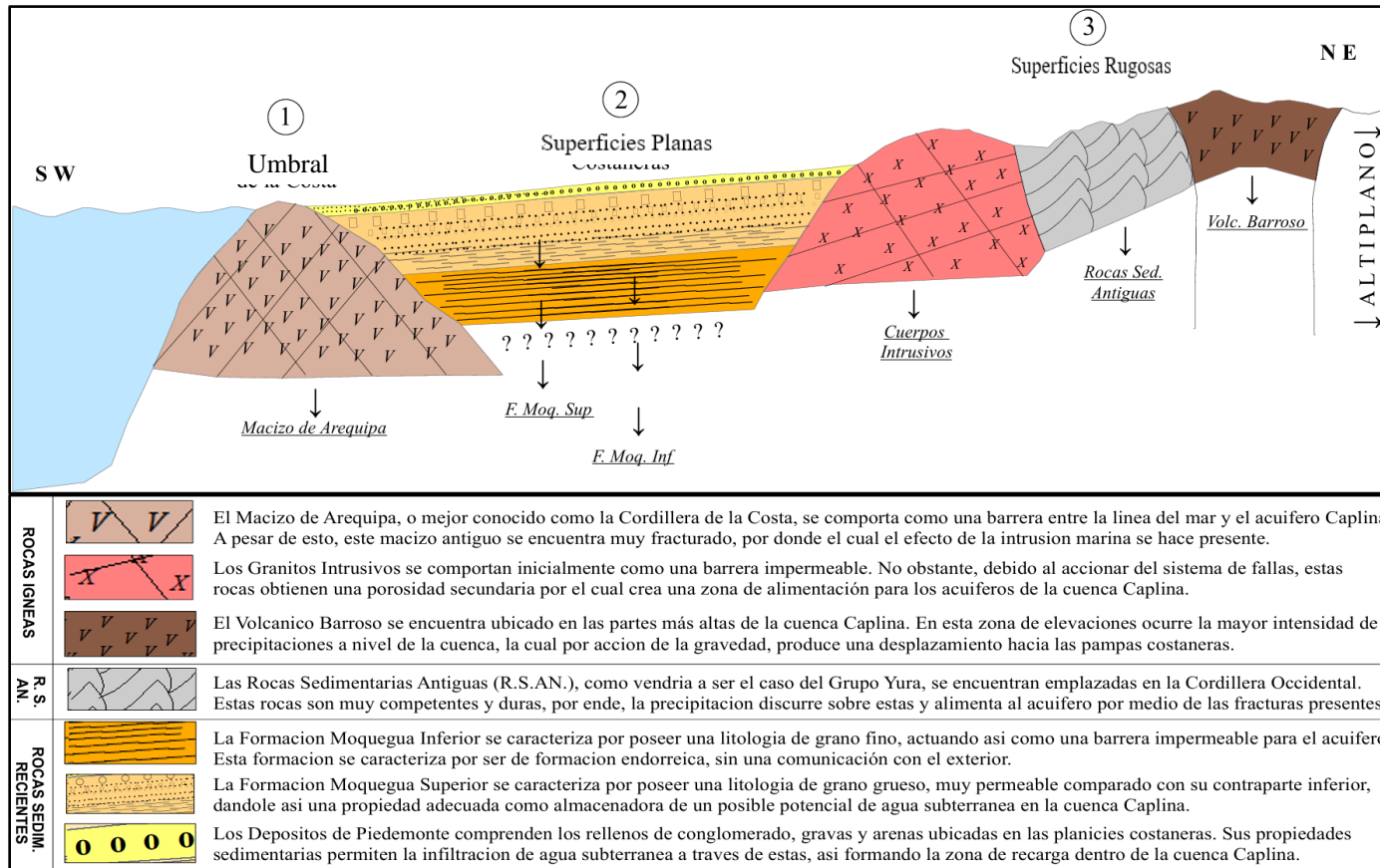
El resultado obtenido del estudio para esta tesis marco como factores principales en el posible potencial de recarga de agua subterránea a la geología, geomorfología y pendiente. De este modo, el análisis realizado en el capítulo III, de las características litológicas y las morfo-estructuras presentes dentro de nuestra área de estudio, permite realizar un proceso de validación que sustente nuestro mapa predictor de potencial probable de agua subterránea (figura 25). Por ende, se propuso la elaboración de un esquema que sintetice la explicación de las zonas de recarga y de alimentación del acuífero Caplina, a partir del entendimiento de los parámetros litológicos, las diferentes morfo estructuras presentes y los sistemas de fallas presentes.

El esquema propuesto formula una descripción, a partir de un gráfico hipotético, de cómo sería la distribución de las formaciones geológicas en el subsuelo el cual nos permite entender cómo se distribuiría la alimentación desde la Cordillera Occidental hacia al potencial de acuífero más alto que se encuentra ubicado en las zonas de las pampas costaneras y valles de la cuenca Caplina (figura 26).

De acuerdo a nuestro esquema morfo estructural, se puede dividir en 3 grandes unidades. Primero se tiene al Umbral (1), conformado por la Cordillera de la Costa, la cual se extiende en el sur del Perú, no obstante, en la región de Tacna la Cordillera de la Costa se encuentra totalmente erosionada encontrándose pequeños afloramientos cerca de la línea de la playa. Es así que, la Cordillera de la Costa en el subsuelo se encuentra evidentemente fracturada, esto provoca que ocurra la intrusión marina presente en los acuíferos presentes cercanos a la costa.

**Figura 26**

*Esquema propuesto de las zonas de recarga y zonas de alimentación dentro de la cuenca Caplina*



Continuando, la segunda morfo estructura presente dentro de la cuenca Caplina vendría a ser las Superficies Planas (2), conformada principalmente por la Pampa Costanera caracterizada por poseer las formaciones más favorables en el proceso de recarga. Nuestro modelo obtenido nos arroja el potencial probable más alto en las zonas de planicie asociadas a los depósitos sedimentarios más recientes. Tomando el caso de la secuencia estratigráfica (figura 2) existe una secuencia de formaciones sedimentarias favorables para un almacenamiento comenzando por los depósitos de Piedemonte, y seguidos por las formaciones Moquegua Superior e Inferior, ambas formaciones sedimentarias se caracterizan por ser de granos gruesos como los conglomerados y bajando su dimensión evidentemente hacia areniscas y previamente a lutitas a mayor profundidad. Los Depósitos Aluviales y la Formación Moquegua Superior tienen las capacidades adecuadas de explicar el acuífero desarrollado dentro de nuestra cuenca Caplina, lo cual podrían ser validados con inversiones en estudios de geofísica y perforación.

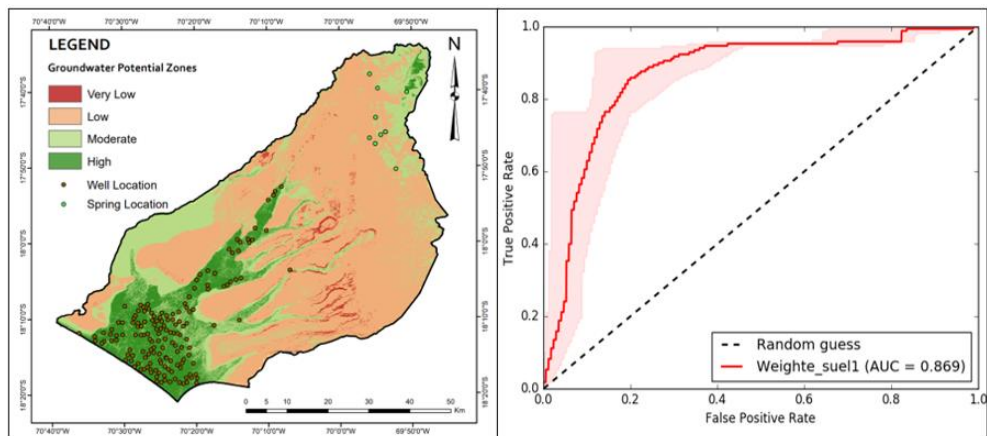
Finalmente, la última morfo estructura que encaja en este esquema planteado son las Superficies Rugosas (3), conformado por la Cordillera Occidental. La Cordillera Occidental es donde se desarrolla la mayor cantidad de precipitaciones a nivel de la cuenca Caplina, viendo a ser esto la zona de recarga. Por medio de las rocas volcánicas y rocas sedimentarias antiguas, el agua superficial discurre a través de estas. A pesar de ello, los granitos intrusivos emplazados en el inicio de las estribaciones de la cordillera se encuentran muy fallados por el sistema Incapuquio, desarrollando así una porosidad secundaria, posibilitando por medio de sus fracturas la alimentación de agua subterránea desde la Cordillera hasta las

Pampas donde se detectó el potencial más alto de agua subterránea. Es de esta forma, como el estudio de la geología nos permite entender la posible dinámica subterránea que explica la ubicación de los acuíferos posibles dentro de la cuenca Caplina.

Adicionalmente, el mapa GWPZ ha sido validado mediante análisis de correlación utilizando los datos de pozos de agua y manantiales naturales existentes en la cuenca Caplina. Los datos de pozos y manantiales utilizados se obtuvieron de la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), que incluye un total de 170 registros que se han ubicado en el mapa GWPZ resultante (figura 27). La curva ROC para el modelo de la cuenca Caplina muestra un valor de Área Bajo la Curva (AUC) de 0,869, lo que representa una precisión del 86,9 %. Según el valor AUC obtenido, la predicción del mapa GWPZ se considera satisfactoria. De esta manera, el modelo presenta una predictibilidad moderada a alta de las aguas subterráneas gracias a la manipulación de datos de sensores remotos junto con la técnica AHP.

### Figura 27

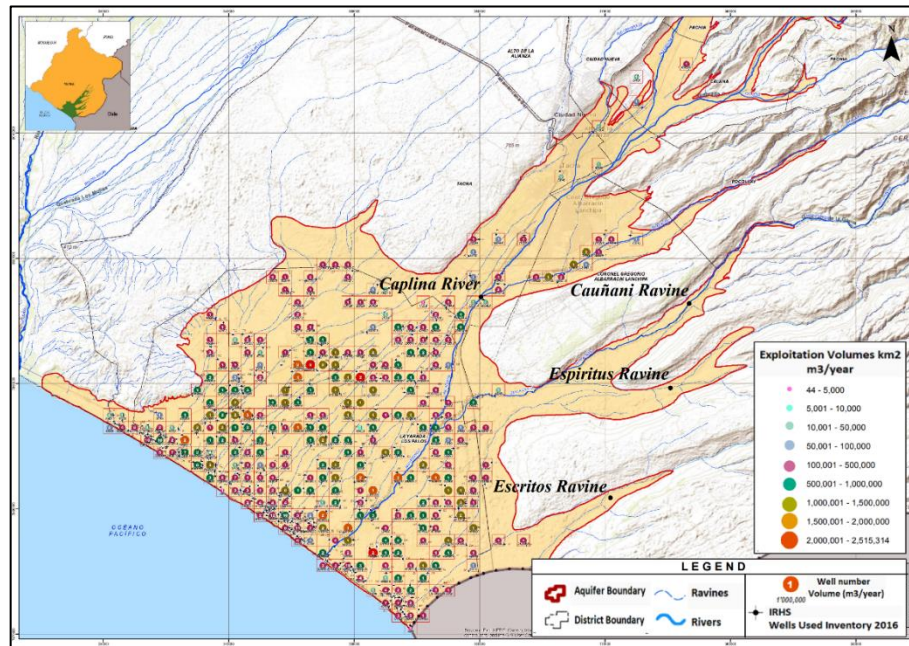
*Validación del mapa de potencial de agua subterránea*



*Nota.* La curva ROC muestra un valor de AUC de 0,869

**Figura 28**

*Mapa de volúmenes de explotación del acuífero Caplina*



Nota. MIDAGRI (2016)

El mapa GWPZ también fue validado a través de la comparación con el mapa de volumen de explotación existente desarrollado por el Ministerio de Agricultura en 2016 (figura 28). El mapa de volumen de explotación expresa la cantidad de agua extraída de los pozos. Al comparar, se observa que la zona central del acuífero presenta los valores más altos de volúmenes de explotación por año y, a su vez, presenta la mayor concentración de aguas subterráneas de alto potencial. De esta manera, se observa que el modelo GWPZ presenta una relación lógica con la distribución de los volúmenes de explotación.

#### 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados muestran una proporción desfavorable de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca Caplina, con solo un 15 % del área total hallado,

con un potencial alto probable de agua subterránea. En vista de esto, es importante considerar como guía los 9 parámetros influyentes en el proceso de recarga de agua subterránea que este estudio ha empleado. Es así que, esta tesis abre la necesidad de resolver un nuevo aspecto importante a estudiar, definir el origen de los acuíferos dentro de la cuenca Caplina. En otras palabras, los recursos hídricos subterráneos exigen un análisis a detalle de la geología subterránea, análisis hidroquímicas de las aguas y estudios geofísicos, a fin de comprender la anatomía de las napas freáticas.

Este estudio formulo un esquema geológico que propone una descripción de las aguas subterráneas en base a las características litológicas, geomorfológicas y estructurales; para determinar los parámetros de porosidad y permeabilidad. Actualmente, aún existe una controversia acerca de definir la edad de los acuíferos presentes en la cuenca Caplina, bien siendo estos acuíferos confinados por actividad de infiltración recientes de miles de años, o bien acuíferos fosilizados que podrían datar hace muchos millones de años atrás. El análisis recopilado de la geología y aspectos estructurales permite ser un excelente guía para definir que esquema de aguas subterráneas puede ser el más coherente a explicar la edad de formación de estos acuíferos.

Enfocándonos en el estudio geológico del Cenozoico, se observa cómo las formaciones más adecuadas para almacenar acuíferos vendrían a ser la extensiva Formación Moquegua Superior presente dentro de la zona de estudio. Esta formación se caracteriza por su litología constituida de conglomerados en capas gruesas a medianas con clastos que alcanzan hasta 30 cm de diámetro redondeado

a sub redondeado en una matriz areno limosa, una litología muy favorable que alberga la posibilidad de almacenamiento de agua subterránea.

Por otro lado, el análisis estructural dentro de la zona de estudio, donde la presencia de estructuras de fracturación densamente desarrollada a lo largo de los sistemas Incapuquio, realizan un aporte a la porosidad (tabular). En consecuencia, dichos parámetros suman a la porosidad intrínseca de las formaciones sedimentarias. Así mismo, es un contribuyente al almacenamiento y circulación de las aguas subterráneas, que parten de los relieves cordilleranos (zona de recarga) hasta el nivel del mar (zona de almacenamiento).

En vista de estos puntos discutidos, la propuesta realizada en esta tesis busca ser un punto de partida para futuros estudios que busquen analizar la naturaleza de los acuíferos presentes en la cuenca Caplina y en otros sectores de las mismas características (Arequipa, Moquegua, el desierto de Atacama, entre otros). El análisis de los parámetros superficiales analizados en este estudio puede ser complementado por estudios de perforación y estudios hidroquímicas para conocer la calidad y la edad del agua subterránea, para así definir con claridad el origen y limitación precisa de los recursos hídricos dentro de la cuenca Caplina. Esta tesis busca abrir ideas para futuros estudios realizados por entidades y autores enfocados en resolver la evidente problemática que presenta la población de Tacna, y así, garantizar nuevas propuestas sostenibles en la gestión urbana de nuestra ciudad.

## CONCLUSIONES

- Primera.** Se identificó y localizó las zonas potenciales prospectables de aguas subterráneas usando la combinación de herramientas de teledetección, mapas de acceso abierto, información de litologías, geomorfología y aspectos estructurales que juegan un rol importante para determinar la porosidad y permeabilidad; en ayuda a la toma de decisiones en GIS.
- Segunda.** Este estudio identificó que el desierto de Atacama, a pesar de su clima árido inherente, presenta cuatro grupos de zonas potenciales (GWPZ), alto (15,02 %), moderado (23,93 %), bajo (59,80 %) y muy bajo (1,25 %). Además, el resultado indica que los depósitos aluviales en pendientes suaves muestran un alto potencial de aguas subterráneas.
- Tercera.** Se validó el resultado obtenido por medio del análisis de los parámetros litológicos, las diferentes morfo estructuras presentes y los sistemas de fallas presentes. Mostrando que los acuíferos probables dentro de la cuenca Caplina alimentación de agua subterránea desde la Cordillera hasta las Pampas Costaneras, donde se detectó el potencial más alto de agua subterránea. Adicionalmente, se validó los resultados por medio del análisis estadístico Receiver Operating Characteristic (ROC) y la recopilación de pozos de la Autoridad Nacional del Agua.

## RECOMENDACIONES

- Primera.** A las autoridades respectivas, promover la realización de diversos estudios para identificar áreas de alto potencial freático debido a la actual controversia en la cuantificación de la recarga del acuífero Caplina.
- Segunda.** Aplicar esta metodología en otros lugares, ya que, debido a su flexibilidad y eficiencia, es una herramienta útil para adaptarse a otras áreas de estudio y así poder aumentar el rendimiento del modelo.
- Tercera.** Actualizar estas clases de investigaciones, esto a causa de la evolución activa de los sensores remotos, los cuales representan la posibilidad de nuevos datos cada vez más detallados, lo que permite mejorar progresivamente la precisión del mapa de potencial de aguas subterráneas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abatzoglou, J. T.; Dobrowski, S. Z.; Parks, S. A. y Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015. *Sci. Data*, 5, 170191.
- Abrams, W.; Ghoneim, E.; Shew, R.; LaMaskin, T.; Al-Bloushi, K.; Hussein, S.; AbuBakr, M.; Al-Mulla, E.; Al-Awar, M. y El-Baz, F. (2018). Delineation of Groundwater Potential (GWP) in the Northern United Arab Emirates and Oman Using Geospatial Technologies in Conjunction with Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Probabilistic Frequency Ratio (PFR) Techniques. *J. Arid Environ*, 157, 77–96.
- Alvan, A. A.; Bustamante, Y. F.; Sánchez, E. A. y Mamani, M. I. (2020). Arquitectura Estratigráfica, Paleogeografía y Proveniencia Sedimentaria de Las Rocas Cenozoicas Del Sur de Perú (Tacna, 18° S). *Andean Geol.*, 47, 351.
- Alvan, A.; Ramírez, K.; Eynatten, H.; Dunkl, I.; Jacay, J. y Bertone, G. (2017). Evolución Geológica de las Cuencas de Antearco del Sur de Perú (Moquegua y Camaná-Mollendo): Proveniencia Sedimentaria y Análisis de Facies en Rocas Cenozoicas. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Ankana y Dhanaraj, G. (2021). Study of Selected Influential Criteria on Groundwater Potential Storage Using Geospatial Technology and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach: A Case Study. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, 24, 649–658.

- Avinash, K.; Jayappa, K. S. y Deepika, B. (2011). Prioritization of Sub-Basins Based on Geomorphology and Morphometric analysis Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Geocarto Int.*, 26, 569–592.
- Ayazi, M. H.; Pirasthe, S.; Pili, A.; Biswajeet, P.; Nikouravan, B. y Mansor, S. B. (2010). Disasters and Risk Reduction in Groundwater: Zagros Mountain Southwest Iran Using Geoinformatics Techniques. *Disaster Adv.*, 3, 51–57.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2017). Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Caplina. Lima: ANA.
- Bakır, M. y Atalık, Ö. (2021). Application of Fuzzy AHP and Fuzzy MARCOS Approach for the Evaluation of E-Service Quality in the Airline Industry. *Decis. Mak. Appl. Manag. Eng.*, 4, 127–152.
- Balacco, G.; Alfio, M. R. y Fidelibus, M. D. (2022). Groundwater Drought Analysis under Data Scarcity: The Case of the Salento Aquifer (Italy). *Sustainability*, 14, 707.
- Bellido, E. (1969). Sinopsis de La Geología Del Perú - (Boletín A 22). *Inst. Geológico, Min. y Met. - INGEMMET*.
- Benavides, V. (1999). Chapter 3: Orogenic Evolution of the Peruvian Andes: The Andean Cycle. *Soc. Econ. Geol.*
- Boobalan, C. y Gurugnanam, B., (2016). Mapping of ground water potential zones in Sarabanga sub-basin, Cauvery River, South India using remote sensing and GIS techniques. *Indian J. Appl. Res.* 6 (2), 364–369.

- Chowdary, V. M.; Ramakrishnan, D.; Srivastava, Y. K.; Chandran, V. y Jeyaram, A. (2009). Integrated Water Resource Development Plan for Sustainable Management of Mayurakshi Watershed, India Using Remote Sensing and GIS. *Water Resour. Manag.*, 23, 1581–1602.
- Chucuya, S.; Vera, A.; Pino-Vargas, E.; Steenken, A.; Mahlknecht, J. y Montalván, I. (2022). Hydrogeochemical Characterization and Identification of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Peru. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 2815.
- Condori Tintaya, F.; Pino Vargas, E. y Tacora Villegas, P. (2022). Pérdida de Suelos Por Erosión Hídrica En Laderas Semiáridas de La Subcuenca Cairani-Camilaca, Perú. *Idesia (Arica)*, 40, 7–15.
- Das, D. (2011). Drainage and Lineament Analysis towards Artificial Recharge of Groundwater. In *Advances in the Research of Aquatic Environment*. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, pp 37–44.
- Das, S.; Behera, S. C.; Kar, A.; Narendra, P. y Guha, S. (1997). Hydrogeomorphological Mapping in Ground Water Exploration Using Remotely Sensed Data — a Case Study in Keonjhar District, Orissa. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 25, 247–259.
- De Reu, J.; Bourgeois, J.; Bats, M.; Zwertvaegher, A.; Gelorini, V.; De Smedt, P.; Chu, W.; Antrop, M.; De Maeyer, P.; Finke, P.; Van Meirvenne, M.; Verniers, J. y Crombé, P. (2013). Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186, 39–49.

- Derdour, A.; Bouanani, A.; Kaid, N.; Mukdasai, K.; Algelany, A. M.; Ahmad, H.; Menni, Y. y Ameer, H. (2022). Groundwater Potentiality Assessment of Ain Sefra Region in Upper Wadi Namous Basin, Algeria Using Integrated Geospatial Approaches. *Sustainability*, 14, 4450.
- Dube, T.; Shoko, C.; Sibanda, M.; Baloyi, M. M.; Molekoa, M.; Nkuna, D.; Rafapa, B. y Rampheri, B. M. (2020). Spatial Modelling of Groundwater Quality across a Land Use and Land Cover Gradient in Limpopo Province, South Africa. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 115, 102820.
- Espinoza-Molina, J.; Acosta-Caipa, K.; Chambe-Vega, E.; Huayna, G.; Pino-Vargas, E. y Abad, J. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands in Relation to Urban Development, in the Vicinity of the Atacama Desert. *Climate*, 10, 87.
- Ghoneim, E. (2008). Optimum Groundwater Locations in the Northern United Arab Emirates. *Int. J. Remote Sens.*, 29, 5879–5906.
- Gómez-Silva, B.; Batista-García, R. A. (2022). The Atacama Desert: A Biodiversity Hotspot and Not Just a Mineral-Rich Region. *Front. Microbiol*, 13.
- Guzha, A. C.; Rufino, M. C.; Okoth, S.; Jacobs, S. y Nóbrega, R. L. B. (2018). Impacts of Land Use and Land Cover Change on Surface Runoff, Discharge and Low Flows: Evidence from East Africa. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 15, 49–67.
- Hartley, A. J.; Chong, G.; Houston, J. y Mather, A. E. (2005). 150 Million Years of Climatic Stability: Evidence from the Atacama Desert, Northern Chile. *J. Geol. Soc. London.*, 162, 421–424.

- Helbich, M. Spatiotemporal Contextual Uncertainties in Green Space Exposure Measures: Exploring a Time Series of the Normalized Difference Vegetation Indices. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 852.
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications – a literature review. *Eur. J. Oper. Res.* 186 (1), 211–228.
- Houston, J. y Hartley, A. J. (2003). The Central Andean West-Slope Rainshadow and Its Potential Contribution to the Origin of Hyper-Aridity in the Atacama Desert. *Int. J. Climatol.*, 23, 1453–1464.
- Huaman R.D., (1985). Evolution Tectonique Cénozoïque et Néotectonique du Piémont Pacifique dans la région d' Arequipa (Andes du Sud Pérou). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université Paris XI. 220 p.
- Ibrahim-Bathis, K. y Ahmed, S. A. (2016). Geospatial Technology for Delineating Groundwater Potential Zones in Doddahalla Watershed of Chitradurga District, India. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, 19, 223–234.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x). Boletín A 4. Lima: INGEMMET.
- Isacks, B. L., 1988. Uplift of the Central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 3211-3231.
- Jarvis, A., H. I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Versión 4
- Lee, S. y Pradhan, B. (2007). Landslide Hazard Mapping at Selangor, Malaysia Using Frequency Ratio and Logistic Regression Models. *Landslides*, 4, 33–41.

- Lerner, D. N. y Harris, B. (2009). The Relationship between Land Use and Groundwater Resources and Quality. *Land use policy*, 26, S265--S273.
- Mallick, J.; Khan, R. A.; Ahmed, M.; Alqadhi, S. D.; Alsubih, M.; Falqi, I. y Hasan, M. A. (2019). Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques. *Water*, 11, 2656.
- Manap, M. A.; Nampak, H.; Pradhan, B.; Lee, S.; Sulaiman, W. N. A. y Ramli, M. F. (2014). Application of Probabilistic-Based Frequency Ratio Model in Groundwater Potential Mapping Using Remote Sensing Data and GIS. *Arab. J. Geosci.*, 7, 711–724.
- Marocco, R.; Delfaud, J. y Lavenu, A. (1985). Ambiente Depositional de Una Cuenca Continental Intramontañosa Andina: El Grupo Moquegua (Sur de Perú) Primeros Resultados. *Soc. Geológica del Perú*.
- McKay, C. P.; Friedmann, E. I.; Gómez-Silva, B.; Cáceres-Villanueva, L.; Andersen, D. T. y Landheim, R. (2003). Temperature and Moisture Conditions for Life in the Extreme Arid Region of the Atacama Desert: Four Years of Observations Including the El Niño of 1997–1998. *Astrobiology*, 3, 393–406.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). Informe Nacional del Estado del Ambiente: Diagnóstico de la Situación Ambiental en la Región Tacna. Lima: MINAM.
- Mokarram, M.; Roshan, G. y Negahban, S. (2015). Landform Classification Using Topography Position Index (Case Study: Salt Dome of Korsia-Darab Plain, Iran). *Model. Earth Syst. Environ.*, 1, 40.

- Moodley, T.; Seyam, M.; Abunama, T. y Bux, F. (2022). Delineation of Groundwater Potential Zones in KwaZulu-Natal, South Africa Using Remote Sensing, GIS and AHP. *J. African Earth Sci.*, 193, 104571.
- Narvaez-Montoya, C.; Torres-Martínez, J. A.; Pino-Vargas, E.; Cabrera-Olivera, F.; Loge, F. J.; Mahlkecht, J. (2022). Predicting Adverse Scenarios for a Transboundary Coastal Aquifer System in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Sci. Total Environ.*, 806, 150386.
- Nigussie, W.; Hailu, B. T. y Azagegn, T. (2019). Mapping of Groundwater Potential Zones Using Sentinel Satellites (-1 SAR and -2A MSI) Images and Analytical Hierarchy Process in Ketar Watershed, Main Ethiopian Rift. *J. African Earth Sci.*, 160, 103632.
- Peña, F.; Cotrina, G. y Acosta, H. (2009). Hidrogeología de La Cuenca Del Río Caplina - Región Tacna - (Boletín H 1). *Inst. Geológico, Min. y Met. - INGEMMET*.
- Pino, E.; Chávarri, E. y Ramos, L. (2018). Crisis de Gobernanza y Gobernabilidad y Sus Implicancias En El Uso Inadecuado Del Agua Subterránea, Caso Acuífero Costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*.
- Pino, E. (2019). El Acuífero Costero La Yarada, Después de 100 Años de Explotación Como Sustento de Una Agricultura En Zonas Áridas: Una Revisión Histórica. *Idesia (Arica)*, 37, 39–45.
- Pino, E. (2021). Conflictos Por El Uso Del Agua En Una Región Árida: Caso Tacna, Perú. *Diálogo Andin.*, No. 65, 405–415.

- Pino, E. y Chávarri, E. (2022). Evidencias de Cambio Climático En La Región Hiperárida de La Costa Sur de Perú, Cabecera Del Desierto de Atacama. *Tecnol. y ciencias del agua*, 13, 1–34.
- Pino, E.; Ramos, L.; Avalos, O.; Tacora, P.; Chávarri, E.; Angulo, O.; Ascencios, D. y Mejía, J. (2019). Factores Que Inciden En El Agotamiento y La Contaminación Por Intrusión Marina En El Acuífero Costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnol. y ciencias del agua*, 10, 177–213.
- Pino, E.; Ramos, L.; Mejía, J.; Chávarri, E. y Ascencios, D. (2020). Mitigation Measures for the La Yarada Coastal Aquifer, an Overexploited System in Arid Areas. *Idesia*, 38.
- Pino, E.; Tacora, P.; Steenken, A.; Alfaro, L.; Valle, A.; Chávarri, E.; Ascencios, D. y Mejía Marcacuzco, J. (2017). Effect of Environmental and Geological Characteristics on Water Quality in the Caplina River Basin, Tacna, Peru. *Tecnol. y Ciencias del Agua*, 8, 77–99.
- Pino-Vargas, E. y Ascencios-Templo, D. (2021). La Implementación de Veda Como Una Herramienta Para Controlar La Degradación Del Acuífero Costero La Yarada, Tacna, Perú. *Diálogo Andin.*, No. 66, 489–496.
- Pino-Vargas, E.; Chávarri-Velarde, E.; Ingol-Blanco, E.; Mejía, F.; Cruz, A. y Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9, 10.
- Pino-Vargas, E.; Guevara-Pérez, E. y Avendaño-Jihuallanga, C. (2021). Evolución Histórica de La Conceptualización Hidrogeológica y Del Uso

- Del Acuífero Caplina Ubicado En El Borde Norte Del Desierto de Atacama. *Rev. Ing. UC*, 28, 378–391.
- Pino-Vargas, E. y Huayna, G. (2022). Spatial and Temporal Evolution of Olive Cultivation Due to Pest Attack, Using Remote Sensing and Satellite Image Processing. *Sci. Agropecu.*, 13, 149–157.
- Pino-Vargas, E.; Taya-Acosta, E.; Ingol-Blanco, E. y Torres-Rúa, A. (2022). Deep Machine Learning for Forecasting Daily Potential Evapotranspiration in Arid Regions, Case: Atacama Desert Header. *Agriculture*, 12, 1971.
- Pino-Vargas, E.; Espinoza-Molina, J.; Chávarri-Velarde, E.; Quille-Mamani, J. e Ingol-Blanco, E. Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert. *Water* 2023, 15, 2610.
- Pothiraj, P. y Rajagopalan, B. (2013). A GIS and Remote Sensing Based Evaluation of Groundwater Potential Zones in a Hard Rock Terrain of Vaigai Sub-Basin, India. *Arab. J. Geosci.*, 6, 2391–2407.
- Rejith, R. G.; Anirudhan, S. y Sundararajan, M. (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain Using Integrated Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques: A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Elsevier, pp 349–364.
- Rundel, P. W.; Dillon, M. O.; Palma, B.; Mooney, H. A.; Gulmon, S. L. y Ehleringer, J. R. (1991). The Phytogeography and Ecology of the Coastal Atacama and Peruvian Deserts. *Aliso*, 13, 1–49.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.

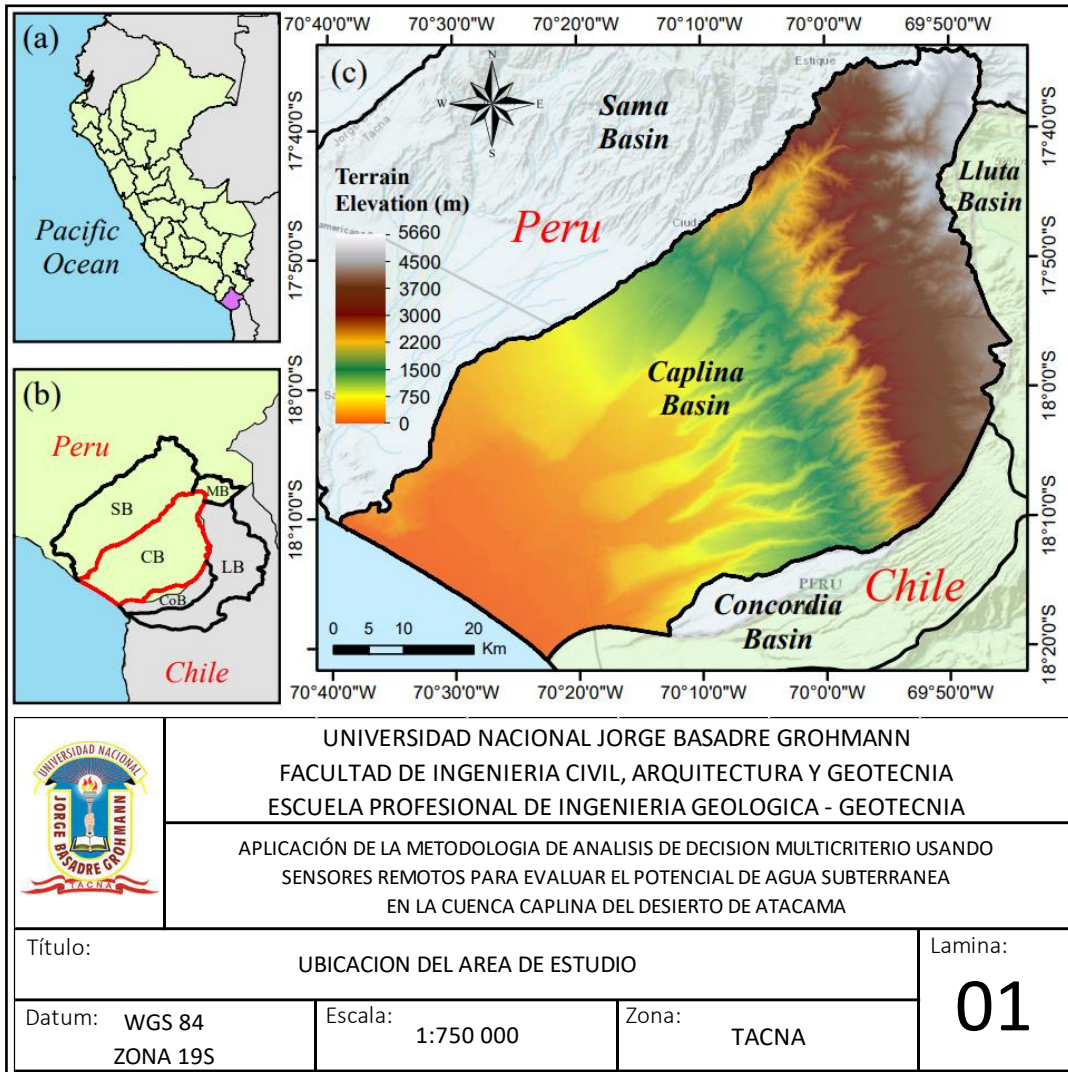
- Saaty, T. L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Manage. Sci.*, 32, 841–855.
- Saaty, T. L. (1988). What Is the Analytic Hierarchy Process? In *Mathematical Models for Decision Support. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg*, pp 109–121.
- Sanchez, A.; Rosell, W. y Raymundo, T. (2000). Memoria Explicativa de La Revisión Geológica En Los Cuadrángulos de Punta de Bombón (35-s), Clemesí (35-t), Ilo (36-t), Locumba (36-u), La Yarada (37-u), Tacna (37-v), Huaylillas (37-x), Juli (33-y), Pizacoma(34-y) e Isla Anápiá (33-z) (Escala 1:100 000). *Inst. Geológico, Min. y Met. – INGEMMET*.
- Sappa, G.; De Filippi, F. M.; Ferranti, F. y Iacurto, S. (2019). Environmental Issues and Anthropic Pressures in Coastal Aquifers: A Case Study in Southern Latium Region. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.*
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2020). CLIMAS DEL PERÚ Mapa de Clasificación Climática Nacional. Lima: SENAMHI.
- Scanlon, B. R.; Keese, K. E.; Flint, A. L.; Flint, L. E.; Gaye, C. B.; Edmunds, W. M. y Simmers, I. (2006). Global Synthesis of Groundwater Recharge in Semiarid and Arid Regions. *Hydrol. Process.*, 20, 3335–3370.
- Shekhar, S. y Pandey, A. C. (2015). Delineation of Groundwater Potential Zone in Hard Rock Terrain of India Using Remote Sensing, Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Techniques. *Geocarto Int.*, 30, 402–421.

- Shrestha, R. M. y Sthapit, A. B. (2016). Temporal Variation of Rainfall in the Bagmati River Basin, Nepal. *Nepal J. Sci. Technol.*, 16, 31–40.
- Sivaprakasam, P. y Angamuthu, M. (2023). Generalized Z-fuzzy soft  $\beta$ -covering based rough matrices and its application to MAGDM problem based on AHP method. *Decision Making: Applications in Management and Engineering.*, 7.
- Strahler, A. N. (1964). Part II. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. *Handb. Appl. Hydrol.*, 4–39.
- Tapia-Villaseñor, E. M.; Shamir, E.; Cruz-Ayala, M.-B. y Megdal, S. B. (2022). Assessing Groundwater Withdrawal Sustainability in the Mexican Portion of the Transboundary Santa Cruz River Aquifer. *Water*, 14, 233.
- Tehrany, M. S.; Pradhan, B. y Jebur, M. N. (2014). Flood Susceptibility Mapping Using a Novel Ensemble Weights-of-Evidence and Support Vector Machine Models in GIS. *J. Hydrol.*, 512, 332–343.
- Tehrany, M. S.; Pradhan, B.; Mansor, S. y Ahmad, N. (2015). Flood Susceptibility Assessment Using GIS-Based Support Vector Machine Model with Different Kernel Types. *CATENA*, 125, 91–101.
- Thomas, A.; Sharma, P. K.; Sharma, M. K. y Sood, A. (1999). Hydrogeomorphological Mapping in Assessing Ground Water by Using Remote Sensing Data — A Case Study in Lehra Gaga Block, Sangrur District, Punjab. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 27, 31–42.
- Tiwari, A. y Rai, B. (1996). Hydromorphogeological Mapping for Groundwater Prospecting Using Landsat-MSS Images — A Case Study of Part of Dhanbad District, Bihar. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 24, 281–285.

- Uc Castillo, J. L.; Martínez Cruz, D. A.; Ramos Leal, J. A.; Tuxpan Vargas, J.; Rodríguez Tapia, S. A. y Marín Celestino, A. E. (2022). Delineation of Groundwater Potential Zones (GWPZs) in a Semi-Arid Basin through Remote Sensing, GIS, and AHP Approaches. *Water*, 14, 2138.
- Vera, A.; Pino-Vargas, E.; Verma, M. P.; Chucuya, S.; Chávarri, E.; Canales, M.; Torres-Martínez, J. A.; Mora, A. y Mahlkecht, J. (2021). Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Stable Isotope Geochemistry to Assess Temporal Behavior of Seawater Intrusion in the La Yarada Aquifer in the Vicinity of Atacama Desert, Tacna, Peru. *Water*, 13, 3161.
- Vera, A.; Verma, M. P.; Pino-Vargas, E. y Huayna, G. (2022). Metodología de Ponderación Morfométrica e Hidrogeoquímica Para Clasificar La Susceptibilidad a La Meteorización Química En Las Subcuencas Del Río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnol. y ciencias del agua*, 13, 276–340.
- Wheater, H.; Mathias, S. y Li, X. (2010). Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. *Cambridge University Press*, Vol. 9780521111.
- Yousif, M.; Sabet, H. S.; Ghouhachi, S. Y. y Aziz, A. (2018). Utilizing the Geological Data and Remote Sensing Applications for Investigation of Groundwater Occurrences, West El Minia, Western Desert of Egypt. *NRIAG J. Astron. Geophys.*, 7, 318–333.
- Zevenbergen, L. W. y Thorne, C. R. (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surf. Process. Landforms*, 12, 47–56.

# **ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**UBICACIÓN DEL ÁREA DE**  
**ESTUDIO**



**ANEXO 2**  
**CODIFICACIÓN EN GOOGLE**  
**EARTH ENGINE**

```

var area = ee.FeatureCollection("users/vpoccor/caplina"),
    slop =
{"opacity":1,"bands":["slope"],"min":0.6168492138385773,"max":
13.936958104372025,"palette":["b1d4ff","0e20ff","ffd7ba","ff62
25","ffcd18","ff0047"]};

// SLOPE
var DEM = ee.Image("NASA/NASADEM_HGT/001")
var elevacion = DEM.select("elevation")
var trabajo = elevacion.clip(area)

var slope = ee.Terrain.slope(trabajo)
Map.addLayer(slope,slop,"ESLOPE", false)

Map.centerObject(area,8)

//
+++++
+++++
++++
// LAND COVER
// Define a dictionary which will be used to make legend and
visualize image on map

var esri_lulc10 = ee.ImageCollection("projects/sat-io/open-
datasets/landcover/ESRI_Global-LULC_10m")
var dict = {
  "names": [
    "agua",
    "arboles",
    "cesped",
    "bofedal",
    "cultivos",
    "matorral",
    "Area construida",
    "Suelo Desnudo",
    "nieve",
    "nubes"
  ],
  "colors": [
    "#1A5BAB",
    "#358221",
    "#A7D282",
    "#87D19E",
    "#FFDB5C",
    "#EECF8",
    "#ED022A",
    "#EDE9E4",
    "#F2FAFF",
    "#C8C8C8"
  ]
};

// Create a panel to hold the legend widget

```

```

var legend = ui.Panel({
  style: {
    position: 'bottom-left',
    padding: '8px 15px'
  }
});

// Function to generate the legend
function addCategoricalLegend(panel, dict, title) {

  // Create and add the legend title.
  var legendTitle = ui.Label({
    value: title,
    style: {
      fontWeight: 'bold',
      fontSize: '18px',
      margin: '0 0 4px 0',
      padding: '0'
    }
  });
  panel.add(legendTitle);

  var loading = ui.Label('Loading legend...', {margin: '2px 0 4px 0'});
  panel.add(loading);

  // Creates and styles 1 row of the legend.
  var makeRow = function(color, name) {
    // Create the label that is actually the colored box.
    var colorBox = ui.Label({
      style: {
        backgroundColor: color,
        // Use padding to give the box height and width.
        padding: '8px',
        margin: '0 0 4px 0'
      }
    });
    // Create the label filled with the description text.
    var description = ui.Label({
      value: name,
      style: {margin: '0 0 4px 6px'}
    });
    return ui.Panel({
      widgets: [colorBox, description],
      layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
    });
  };

  // Get the list of palette colors and class names from the
  image.
  var palette = dict['colors'];
  var names = dict['names'];

```

```

loading.style().set('shown', false);

for (var i = 0; i < names.length; i++) {
  panel.add(makeRow(palette[i], names[i]));
}

Map.add(panel);
}

addCategoricalLegend(legend, dict, 'ESRI 2020 Land Cover');
Map.addLayer(esri_lulc10.mosaic().clip(area), {min:1, max:10,
palette:dict['colors']}, 'ESRI LULC 10m',false)

//
+++++
+++++
// RAINFAIL USAR CLIMATE

var prec =
ee.ImageCollection("IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE").select('pr').f
ilterBounds(area).filter(ee.Filter.date('2020-01-01', '2020-
12-31'));
var sump91 = prec.reduce(ee.Reducer.sum()).clip(area);
var sumr = sump91.float();

//
+++++
+++++

// Drainage Density and Drainage lineaments PCA
function maskL8sr(image) {
  // Bit 0 - Fill
  // Bit 1 - Dilated Cloud
  // Bit 2 - Cirrus
  // Bit 3 - Cloud
  // Bit 4 - Cloud Shadow
  var qaMask =
image.select('QA_PIXEL').bitwiseAnd(parseInt('11111',
2)).eq(0);
  var saturationMask = image.select('QA_RADSAT').eq(0);

  // Apply the scaling factors to the appropriate bands.
  var opticalBands =
image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
  var thermalBands =
image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);

  // Replace the original bands with the scaled ones and apply
the masks.
  return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .addBands(thermalBands, null, true)
    .updateMask(qaMask)
    .updateMask(saturationMask);
}

```

```

}

// Map the function over one year of data.
var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
    .filterDate('2020-01-01', '2020-12-31')
    .map(function (recorte) {return
recorte.clip(area)})
    .map(maskL8sr)
    .median()

Map.addLayer(collection)

// Export.image.toDrive({
//   image:rainfail,
//   description:"RAINFAIL",
//   region:area,
//   scale:4638.3,
//   maxPixels:1e9,

// })

Export.image.toDrive({
  image: esri_lulc10.mosaic().clip(area),
  description: 'landcover',
  folder: 'landcover',
  region: area,
  crs: 'EPSG:4326',
  scale: 30
});

```

# **ANEXO 3**

## **DATA DE POZOS**

FID	CÓDIGO	TIPO	FECCENSO	LATITUD	LONGITUD
0	IRHS-23-01-01-142	Pozo tajo abierto	09/09/2009	-18,215042	-70,558132
1	IRHS-23-01-01-30	Pozo tubular	20/08/2009	-18,184917	-70,508377
2	IRHS-23-01-01-26	Pozo tubular	20/08/2009	-18,181678	-70,511157
3	IRHS-23-01-01-73	Pozo tubular	07/10/2009	-18,199686	-70,521484
4	IRHS-23-01-01-24	Pozo tubular	21/08/2009	-18,192045	-70,523413
5	IRHS-23-01-01-35	Pozo mixto	21/08/2009	-18,204444	-70,534497
6	IRHS-23-01-01-33	Pozo tajo abierto	15/09/2009	-18,200618	-70,544012
7	IRHS-23-01-01-228	Pozo mixto	18/09/2009	-18,225767	-70,549283
8	IRHS-23-01-01-110	Pozo tajo abierto	18/09/2009	-18,226232	-70,549854
9	IRHS-23-01-01-168	Pozo tubular	18/08/2009	-18,179584	-70,462975
10	IRHS-23-01-01-147	Pozo tubular	18/08/2009	-18,183523	-70,467867
11	IRHS-23-01-01-348	Pozo tajo abierto	07/12/2009	-18,269828	-70,480376
12	IRHS-23-01-01-324	Pozo tajo abierto	12/10/2009	-18,259222	-70,483568
13	IRHS-23-01-01-325	Pozo tajo abierto	14/10/2009	-18,26211	-70,485181
14	IRHS-23-01-01-226	Pozo tajo abierto	17/09/2009	-18,234228	-70,487185
15	IRHS-23-01-01-174	Pozo tajo abierto	14/09/2009	-18,258387	-70,488743
16	IRHS-23-01-01-2	Pozo tajo abierto	11/09/2009	-18,257939	-70,496381
17	IRHS-23-01-01-16	Pozo mixto	25/08/2009	-18,202194	-70,502484
18	IRHS-23-01-01-227	Pozo tubular	17/09/2009	-18,230324	-70,50351
19	IRHS-23-01-01-252	Pozo tajo abierto	15/10/2009	-18,304784	-70,431017
20	IRHS-23-01-01-116	Pozo tajo abierto	19/08/2009	-18,170861	-70,434658
21	IRHS-23-01-01-249	Pozo mixto	09/10/2009	-18,27925	-70,439264
22	IRHS-23-01-01-77	Pozo tajo abierto	20/10/2009	-18,216027	-70,44504

23	IRHS-23-01-01-341	Pozo tajo abierto	07/12/2009	-18,285876	-70,457905
24	IRHS-23-01-01-342	Pozo tajo abierto	07/12/2009	-18,285119	-70,458807
25	IRHS-23-01-01-354	Pozo tajo abierto	10/12/2009	-18,279413	-70,461795
26	IRHS-23-01-01-292	Pozo tajo abierto	12/11/2009	-18,326616	-70,397959
27	IRHS-23-01-01-290	Pozo tajo abierto	12/11/2009	-18,315912	-70,4109
28	IRHS-23-01-01-291	Pozo tajo abierto	12/11/2009	-18,316706	-70,412279
29	IRHS-23-01-01-124	Pozo tajo abierto	19/08/2009	-18,172267	-70,424318
30	IRHS-23-01-01-357	Pozo tajo abierto	11/12/2009	-18,142959	-70,354717
31	IRHS-23-01-01-243	Pozo mixto	05/10/2009	-18,276028	-70,36983
32	IRHS-23-01-01-316	Pozo tubular	23/10/2009	-18,203337	-70,370405
33	IRHS-23-01-01-365	Pozo mixto	15/12/2009	-18,286761	-70,387565
34	IRHS-23-01-01-299	Pozo tajo abierto	19/11/2009	-18,332616	-70,394156
35	IRHS-23-01-04-180	Pozo mixto	20/11/2009	-17,994224	-70,236512
36	IRHS-23-01-10-175	Pozo tubular	10/11/2009	-18,082508	-70,240228
37	IRHS-23-01-01-179	Pozo tubular	04/12/2009	-18,023829	-70,247751
38	IRHS-23-01-10-1	Pozo tubular	10/11/2009	-18,087579	-70,252481
39	IRHS-23-01-01-171	Pozo tubular	30/11/2009	-18,062855	-70,321593
40	IRHS-23-01-01-333	Pozo mixto	02/12/2009	-18,299109	-70,331083
41	IRHS-23-01-01-187	Pozo tubular	11/12/2009	-18,265929	-70,340014
42	IRHS-23-01-01-315	Pozo mixto	02/12/2009	-18,298038	-70,344669
43	IRHS-23-01-01-335	Pozo mixto	02/12/2009	-18,290949	-70,347783
44	IRHS-23-01-08-176	Pozo tubular	11/11/2009	-18,006605	-70,227985
45	IRHS-23-01-01-164	Pozo tajo abierto	18/09/2009	-18,223149	-70,554517

46	IRHS-23-01-01-306	Pozo mixto	18/09/2009	-18,210842	-70,555722
47	IRHS-23-01-01-230	Pozo tajo abierto	22/09/2009	-18,215967	-70,565421
48	IRHS-23-01-01-165	Pozo tajo abierto	16/09/2009	-18,205876	-70,567439
49	IRHS-23-01-01-233	Pozo tajo abierto	22/09/2009	-18,212994	-70,569923
50	IRHS-23-01-01-13	Pozo tubular	26/08/2009	-18,211511	-70,509315
51	IRHS-23-01-01-46	Pozo mixto	08/09/2009	-18,206497	-70,516069
52	IRHS-23-01-01-38	Pozo mixto	27/08/2009	-18,214738	-70,528564
53	IRHS-23-01-01-220	Pozo tajo abierto	16/09/2009	-18,221758	-70,532039
54	IRHS-23-01-01-214	Pozo tajo abierto	25/08/2009	-18,233345	-70,533805
55	IRHS-23-01-01-92	Pozo mixto	09/09/2009	-18,229375	-70,539935
56	IRHS-23-01-01-47	Pozo mixto	09/09/2009	-18,216098	-70,545935
57	IRHS-23-01-01-215	Pozo tubular	22/07/2009	-18,157554	-70,463094
58	IRHS-23-01-01-68	Pozo tubular	17/08/2009	-18,165704	-70,47614
59	IRHS-23-01-01-328	Pozo mixto	14/09/2009	-18,247882	-70,480076
60	IRHS-23-01-01-217	Pozo mixto	14/09/2009	-18,223322	-70,484842
61	IRHS-23-01-01-304	Pozo tubular	11/09/2009	-18,246594	-70,491177
62	IRHS-23-01-01-12	Pozo mixto	08/09/2009	-18,220002	-70,505048
63	IRHS-23-01-01-192	Pozo tajo abierto	15/10/2009	-18,303175	-70,433501
64	IRHS-23-01-01-63	Pozo mixto	20/10/2009	-18,217233	-70,435992
65	IRHS-23-01-01-256	Pozo tubular	19/10/2009	-18,23494	-70,437745
66	IRHS-23-01-01-80	Pozo tajo abierto	13/10/2009	-18,300655	-70,440509
67	IRHS-23-01-01-69	Pozo tubular	17/08/2009	-18,173768	-70,451857
68	IRHS-23-01-01-84	Pozo tajo abierto	19/11/2009	-18,332204	-70,397427

69	IRHS-23-01-01-246	Pozo tubular	09/10/2009	-18,278381	-70,397969
70	IRHS-23-01-01-255	Pozo tubular	16/10/2009	-18,302773	-70,406149
71	IRHS-23-01-01-318	Pozo tajo abierto	19/09/2009	-18,173247	-70,412661
72	IRHS-23-01-01-285	Pozo tajo abierto	12/11/2009	-18,308253	-70,412948
73	IRHS-23-01-01-254	Pozo tajo abierto	15/10/2009	-18,305744	-70,421063
74	IRHS-23-01-01-152	Pozo tubular	23/11/2009	-18,307885	-70,355133
75	IRHS-23-01-01-188	Pozo tubular	01/12/2009	-18,183772	-70,362973
76	IRHS-23-01-01-314	Pozo mixto	02/12/2009	-18,31067	-70,363858
77	IRHS-23-01-01-317	Pozo tubular	01/12/2009	-18,180385	-70,380397
78	IRHS-23-01-01-198	Pozo tajo abierto	20/11/2009	-18,334166	-70,394812
79	IRHS-23-01-01-173	Pozo tubular	04/12/2009	-18,015689	-70,255835
80	IRHS-23-01-01-327	Pozo tajo abierto	09/12/2009	-18,089472	-70,290224
81	IRHS-23-01-01-182	Pozo tubular	09/11/2009	-18,072219	-70,291931
82	IRHS-23-01-01-87	Pozo tubular	30/11/2009	-18,051071	-70,296443
83	IRHS-23-01-01-149	Pozo tubular	10/12/2009	-18,103086	-70,304337
84	IRHS-23-01-01-90	Pozo tajo abierto	26/11/2009	-18,186629	-70,329188
85	IRHS-23-01-01-131	Pozo tubular	26/11/2009	-18,186216	-70,330168
86	IRHS-23-01-01-150	Pozo tubular	27/11/2009	-18,100608	-70,336239
87	IRHS-23-01-08-3	Pozo tubular	10/11/2009	-18,001304	-70,208625
88	IRHS-23-01-08-4	Pozo tubular	10/11/2009	-17,998066	-70,216337
89	IRHS-23-01-01-209	Pozo tubular	04/12/2009	-18,019191	-70,234051
90	IRHS-23-01-01-231	Pozo tajo abierto	22/09/2009	-18,215047	-70,566339
91	IRHS-23-01-01-207	Pozo tubular	16/09/2009	-18,200569	-70,56672

92	IRHS-23-01-01-183	Pozo tajo abierto	15/09/2009	-18,210051	-70,571768
93	IRHS-23-01-01-14	Pozo mixto	26/08/2009	-18,211411	-70,509361
94	IRHS-23-01-01-21	Pozo mixto	27/08/2009	-18,191782	-70,50975
95	IRHS-23-01-01-29	Pozo mixto	27/08/2009	-18,190598	-70,510922
96	IRHS-23-01-01-25	Pozo mixto	21/08/2009	-18,190257	-70,527831
97	IRHS-23-01-01-8	Pozo mixto	09/09/2009	-18,237184	-70,528316
98	IRHS-23-01-01-241	Pozo mixto	09/09/2009	-18,210442	-70,531316
99	IRHS-23-01-01-109	Pozo tajo abierto	18/09/2009	-18,224361	-70,546585
100	IRHS-23-01-01-45	Pozo mixto	03/09/2009	-18,196969	-70,547147