

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS ÁRIDAS DE LA
CORDILLERA NEGRA MEDIANTE TELEDETECCIÓN”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

MILAGROS CONDORI VENTURA

LIMA – PERÚ

2023

Tesis Mi Lagros Condori Ventura

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	ciencialatina.org Fuente de Internet	2%
2	pt.scribd.com Fuente de Internet	1%
3	hidrologia.usal.es Fuente de Internet	<1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repository.unimilitar.edu.co Fuente de Internet	<1%

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS ÁRIDAS DE LA
CORDILLERA NEGRA MEDIANTE TELEDETECCIÓN”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. MILAGROS CONDORI VENTURA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EUSEBIO MERCEDES INGOL BLANCO
Presidente

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO
Asesor

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR
Miembro

Mg.Sc. DOMINGO MARCELO PORTUGUEZ MAURTUA
Miembro

LIMA – PERÚ

2023

DEDICO ESTA TESIS

El presente trabajo es dedicado a mis padres, Celso Condori y Yolitha Ventura; por haber sido los pilares fundamentales en este camino de mi formación profesional.

Mis hermanos, Juan Manuel, Mariela y Mateus; por demostrarme su cariño y apoyo en los momentos buenos y malos.

Mis amigos Brenda, Fiorella y Geramin por permitirme aprender más de la vida universitaria a su lado.

Esto fue posible gracias a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Agrícola (UIFIA) por patrocinar mi trabajo de investigación.

Asimismo, deseo expresar mi extensa gratitud a mi asesor Mg. Sc. Guillermo Clemente Aguilar Giraldo, por brindarme la oportunidad de conocer más de las aguas subterráneas y los valiosos consejos, confianza e inspirarme a mejorar cada día como profesional.

Finalmente, un especial agradecimiento a los pobladores del distrito de Pampas a por apoyarme en la etapa de campo del presente trabajo de investigación.

INDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1. 1. OBJETIVOS	2
1. 1. 1. Objetivo general.....	2
1. 1. 2. Objetivos Específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2. 1. AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	3
2. 2. ACUÍFERO	5
2. 2. 1. Acuíferos libres	5
2. 2. 2. Acuíferos confinados	6
2. 2. 3. Acuífero semiconfinado	7
2. 3. Teledetección	7
2. 3. 1. Satélite Alos Palsar	8
2. 3. 2. Satélite Sentinel.....	10
2. 4. Modelo digital de elevación.....	11
2. 5. Densidad de drenaje.....	12
2. 6. Precipitación	13
2. 7. Datos dudosos	13
2. 8. Clasificación no supervisada	13
2. 9. Matriz de Saaty	14
2. 10. Superposición ponderada.....	15
2. 11. Geofísica aplicada a hidrología.....	16
III. METODOLOGÍA.....	18
3. 1. Características generales de la zona de estudio	18
3. 1. 1. Ubicación política	18
3. 1. 2. Ubicación geográfica	18
3. 1. 3. Ubicación geográfica	18
3. 1. 4. Clima.....	20
3. 1. 5. Aspectos socioeconómicos	21
3. 1. 6. Geología	21
3. 2. Materiales y equipos	23

3. 2. 1. Materiales	23
3. 2. 2. Equipos y software	23
3. 3. Metodología	23
3. 4. Fase de gabinete	23
3. 4. 1. Recopilación de la Información	23
3. 4. 2. Integración de mapas	63
3. 4. 3. Generación del mapa para la prospección de aguas subterráneas	68
3. 5. Etapa de campo	72
3. 5. 1. Reconocimiento de campo	73
3. 5. 2. Ubicación de puntos	75
3. 5. 3. Característica de operación	78
3. 5. 4. Trabajo de gabinete	78
3. 5. 5. Verificación de resultados	79
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
4. 1. Transformación temática generada	86
4. 1. 1. Precipitación	86
4. 1. 2. Densidad de drenaje	89
4. 1. 3. Pendiente	91
4. 1. 4. Combinación de bandas de imágenes multiespectrales	93
4. 1. 5. Uso actual de suelos	96
4. 1. 6. Suelos	100
4. 1. 7. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	103
4. 2. Delimitación de zonas con potencial de agua subterráneas	105
4. 3. Análisis de sensibilidad	112
4. 4. Validación	121
4. 5. Discusiones	128
4. 5. 1. Alcances y limitaciones:	129
4. 5. 2. Mejoras en la metodología y variables adicionales:	130
V. CONCLUSIONES	132
VI. RECOMENDACIONES	134
VII. BIBLIOGRAFÍA	135
VIII. ANEXOS	144

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Sistema de aguas subterráneas, áreas de carga y descarga	3
Figura 2:	Tipos de acuíferos.....	5
Figura 3:	Representación de un acuífero libre	6
Figura 4:	Representación de un acuífero confinado.....	6
Figura 5:	Representación gráfica de los acuíferos	7
Figura 6:	Componentes de un sistema de teledetección.....	8
Figura 7:	Imagen del Ministerio de Industria de Japón (METI)	12
Figura 8:	Ilustración de la función de Overlay Weight.....	15
Figura 9:	Modelo de superposición ponderada	15
Figura 10:	Componentes principales de la sección geoelectrica.....	17
Figura 11:	Ubicación de la provincia de Huaraz, departamento de Ancash	19
Figura 12:	Ubicación del área de estudio	19
Figura 13:	Modelo de integración	24
Figura 14:	Curvas de Precipitación – Duración – Frecuencia en el punto de aforo del área de estudio	25
Figura 15:	Estaciones meteorológicas y polígono de Thiessen	26
Figura 16:	Observatorio del Agua – ANA, Cuenca Casma	27
Figura 17:	Observatorio del Agua – ANA, Cuenca Culebra	27
Figura 18:	Estaciones meteorológicas para descarga de datos de SENAMHI.....	28
Figura 19:	Longitud de registro por estación meteorológica	29
Figura 20:	Vector regional de las estaciones.....	31
Figura 21:	Índice acumulado para las estaciones del área de estudio	34
Figura 22:	Fecha de Quiebre para la estación Cajamarquilla	35
Figura 23:	Figura 23: Fecha de quiebre para la estación La merced.....	36
Figura 24:	Vector regional de las estaciones.....	41
Figura 25:	Análisis de doble masa entre el vector y las estaciones	42
Figura 26:	Precipitación media en el área de estudio.....	43
Figura 27:	Fuente de descargas de imágenes Alos Palsar	44
Figura 28:	Fuente para descargar imágenes Sentinel	45
Figura 29:	Densidad de drenaje.....	47
Figura 30:	Variación espacial de las pendientes del terreno	49
Figura 31:	Fallas normales en el área de estudio - Huanchay	55

Figura 32: Fallas normales en el área de estudio - Pampas Grande.....	56
Figura 33: Mapa geológico y estructural.....	57
Figura 34: Integración de mapas en Model Builder.....	71
Figura 35: Ubicación de los electrodos.....	75
Figura 36: Armado de electrodos con el cable y posición del punto óptimo.....	76
Figura 37: Ubicación de puntos de exploración geofísica.....	77
Figura 38: Esquema del proceso de sondeo geofísico y disposición de los electrodos.....	77
Figura 39: Detector de agua subterránea.....	78
Figura 40: Sección geoelectrica – sondaje 1.....	79
Figura 41: Sección geoelectrica – sondaje 2.....	80
Figura 42: Sección geoelectrica – sondaje 3.....	81
Figura 43: Sección geoelectrica – sondaje 4.....	81
Figura 44: Sección geoelectrica – sondaje 5.....	82
Figura 45: Sección geoelectrica – sondaje 6.....	83
Figura 46: Sección geoelectrica – sondaje 7.....	83
Figura 47: Sección geoelectrica – sondaje 8.....	84
Figura 48: Puntos de afloramiento de agua subterránea y ubicación de puntos de exploración geofísica.....	85
Figura 49: Mapa de precipitación clasificada.....	88
Figura 50: Mapa de densidad de drenaje clasificada.....	90
Figura 51: Mapa de pendiente clasificada.....	92
Figura 52: Mapa de litología y fallas clasificada.....	95
Figura 53: Mapa de uso actual de suelos clasificado.....	99
Figura 54: Distribución porcentual por texturas de suelos.....	100
Figura 55: Clasificación del tipo de suelo.....	102
Figura 56: Mapa de NDVI en periodo seco año 2021 clasificado.....	104
Figura 57: Mapa de probabilidad de zonas de agua subterránea en la zona de estudio.....	107
Figura 58: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea con puntos de evaluación usados para validar.....	110
Figura 59: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea.....	111
Figura 60: Variación de las categorías al varias la precipitación.....	112
Figura 61: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 20%).....	113
Figura 62: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	

(precipitación 26%)	114
Figura 63: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	
(precipitación 30%)	115
Figura 64: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	
(precipitación 40%)	116
Figura 65: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	
(precipitación 45%)	117
Figura 66: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación	
50%)	118
Figura 67: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	
(precipitación 55%)	119
Figura 68: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas	
(precipitación 60%)	120
Figura 69: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea con	
fuentes superficiales usados para validar.....	127
Figura 70: Curva ROC	128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del satélite ALOS PALSAR.....	10
Tabla 2: Características de las bandas espectrales de los sensores MSI.....	11
Tabla 3: Clasificación de la red de drenaje de las cuencas	12
Tabla 4: Escala de preferencias	14
Tabla 5: Descripción climática para cada distrito del área de estudio.	20
Tabla 6: Información temática de la geología.....	22
Tabla 7: Estaciones cercanas al área de Estudio con mayor influencia	25
Tabla 8: Nivel de significancia por estación en el área de estudio	26
Tabla 9: Estadística del Vectorial Regional	30
Tabla 10: Resultado de pruebas estadísticas sin corrección de las estaciones	33
Tabla 11: Estadísticas del vector regional con datos completos y corrección	40
Tabla 12: Clasificación y ponderación de las precipitaciones	42
Tabla 13: Clasificación y ponderación para la densidad de drenaje	46
Tabla 14: Clasificación y ponderación de las pendientes	48
Tabla 15: Valores de la porosidad (%), según Sanders (1998)	52
Tabla 16: Valores de conductividad hidráulica (m/d).....	53
Tabla 17: Atributos de la litología y conductividad hidráulica.....	55
Tabla 18: Clasificación y ponderación de la litología.....	58
Tabla 19: Características de suelos en la zona de estudio según FAO	60
Tabla 20: Combinación de banda Sentinel-2	61
Tabla 21: Clasificación y ponderación del uso de la tierra según la UGI.....	62
Tabla 22: Clasificación para zonificar la cubierta vegetal de los valores del NDVI	63
Tabla 23: Matriz de comparación de variables	66
Tabla 24: Matriz normalizada de las variables.....	66
Tabla 25: Vector de priorización de las variables	67
Tabla 26: Resultado de los vectores de suma ponderada y priorización.....	67
Tabla 27: Método de integración de mapas	68
Tabla 28: Pesos asignados y normalizados para la zonificación de aguas subterráneas.....	69
Tabla 29: Pobladores guía que acompañaron la visita a campo.....	72
Tabla 30: Reconocimiento de campo en la zona de estudio	74
Tabla 31: Ubicación de puntos de exploración geofísica.....	76
Tabla 32: Clasificación de la precipitación	86

Tabla 33: Clasificación de densidad de drenaje	89
Tabla 34: Clasificación de la variable pendiente	91
Tabla 35: Clasificación y ponderación de la litología.....	93
Tabla 36: Resumen de parámetros geomorfológicos	97
Tabla 37: Clasificación textural de los suelos	101
Tabla 38: Clasificación y ponderación de la variable NDVI	103
Tabla 39: Clasificación de la zona potencial de agua subterránea	105
Tabla 40: Clasificación de la zona potencial de agua subterránea por distritos.....	106
Tabla 41: Inventario de fuentes de agua subterránea y puntos favorables para las perforaciones exploratorias	109
Tabla 42: Fuentes de agua identificados en el área de estudio comparada por la realidad	122
Tabla 43: Nivel de exactitud bajo el criterio de Sweets	128

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Registro de precipitación mensual – estación Cajamarquilla (mm)	144
Anexo 2: Registro de precipitación mensual – Estación Pariacoto (mm)	146
Anexo 3: Registro de precipitación mensual – Estación La Merced (mm).....	148
Anexo 4: Registro de precipitación mensual – Estación Pira(mm).....	150
Anexo 5: Registro de precipitación mensual – Estación Quian(mm)	152
Anexo 6: Análisis Estadístico de las pruebas de “T” de Student y “F” de Fisher – Estación Cajamarquilla.....	154
Anexo 7: Análisis Estadístico de las pruebas de “T” de Student y “F” de Fisher – Estación La Merced	156
Anexo 8: Valores de la distribución de F de Fisher	158
Anexo 9: Características de litología y descripción de las unidades según el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [INGEMMET] (1996).....	159
Anexo 10: Características de suelos según FAO.....	163
Anexo 11: Código en RStudio para NDVI.....	166
Anexo 12: Ponderación y mapa sin considerar NDVI	167
Anexo 13: Mapa para prospectar aguas subterráneas en la zona de estudio	169
Anexo 14: Índice aleatorio de la Matriz de Saaty	170

RESUMEN

El propósito del estudio fue identificar áreas potenciales para la prospección de aguas subterráneas en los distritos de Huanchay, La Libertad y Pampas Grande mediante teledetección. Se evaluaron diversas variables, como precipitación, densidad de drenaje, pendiente, litología, uso de suelo, tipo de suelo e índice de vegetación de diferencia normalizada, obtenidas de fuentes como ANA, Senamhi, MINAM, Geocatmin, así como de las plataformas Alos Palsar y Sentinel – 2A del año 2021. Se utilizó la matriz de Saaty (Proceso Analítico Jerarquizado) para determinar los pesos de cada variable, validándolos con 8 puntos de exploración geoelectrica y 14 afloramientos de agua subterránea.

Los resultados mostraron que en la jurisdicción del distrito de La Libertad, el 0.456% de la superficie (0.677 km²) fue clasificado como "muy alto", seguido por el 82.655% (123.279 km²) como "alto", y el 16.655% (24.771 km²) como "medio". En Huanchay, el 0.001% de la superficie (0.002 km²) fue "muy alto", seguido por el 23.77% (49.76 km²) como "alto", el 70.97% (148.56 km²) como "medio", el 5.254% (10.99 km²) como "pobre" y el 0.001% (0.01 km²) como "muy pobre". Finalmente, en Pampas Grande, el 6.41% del área (23.31 km²) fue clasificado como "alto", el 67.97% (239.52 km²) como "medio", el 25.41% (89.54 km²) como "pobre" y el 0.03% del área (0.011 km²) como "muy pobre".

Estos resultados indican que La Libertad posee las mayores reservas explorables de agua subterránea, seguido por Huanchay y luego Pampas Grande. Se identificaron como variables clave para la categorización la recarga por precipitación, la conductividad hidráulica (geología) y la densidad de drenaje. Tres puntos apropiados para la perforación de pozos de agua subterránea fueron localizados, confirmando los resultados con la exploración geofísica. Además, el inventario de fuentes de agua subterránea se correlacionó con los hallazgos de teledetección.

Palabras Clave: *Potencial de agua subterránea, sensores remotos, escases de agua, sequias, GIS.*

ABSTRACT

The aim of the study was to identify potential areas for groundwater prospecting in the districts of Huanchay, La Libertad, and Pampas Grande using remote sensing. Various variables, including precipitation, drainage density, slope, lithology, land use, soil type, and normalized difference vegetation index, were evaluated. These data were sourced from ANA, Senamhi, MINAM, Geocatmin, as well as the Alos Palsar and Sentinel – 2A platforms for the year 2021. The Saaty matrix (Analytic Hierarchy Process) was employed to determine the weights of each variable, validated with 8 geo-electric exploration points and 14 groundwater outcrops.

Results indicated that in the jurisdiction of La Libertad district, 0.456% of the surface area (0.677 km²) was classified as "very high", followed by 82.655% (123.279 km²) as "high", and 16.655% (24.771 km²) as "medium". In Huanchay, 0.001% of the surface area (0.002 km²) was "very high", followed by 23.77% (49.76 km²) as "high", 70.97% (148.56 km²) as "medium", 5.254% (10.99 km²) as "poor", and 0.001% (0.01 km²) as "very poor". Lastly, in Pampas Grande, 6.41% of the area (23.31 km²) was classified as "high", 67.97% (239.52 km²) as "medium", 25.41% (89.54 km²) as "poor", and 0.03% of the area (0.011 km²) as "very poor".

These findings suggest that La Libertad has the largest exploitable groundwater reserves, followed by Huanchay and then Pampas Grande. Key variables for categorization included precipitation recharge, hydraulic conductivity (geology), and drainage density. Three suitable points for drilling groundwater exploration wells were identified, confirming results with geophysical exploration. Additionally, the groundwater source inventory correlated with remote sensing findings.

Keywords: *Groundwater Potential, Remote sensing, water scarcity, drought, GIS.*

I. INTRODUCCIÓN

La escasez del recurso hídrico es un problema que se viene acelerando en estos últimos tiempos tanto para consumo humano y riego, en particular en la Cordillera Negra, donde la lluvia es la única fuente para la agricultura a pequeña escala y los escasos caudales de los puquiales forman parte de la fuente de agua para el abastecimiento poblacional.

Según los estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), mediante el observatorio del agua, para las zonas bajas de las cuencas Casma y Culebras, se conoce la existencia de acuíferos cuyas reservas de agua vienen siendo explotadas mediante pozos con fines agrícolas. Sin embargo, en zonas sobre los 3600 m de altitud de estas cuencas no hay estudios hidrogeológicos e hidrológicos y menos inventario de fuentes de agua subterránea que podrían hacer uso los pobladores. En consecuencia, es imprescindible localizar fuentes hídricas subterráneas en el ámbito de los distritos de Pampas Grande, Huanchay y La Libertad (sobre los 3600 msnm), haciendo uso de tecnologías de bajo costo como la teledetección y exploración indirecta mediante la geofísica SP (*self-potential*, potencial propio) hasta 500 m de profundidad.

En tal sentido, en el presente trabajo el problema científico se enfoca en la evaluación de la eficacia de la teledetección y la técnica del factor de ponderación para generar mapas potenciales de aguas subterráneas en el área de estudio considerado como un método indirecto accesible con menor costo para una evaluación previa con la posibilidad de encontrar aguas subterráneas. Además, el problema científico incluye la necesidad de validar los resultados obtenidos mediante métodos de prospección geofísica, específicamente el uso del método de potencial espontáneo (*self-potential*) para realizar la verificación en campo mediante la exploración indirecta ubicar puntos para perforación exploratoria de pozos tubulares, en beneficio de los pobladores de los distritos Huanchay, La Libertad y Pampas Grande, siendo este último el que muestra menor disponibilidad de agua.

1. 1. Objetivos

1. 1. 1. Objetivo general.

Ubicar fuentes de agua subterránea en zonas áridas de la Cordillera Negra mediante la teledetección.

1. 1. 2. Objetivos Específicos.

- Caracterización hidrológica, geológico, cobertura vegetal y morfología topográfica en los distritos de Pampas Grande, La Libertad y Huanchay usando teledetección.
- Determinar el factor de ponderación para cada variable y generar el mapa de potencial de agua subterránea
- Zonificar áreas con alta probabilidad para la prospección de aguas subterráneas mediante técnicas de teledetección.
- Validar los resultados mediante el método geofísico de Self-Potential (SP) hasta 500 m de profundidad y el inventario de afloramientos de agua subterránea

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2. 1. Aguas subterráneas

Se considera al agua existente que está bajo la superficie del terreno. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturado completamente los poros y fisuras de las rocas. Esta agua fluye a las superficies de forma natural a través de manantiales, área de rezume, cauces fluviales o al mar (ver Figura 1), los que pueden ser explotados mediante pozos, galerías y otros tipos de captaciones (López-Geta *et al.*, 2009).



Figura 1: Sistema de aguas subterráneas, áreas de carga y descarga.

Fuente: López-Geta et al. (2009).

De la Ley de recursos Hídricos, ley N° 29338 se considera aguas subterráneas las que, dentro del ciclo hidrológico, están en la etapa de circulación o almacenadas debajo de la superficie del terreno y dentro del medio poroso, fracturas de las rocas u otras formaciones geológicas,

que para su extracción y utilización se requiere la realización de obras específicas (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2019).

Desde el punto de vista de su explotación, debemos diferenciar una serie de características entre aguas superficiales y subterráneas (Fuentes Yagüe, 1993):

- Velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales es muy superior (del orden de las 1000.000 veces) a la de las aguas subterráneas.
- El volumen de agua subterránea almacenada es mucho mayor que el volumen del agua que discurre superficialmente en un momento dado.
- Las aguas que discurren superficialmente se concentran en un pequeño número de ríos. Mientras que las aguas subterráneas se mueven y ocupan grandes extensiones.
- Las corrientes superficiales tienen grandes variaciones de caudal. Mientras que las subterráneas experimentan unas variaciones muy pequeñas

De acuerdo con el estudio realizado por la International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC), el agua subterránea representa el 30% del agua dulce y se considera importante y significativo para el riego y la industria de alimentos siendo el recurso hídrico más confiable para la agricultura. Una de las flexibilidades que tiene se da en temporadas de sequía donde se puede complementar el uso de agua superficial extrayendo agua subterránea. Asimismo, juega un rol importante en el medio ambiente porque mantiene el flujo y nivel de agua en ríos, lagos y humedales y considera los siguientes datos (International Groundwater Resources Assessment Centre [IGRAC], 2021):

- La extracción del agua subterránea en el mundo es de 1000 km³ por año.
- El 67% de toda el agua subterránea se utiliza para riego en la producción de alimentos.
- El 22% de toda el agua subterránea se usa para fines domésticos (agua potable y saneamiento).
- El 11% de agua subterránea se usa para la industria.

En adición a los anteriores datos según el estudio de la UNESCO y WWAP realizado el 2009, mencionan que el agua subterránea suministra la mitad del agua potable en el mundo y el 43% es usada para riego a nivel mundial (Siebert *et al.*, 2010).

2. 2. Acuífero

Es una formación geológica que almacena y transmite agua (Sánchez San Román, 2019) y es responsable de la mineralización del agua. También se denominan al conjunto de rocas que almacenan y propician del movimiento del agua a través de su porosidad o conjunto de intersticios existentes en sólidos discontinuos.

Según Ordoñez es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua y se encuentra almacenada en los acuíferos. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30 por ciento del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea (Ordoñez, 2011).



Figura 2: Tipos de acuíferos

Fuente: Aquabook (s.f.)

2. 2. 1. Acuíferos libres

Son medios saturados cuyas aguas se encuentran a una presión igual a la atmosférica tal como se muestra en la Figura 3 (Sánchez San Román, 2019). Generalmente situados cerca de la superficie del terreno, no tienen capas de arcilla (u otro material geológico impermeable) por encima de su nivel freático, teniendo en cuenta que el límite superior de las aguas subterráneas es este tipo de acuíferos es este nivel (Longwood, s.f.).

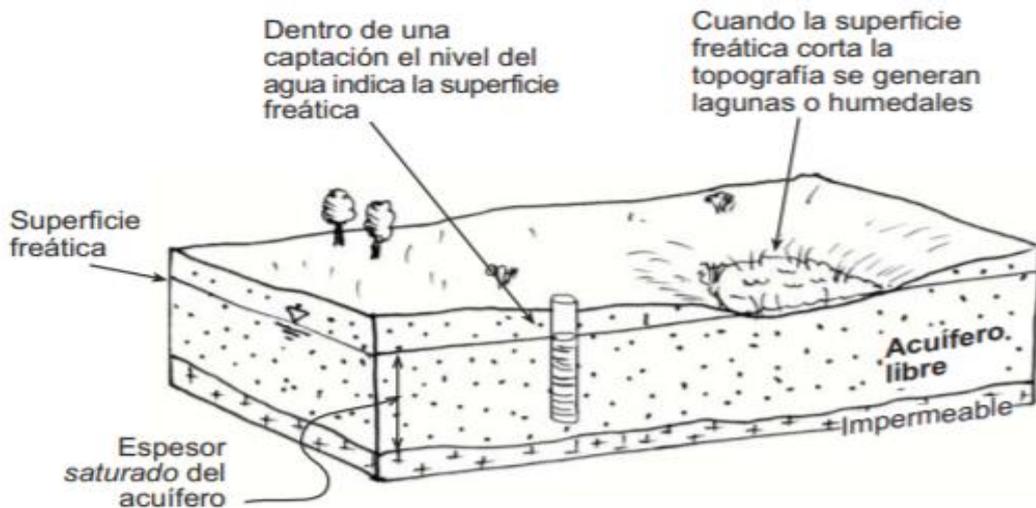


Figura 3: Representación de un acuífero libre

Fuente: Sánchez San Román (2019).

2. 2. 2. Acuíferos confinados

El límite superior se encuentra a presión superior a la presión atmosférica siendo una capa impermeable porque si se extrae agua no se vacía ningún poro (Sánchez San Román, 2019) (ver Figura 4). En adición un estudio realizado por la universidad de Longwood menciona que tienen capas de material impermeable por encima y por debajo de ellas. Como resultado, el agua se encuentra atrapada dentro de estas capas y las barreras geológicas presentes en ellas ejercen presión sobre el agua para mantenerla retenida. (Longwood, s.f.).

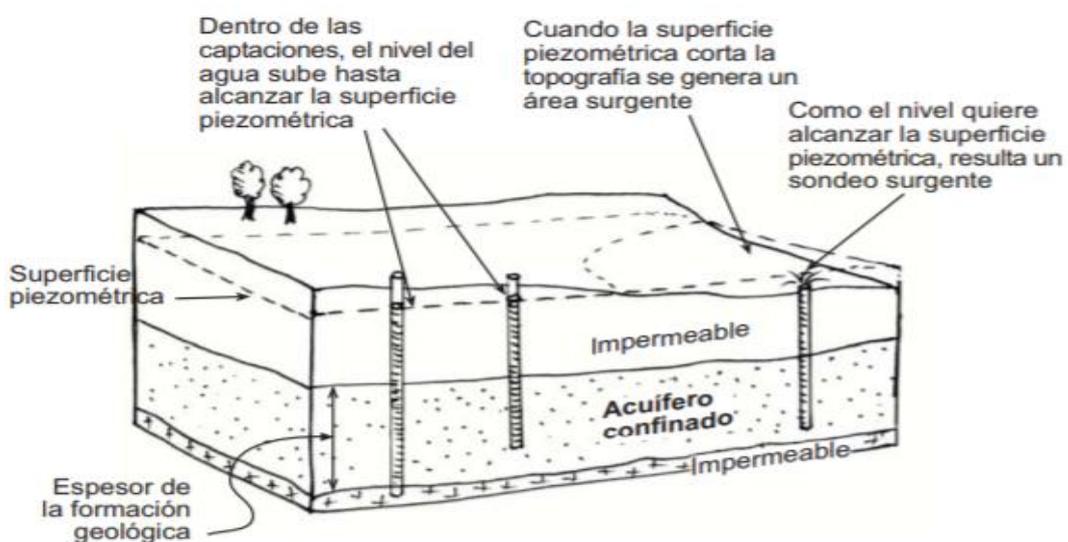


Figura 4: Representación de un acuífero confinado

Fuente: Sánchez San Román (2019).

2. 2. 3. Acuífero semiconfinado

Son acuíferos a presión, con la condición de que una de sus capas sea semipermeable. Acuitardos que a través de ellas llegan filtraciones o rezumes (Sánchez San Román, 2019). Además, los acuíferos semiconfinados se definen por la presencia de unidades acuíferas, o simplemente acuíferos, que son formaciones permeables, intercaladas por capas semipermeables conocidas como acuitardos los que permiten que haya intercambio de agua entre los acuíferos a través de un fenómeno conocido como “goteo”. (Lezama *et al.*, 2012).

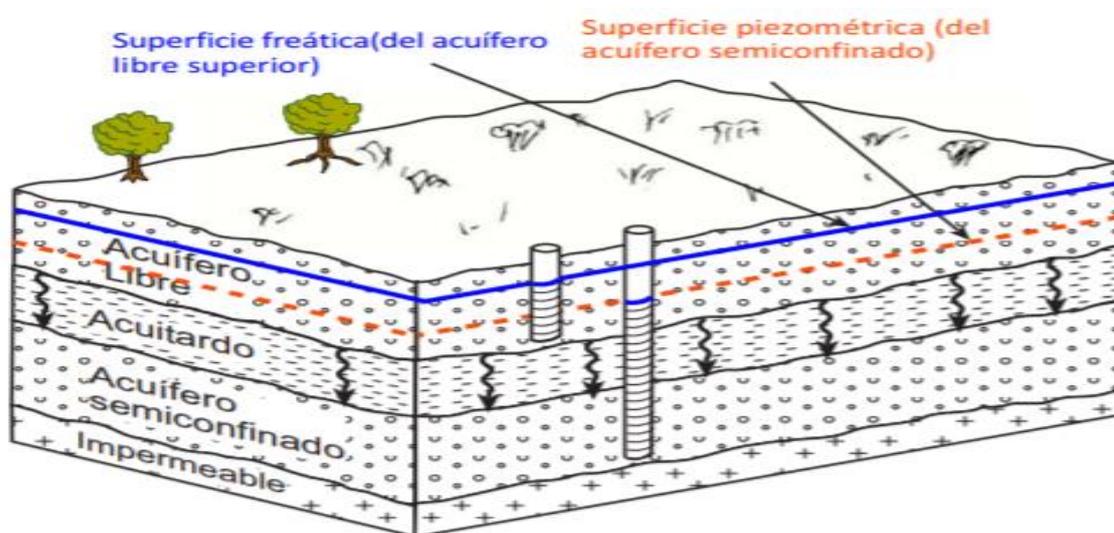


Figura 5: Representación gráfica de los acuíferos

Fuente: Sánchez San Román (2019).

2. 3. Teledetección

Es el conjunto de técnicas que recogen y analizan los datos obtenidos por sensores situados sobre aviones o plataformas espaciales, se denominan Teledetección Espacial. Estos sensores son instrumentos capaces de registrar la radiación electromagnética procedente de la Tierra y de transformarla en una señal susceptible de ser manejada de forma digital (Castaño *et al.*, 2008).

Según Chuvieco (2010), es la disciplina que engloba el estudio de los fundamentos físicos de la observación remota de la superficie terrestre, y de los procedimientos que permiten

obtener datos de esta y su posterior tratamiento. El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro – magnética ver Figura 6.

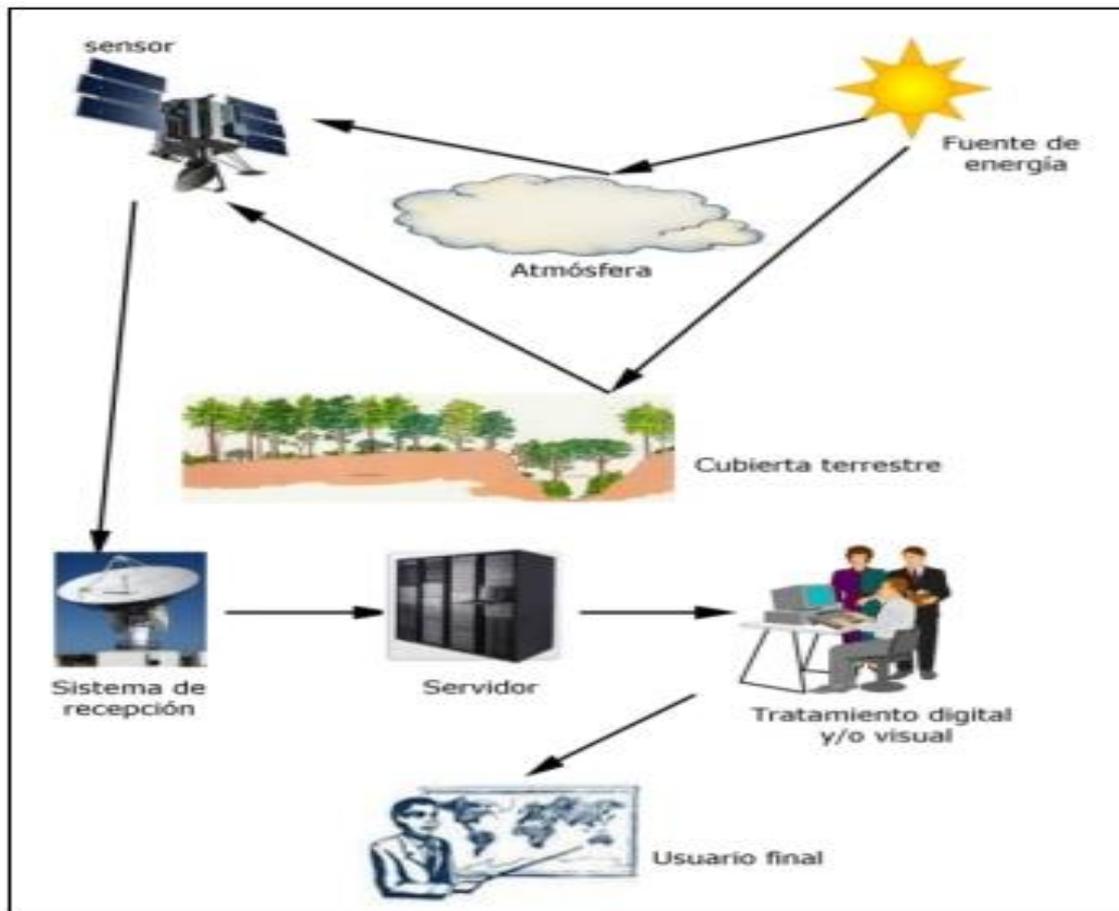


Figura 6: Componentes de un sistema de teledetección

Fuente: Chuvieco (2010).

2. 3. 1. Satélite Alos Palsar

El Satélite de Observación Terrestre Avanzada (ALOS), conocido como Daichi es un avanzado satélite japonés para la observación terrestre y fue lanzado en 2006 por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA). Lleva tres instrumentos de teledetección: El instrumento de teledetección pancromática para cartografía estereoscópica (PRISM), de 2.5 m de resolución, el radiómetro avanzado de infrarrojo cercano y visible de tipo 2 (AVNIR-2), de 10 m de resolución y el Radar polarimétrico de apertura sintética de banda L (PALSAR) (Rosenqvist *et al.*, 2004).

El radar de apertura sintética de banda L (PALSAR) es una versión mejorada del radar de apertura sintética del JERS-1 (banda L; polarización HH; ángulo de 35° off-nadir) Al igual que su predecesor, PALSAR fue desarrollado conjuntamente por JAXA y la Organización de Sistemas de Observación de Recursos de Japón (JAROS).

Tabla 1: Especificaciones del satélite ALOS PALSAR

Especificaciones	
Operador Satélite	Jaxa – Cross Restec
Fecha de Lanzamiento	Enero, 2006
Resolución espacial de la Imagen	6.25 o 12.5 m
Ángulo de incidencia	8°
Polarización	HH o VV
Sensor	Radar
Capacidad de Colección	50 x 70 km

Fuente: (GeoSpatial, 2013)

2. 3. 2. Satélite Sentinel

Cada misión de Sentinel se basa en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de cobertura y revisita, proporcionando conjuntos de datos sólidos para los servicios de Copernicus. Estas misiones llevan una gama de tecnologías, como radar e instrumentos de imágenes multiespectrales para el monitoreo terrestre, oceánico y atmosférico (European Space Agency [ESA], 2021).

Sentinel 2A y Sentinel 2B son dos satélites de la ESA, cuentan con un sensor multiespectral denominado MSI de trece bandas (Tabla 3) y proporcionan imágenes de alta calidad radiométrica (12 bits) con tres resoluciones espaciales: 10 m, 20 m y 60 m (ESA, 2021). Se puede hacer filtros a color natural y falso color a máximas resoluciones.

El programa Copernicus tiene imágenes de satélites Sentinel, que son de acceso libre y gratuito; para el estudio se usó los datos ópticos de alta resolución de los satélites Sentinel-2A y 2B con productos a nivel 2A que presentan correcciones a nivel atmosférico para proporcionar las orto imágenes con niveles digitales expresados en valores de reflectancia reales a nivel de superficie (BOA) (Instituto Geofísico Nacional [IGN], s.f.).

Tabla 2: Características de las bandas espectrales de los sensores MSI

	N° Banda	Intervalo de Longitud de Onda (nm)	Resolución Espacial (m)	Propósito
Sentinel - 2 MSI	2	457 - 522	10	Azul
	3	543 - 577	10	Verde
	4	650 - 680	10	Rojo
	5	697.5 - 712.5	20	Margen Rojo
	6	732.5 - 747.5	20	Margen Rojo
	7	775 - 795	10	Margen Rojo
	8A	855 - 875	20	IR cercano
	11	1565 - 1655	20	IR onda corta - 1
	12	2100 - 2280	20	IR onda corta - 2

Fuente: Markhan *et al.* (2014) y Muller – Wilm (2016)

2. 4. Modelo digital de elevación

Es un modelo simbólico de estructura numérica y digital para la distribución espacial de la altitud del terreno y como variable tiene a la altura escalar (Felicísimo, 1994). Los modelos digitales son vectores o ráster (grillados). En los vectores se encuentra la red de triángulos irregulares (TIN), las curvas de nivel y perfiles, sin embargo, en los ráster tenemos matrices de celdas regulares, cotas sobre la grilla de filas y columnas (Victor *et al.*, 2014).

El modelo de elevación digital (DEM) fue obtenida del satélite Alos Palsar, proporcionada por la agencia espacial NASA y JAXA. La calidad del producto Alos Palsar RTC está directamente relacionada con la calidad del modelo digital de elevación que es usado para el proceso de corrección radiométrica del terreno (RTC) (University of Alaska Fairbanks [UAF], 2014).

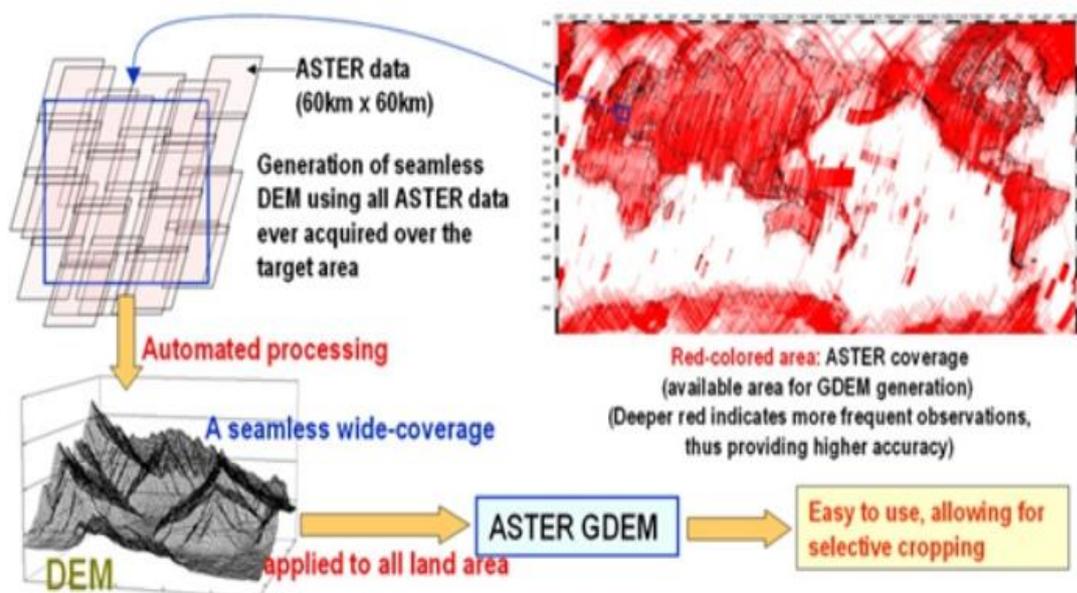


Figura 7: Imagen del Ministerio de Industria de Japón (METI)

Fuente: Gestión Hidrología Medioambiente [GHMO] (2014).

2. 5. Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total (Monsalve, 2011). Es el parámetro que cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico y permite conocer su complejidad (Fuentes Junco, 2004; Delgadillo & Páez, 2008, citado en Dugarte *et al.*, 2015). Para Horton (1932 y 1945) es la relación entre la longitud total (L_t) de los cursos de agua perennes, intermitentes y efímeros de una cuenca y su área (A). Asimismo, a mayor densidad de drenaje, el tiempo de escorrentía es menor, por lo cual se considera como otro indicador de peligrosidad (Camino *et al.*, 2018).

Tabla 3: Clasificación de la red de drenaje de las cuencas

Rangos (km/ km ²)	Clases	Rangos (km/ km ²)	Clases
Fuentes Junco (2004)		Delgadillo & Páez, 2008, citado en Dugarte <i>et al.</i> (2015)	
0.1 – 1.8	Baja	< 1	Baja
1.9 - 3.6	Moderada	1 - 2	Moderada
3.7 – 5.6	Alta	2 - 3	Alta
		>3	Muy alta

Fuente: Fuentes Junco (2004) y Delgadillo & Páez (2008), citado en Dugarte *et al.* (2015)

2. 6. Precipitación

La precipitación es toda forma de humedad que se origina en las nubes, llega hasta la superficie del suelo y tiene formas de: Lluvias, granizadas, garúas y nevadas. De acuerdo con la hidrología, es la fuente primaria del agua superficial.

Asimismo, indica que una nube es origen de la precipitación porque está constituida por pequeñas gotas de agua (Villón, 2004):

- Diámetro aproximado de las gotitas 0.02 mm.
- Espaciamiento entre gotitas 1 mm.
- Masa 0.5 a 1 gr/m³.

2. 7. Datos dudosos

Son puntos de información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La inclusión o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas. Los procedimientos para tratar los datos dudosos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas (Lobo Reyes, 2017).

2. 8. Clasificación no supervisada

Es un método que realiza una búsqueda automática agrupando los valores uniformes dentro de una imagen, es decir a partir de los niveles digitales crea varios “clúster” con pixeles de igual comportamiento (Bakker *et al.*, 2001).

Hay varios algoritmos para agrupar y que se usan para determinar las agrupaciones espectrales naturales presentes en el conjunto de datos, una forma común de clustering es el “k-means”, el cual es un algoritmo de clustering no jerárquico que requiere un número fijo de clusters e “ISODATA” (*Interaction Self Organizing Data Analysis Technique*), es un algoritmo de clustering jerárquico que puede adaptarse a un número variable de clustes. De esta manera, la clasificación no supervisada es una tarea con el objetivo de agrupar los datos en función de su similitud o afinidad, sin la necesidad de etiquetas o categorías predefinidas por lo que el K-means es el algoritmo más utilizado que usa una ‘distancia espectral mínima’ para asignar a un conglomerado, un vector característico candidato (Ingeoexpert, s.f.).

La asignación de los píxeles a las clases seleccionadas se lleva a cabo con el criterio de decisión de la máxima verosimilitud.

2. 9. Matriz de Saaty

Saaty (1980), ha desarrollado el proceso de análisis jerárquico (AHP) para resolver problemas complejos de criterios múltiples (Saaty & Vargas, 1980). Este proceso de análisis con la construcción de un modelo permite de manera eficiente y gráfica de organizar la información de un problema (Toskano Hurtado, 2005). El proceso de análisis jerárquico (APH) para Saaty (1980) “trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión”.

Toskano Hurtado (2005) presenta las ventajas del proceso de análisis jerárquico frente a otros métodos de decisión multicriterio:

- Presenta un sustento matemático
- Permite desglosar y analizar un problema por partes
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común
- Incluye la participación de equipos multidisciplinarios y genera un consenso
- Permite verificar el índice de consistencia (IC) y hacer correcciones si fuera el caso
- Genera síntesis y da posibilidad de realizar análisis de sensibilidad
- Ser de fácil uso y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

Según investigaciones anteriores la escala más razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas.

Tabla 4: Escala de preferencias

Planeamiento Verbal de la Preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente Preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente Preferible	5
Entre moderada y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igual y moderadamente preferible	2
Igualmente, preferible	1

Fuente: Toskano Hurtado (2005).

2. 10. Superposición ponderada

Es una herramienta que aplica el enfoque más usado para un análisis de superposición y resolver problemas de varios criterios, superpone varios rásteres con una escala de medición común y pondera cada uno según importancia (Figura 8). Permite implementar varios pasos del proceso de análisis y combina los siguientes pasos (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2021b):

- Reclasifica los valores en los rásteres de entrada en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo, o algo similar a una escala unificadora.
- Multiplica los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia de los rásteres.
- Suma los valores de celda resultantes para producir el ráster de salida

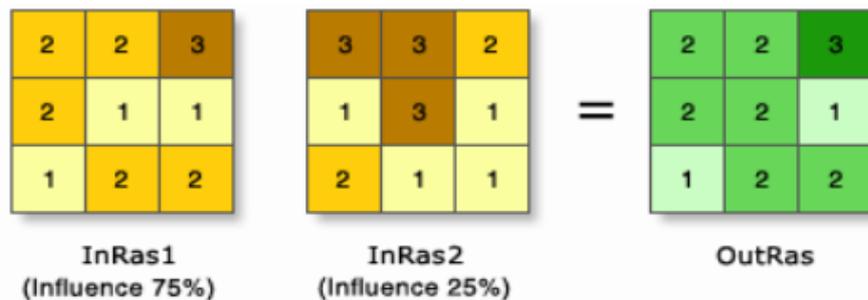


Figura 8: Ilustración de la función de Overlay Weight

Fuente: ESRI (2021b).

Asimismo, el modelo de superposición ponderada se muestra en la Figura 9, como un proceso en *Model Builder*:

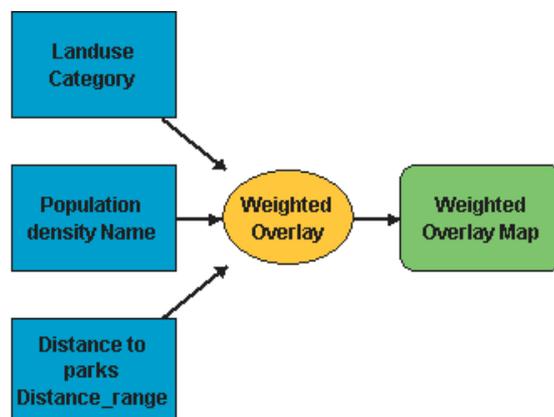


Figura 9: Modelo de superposición ponderada

Fuente: ESRI (2021b).

2. 11. Geofísica aplicada a hidrología

Uno de los métodos utilizados para explorar agua subterránea es conocido como SP (*Self Potential*), que permite la medición de la diferencia de potencial en superficie entre dos puntos por lo que como denominador común es el flujo de agua subterránea a través del medio poroso o fracturado (Naudet & Binley, 2005).

El campo eléctrico natural (potencial propio) está distribuido lejos de la fuente y puede considerarse como onda plana con distribución aproximada vertical, por lo que su movimiento este sujeto a la ecuación de Maxwell (Ecuación 1 y 2) (Hunan Puqi Geologic Exploration Equipment Institute, 2017).

$$\rho_s = \frac{1}{5 * f} * \left(\frac{E_x}{H_y} \right) \quad (1)$$

$$P = 503.3 * \rho * f \quad (2)$$

Donde:

- ρ_s es la resistividad de la corriente
- f , la frecuencia de operación
- H_y , componente de campo magnético
- E_x , componente de campo eléctrico
- P , Profundidad de penetración de la onda electromagnética en el medio

El equipo geofísico funciona según el principio de diferencia eléctrica del campo magnético de la tierra natural (frecuencia 0-30 kHz), las diferentes frecuencias de cambios de campo electromagnético es la ley para estudiar los cambios de campo / material subterráneo para resolver los problemas geológicos (Hunan Puqi Geologic Exploration Equipment Institute, 2017).

En la actualidad la prospección geofísica es utilizada ampliamente para resolver problemas en los campos de la geología e hidrogeología haciendo mediante la medición de la resistividad eléctrica, magnética, sísmica, gravitacional, electromagnética, etc.

El principio básico del instrumento utilizado es medir el campo eléctrico natural existente de agua subterránea / minerales / estructuras geológicas / cuerpos minerales. El equipo

almacena o graba datos de potencial-propio (Self-Potential, SP) / voltaje, en milivoltios. La fuente de trabajo es tierra y la corriente de la tierra es estable, si la resistividad es alta, entonces el voltaje también es alto. Por otro lado, la interpretación de los perfiles de potenciales propio(mV) versus profundidad(m) se observa en la Figura 10.

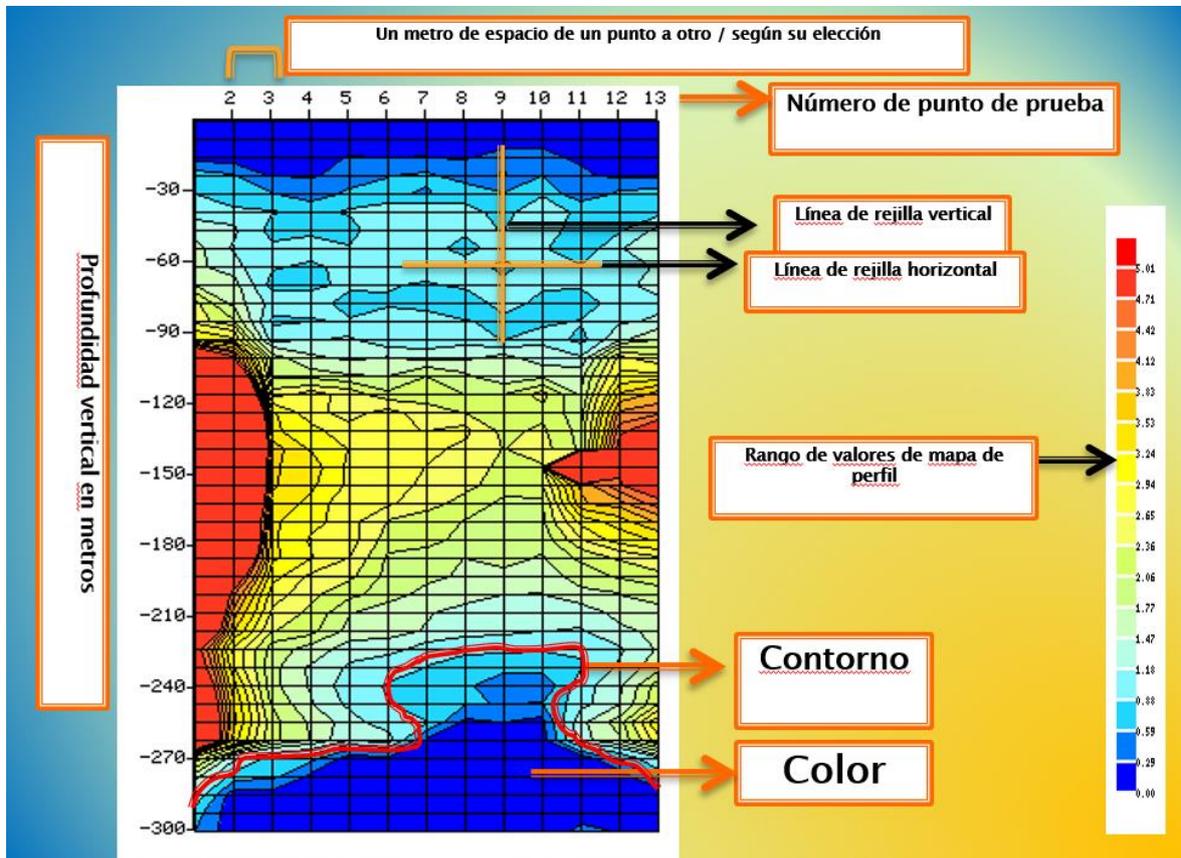


Figura 10: Componentes principales de la sección geoelectrica

Fuente: Hunan Puqui (2017).

III. METODOLOGÍA

3. 1. Características generales de la zona de estudio

La zona de estudio comprende los distritos de Pampas Grande, La Libertad y Huanchay con 710.45 km² de superficie y 3622 habitantes, de acuerdo con el último censo nacional (2017). Asimismo, el promedio anual de la precipitación para las estaciones del área de estudio como Pira (663.9 mm), Cajamarquilla (503.4 mm) y Pariacoto (145.67) mm, siendo el distrito de Pampas Grande, el que sufre de sequía continuamente según relato de pobladores.

3. 1. 1. Ubicación política

Políticamente el área de proyecto se localiza en los distritos de Pampas Grande, La Libertad y Huanchay pertenecientes a la provincia de Huaraz del departamento de Ancash.

3. 1. 2. Ubicación geográfica

Geográficamente los distritos mencionados se ubican en las coordenadas:

- Pampas Grande:UTM 180572.5 E, 8932395.03 N
- Huanchay:UTM 190644.12 E, 8923035.09 N
- La Libertad: UTM 201700.37 E, 8933561.82 N

3. 1. 3. Ubicación geográfica

El distrito de Pampas Grande y La Libertad se localizan en la cuenca alta del río Casma, mientras que Huanchay se ubica en la cuenca del río Culebras.

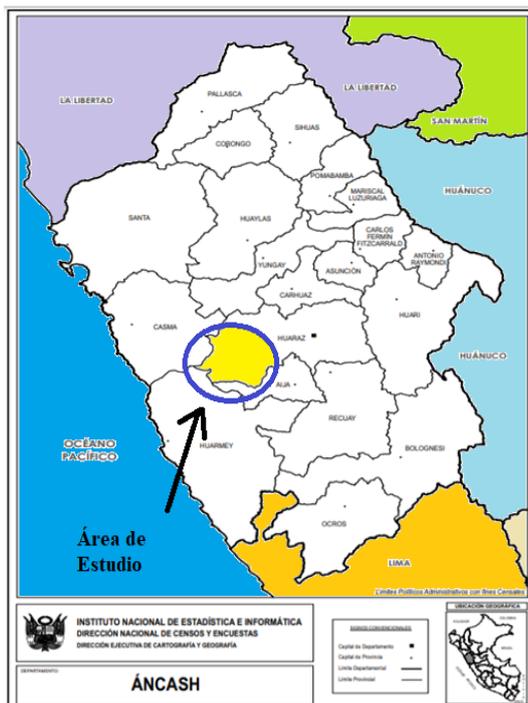


Figura 11: Ubicación de la provincia de Huaraz, departamento de Ancash.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2018).



Figura 12: Ubicación del área de estudio

Fuente: Google Earth (s.f.).

3.1.4. Clima

La información climática y socioeconómica para los tres distritos que abarca nuestra zona de estudio fueron obtenidos de la memoria descriptiva de los siguientes expedientes técnicos:

- Creación de la Losa de uso múltiple recreativa en la localidad de Pampas Grande, Distrito Pampas Grande, Provincia de Huaraz – departamento de Huaraz (2020).
- Mejoramiento del reservorio de Parian del distrito de Huanchay – provincia de Huaraz - departamento de Ancash (2020).
- Mejoramiento de y Ampliación del sistema de agua potable e instalación del reservorio de saneamiento rural en los sectores de Huellap, Jonko Alto, Jonko Bajo, Acclahuain, Pariash y Pallactan, Distrito de la Libertad, Provincia de Huaraz Ancash (2020).

Estos expedientes fueron elaborados para los tres distritos en estudio y obtenidos del buscador del Sistema de Electrónico de Contrataciones del Estado (Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado [SEACE] 3.0, s.f.). En la Tabla 5, se describe el clima para cada distrito.

Tabla 5: Descripción climática para cada distrito del área de estudio.

Distrito	Clima
Huanchay	Los meses de abril a noviembre el área es predominantemente seco con cielos despejados y los meses de diciembre a marzo presenta climas fríos y húmedos por las frecuentes precipitaciones.
La Libertad	Los climas más cálidos se encuentran en los meses de mayo a setiembre con temperaturas de 13 a 23 °C con una sensación térmica que puede llegar a los 28°C y por las noches oscila entre 10 a -1°C. Los meses de noviembre a marzo, la temperatura diaria alcanza a 16°C llegando a 2°C son los meses más fríos.
Pampas Grande	En general se considera templado y frío. Posee dos estaciones climáticas muy variadas, siendo los meses de diciembre a marzo épocas lluviosas y los meses de mayo a octubre son épocas de sequías.

3. 1. 5. Aspectos socioeconómicos

Los Distritos de Huanchay, La Libertad y Pampas Grande sustentan su economía principalmente en la agricultura y la ganadería como se describe a continuación:

a) Agricultura:

Su actividad agrícola en la parte alta es: cebada, trigo, maíz serrano, habas, alverjas, manzana, melocotón) y en la parte baja tienen a frejol canario, frutales, palta fuerte, maíz, tomate, pepino dulce. Hay que mencionar que dependen básicamente de la precipitación que se dé; por lo que si la precipitación es moderada habrá mejor cosecha. La producción en su mayoría es para autoconsumo, siendo mínima cantidad que va al mercado. Sus amplias áreas de cultivo son usadas de forma secano.

b) Actividad pecuaria:

Es la segunda actividad más importante. La ganadería de la zona mantiene una actividad tradicional primaria y está dedicada mayormente a la crianza de animales como: ganado lanar, vacuno, caballos, porcinos, animales menores entre ellos el cuy y conejo. Respecto a la crianza y manejo de ganado son alimentados principalmente con pastos naturales existentes. Existen altos porcentajes de mortalidad por carencia de pastos en los años de sequía donde mueren en gran cantidad.

c) Comercialización de Productos agropecuarios:

La producción agropecuaria es baja por lo que un 55% aproximadamente de su producción es destinada para el consumo doméstico, 30% para la semilla y el 15% para la comercialización.

3. 1. 6. Geología

En las partes altas de la zona la formación Calipuy tiene un 50% de presencia y en las partes bajas se encuentran los batolitos de la costa que comprende las unidades de Santa Rosa. Paccho, Pativilca, Pira Humaya. Además, se tiene los depósitos aluviales en zonas cercanas a los ríos Casma y Culebras. La descripción de cada unidad litoestratigráfica se encuentra en el Anexo 9.

Tabla 6: Información temática de la geología

Era tema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Espesor (m)	descripción litológica	Área (%)
Cenozoico	Paleógeno	Miocena	Superior	2000	Secuencia volcánica de lavas y rocas piroclásticas gruesas de composición andesíticas con ignimbritas y tobas dacíticas con secuencias lávicas de andesitas y riódacitas	54.88
		Oligocena	Calipuy			
		Eocena	Inferior			
Mesozoico	Cretáceo	Inferior	Fm. Junco	2000	Lavas almohadillas intercalados con algunos conglomerados. Flujos levíticos, lavas brechadas y horizontes tobáceos	0.16
			Fm. Cochapunta	1000	Areniscas, limo arcillitas y calizas silicificadas grises y verdes con lutitas gris oscuras.	3.97
			Fm. Carhuaz	1500	Secuencia de limo arcillitas color gris a verde, capas de yeso en la parte inferior, y en los niveles superiores limo arcillitas rojizas.	0.09
			Fm. Santa	150	Calizas color azul, grises, estratificación delgada.	10.46
ROCAS INTRUSIVAS						
Mesozoico	Cretáceo	Superior	Paccho	93 m.a.	Diorita – tonalita	1.01
			Santa Rosa	93-84 m.a	Diorita - tonalita - mozogranito	14.55
			Pativilca - Sayán	34 m.a.	Monzogranito - porfirítico	1.82
			Pira		tonalita ganodiorita	0.32
			Humaya		Plutón de granodiorita Humaya	2.83

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET] (1996).

3. 2. Materiales y equipos

3. 2. 1. Materiales

- Modelo Digital de elevación (DEM) obtenido de la Alaska Satellite Facility (ASF) – ALOS PALSAR (UAF, 2014).
- Imagen satelital sentinel 2A
- Información de precipitación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)
- Información Geológica de Sistema de Información Geográfica- GEOCATMIN

3. 2. 2. Equipos y software

- PQWT-S500 – para exploración geofísica de agua subterránea
- Microsoft Word y Excel 2019
- ArcGis 10.5
- RStudio

3. 3. Metodología

La metodología para el desarrollo del presente trabajo es como se muestra en la Figura 13.

3. 4. Fase de gabinete

En esta etapa se cumple con el primer objetivo específico “Caracterización hidrológica, geológico, cobertura vegetal y morfología topográfica en los distritos de Pampas Grande, La Libertad y Huanchay usando teledetección” donde se usó imágenes satelitales de alta resolución correspondientes al área de estudio. Estas imágenes proporcionaron información sobre la vegetación, la topografía, la cobertura del suelo y otros parámetros relevantes para la identificación de las áreas de recarga y descarga de aguas subterráneas.

3. 4. 1. Recopilación de la Información

a) Precipitación anual

El proceso de recopilación de información realizada se visualiza en la Figura 14, donde los datos son regionalizados, análisis de consistencia, completado de datos y análisis estadístico para finalmente elaborar el mapa de precipitación anual promedio.

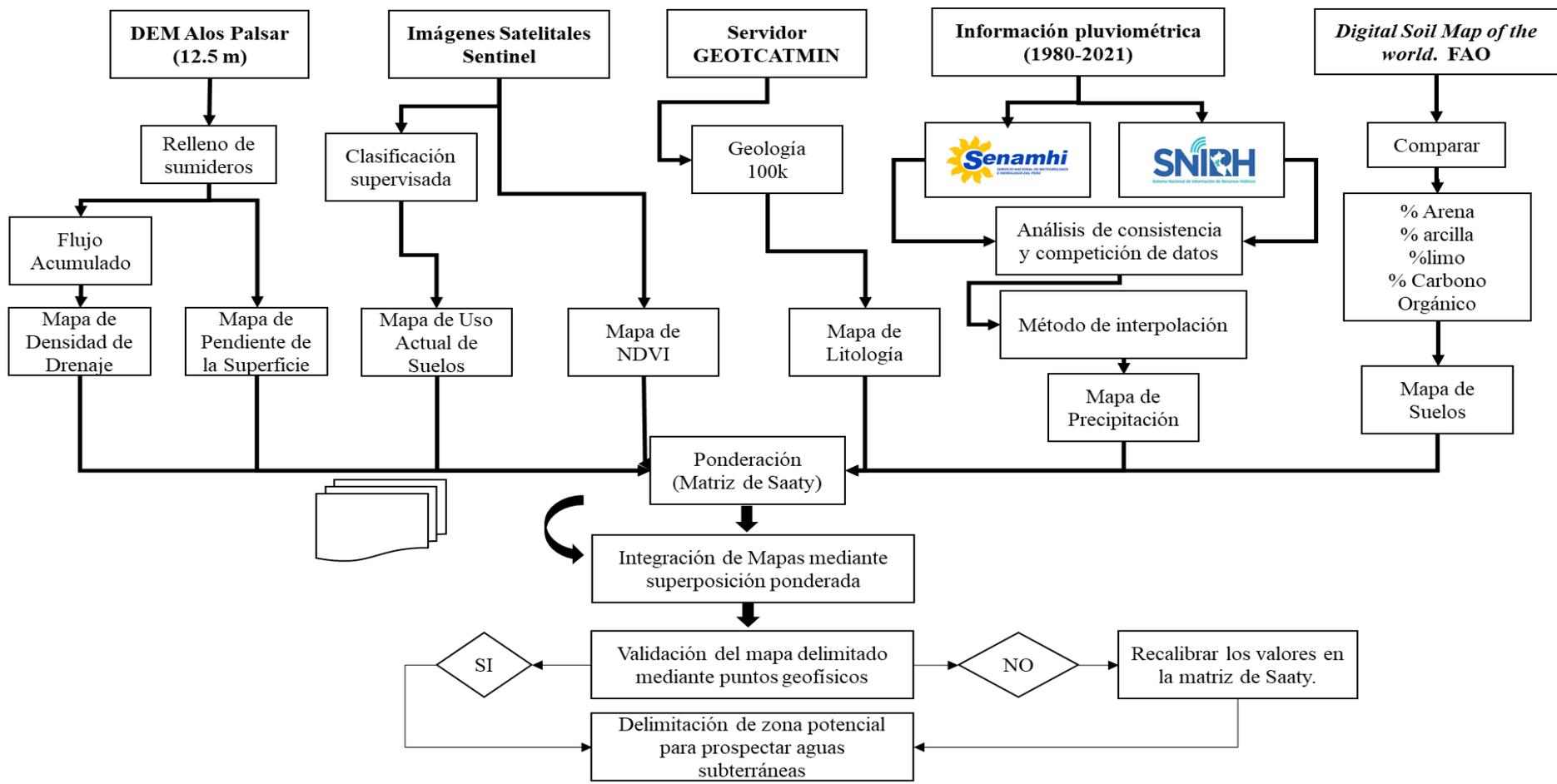


Figura 13: Modelo de integración

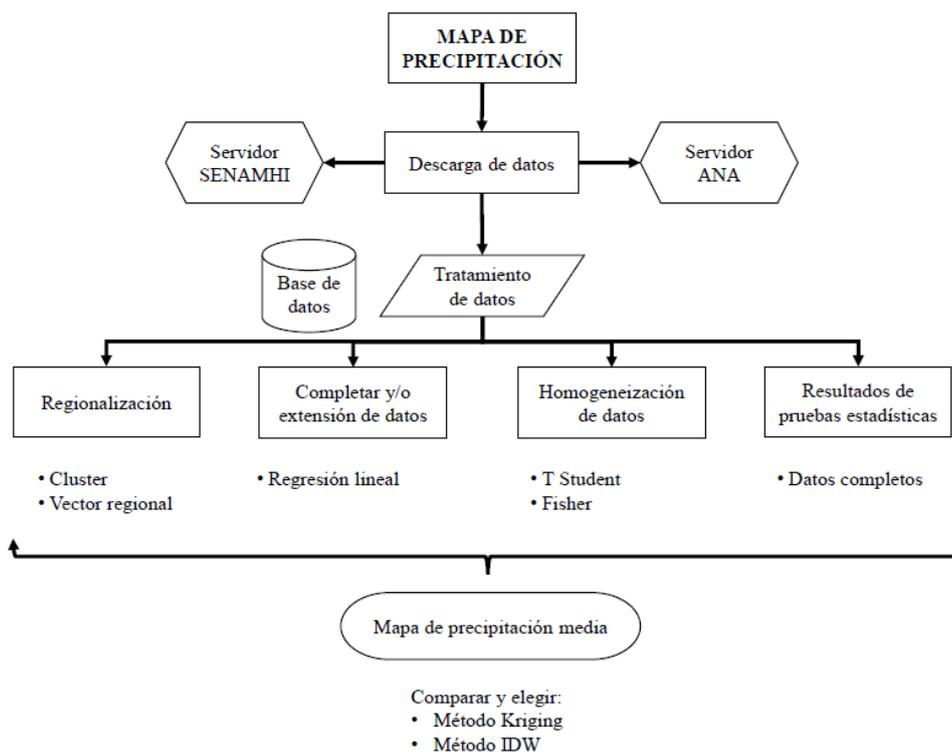


Figura 14: Curvas de Precipitación – Duración – Frecuencia en el punto de aforo del área de estudio

— *Delimitación de estaciones*

En la Tabla 7, se muestra las estaciones meteorológicas que influyen en la zona de estudio, tomando en cuenta el área representativa evaluada con el polígono de Thiessen elaborado con el *software Hydracces*.

Tabla 7: Estaciones cercanas al área de Estudio con mayor influencia

Id	Estac.	Categoría	Lat.	Long.	Altitud (m.s.n.m.)	Dpto.	Prov.	Distr.
1	Aija	Climática	-9.78	-77.61	3486	Ancash	Aija	Aija
2	Cajamarquilla	Pluviométrica	-9.63	-77.74	3286	Ancash	Huaraz	La Libertad
3	La Merced	Pluviométrica	-9.70	-77.68	3250	Ancash	Aija	La Merced
4	Pira	Pluviométrica	-9.58	-77.71	3720	Ancash	Huaraz	Pira
5	Pariacoto	Pluviométrica	-9.56	-77.89	1450	Ancash	Huaraz	Colcabamba
6	Quian	Climática	-9.77	-77.95	876	Ancash	Huaraz	Huanchay

En la Figura 15, se observa el polígono de Thiessen como evidencia de las estaciones que más influyen en Pampas Grande, La libertad y Huanchay.

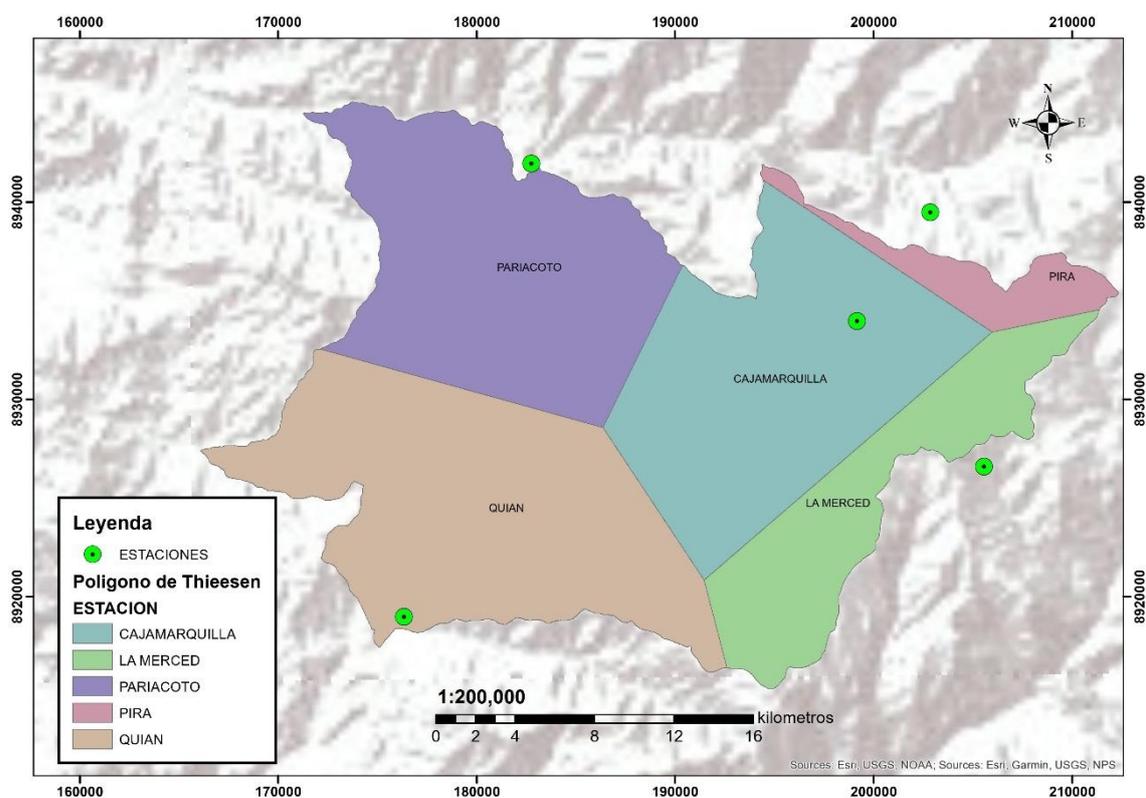


Figura 15: Estaciones meteorológicas y polígono de Thiessen

En la Tabla 8, se visualiza que las estaciones Cajamarquilla, Piriacoto y Quian, son las estaciones más representativas al área de estudio.

Tabla 8: Nivel de significancia por estación en el área de estudio

Id Estación	Nombre estación	Área (Km²)	Área (%)
154108	Cajamarquilla	184.61	26%
154110	Pira	28.40	4%
154105	Quian	213.02	30%
150904	Piriacoto	184.61	26%
154416	La Merced	99.41	14%

— *Descarga de datos*

Se usó la data que ofrece la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi). Para los primeros años desde 1980 se accedió a la página del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos [SNIRH] (s.f.) de la

ANA y ubicamos las cuencas que abarca nuestra zona, siendo estas Casma y Culebras donde se muestra las estaciones que están dentro y fuera del área de estudio (ver Figura 16 y Figura 17).

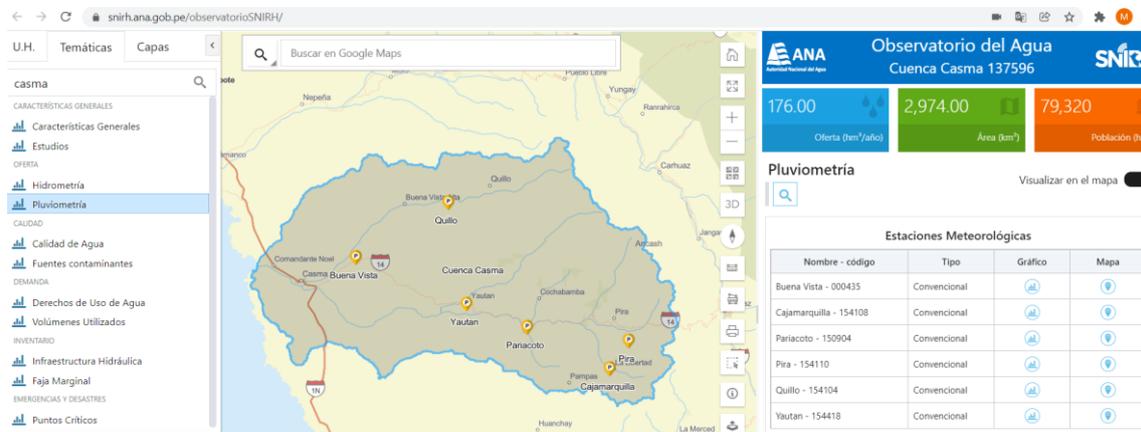


Figura 16: Observatorio del Agua – ANA, Cuenca Casma

Fuente: SNIRH (s.f.)

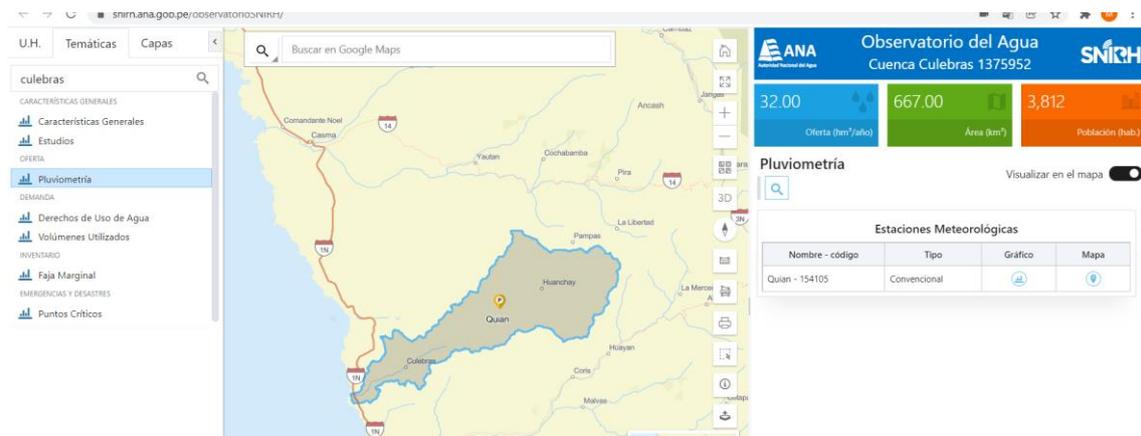


Figura 17: Observatorio del Agua – ANA, Cuenca Culebra

Fuente: SNIRH (s.f.)

Para los últimos años se ha tomado en cuenta los datos ofrecidos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (s.f.). En la Figura 18, solo se visualiza 4 estaciones (Cajamarquilla, Pira, Aija y Pariacoto) que están dentro del área de estudio.



Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional



Figura 18: Estaciones meteorológicas para descarga de datos de SENAMHI.

Fuente: SENAMHI (s.f.)

Finalmente, la estación Quian según la data del ANA, solo tiene información hasta 1995. Sin embargo, en la misma página hay estudios que se realizaron cerca a esa estación y esta información fue obtenida de ese medio.

— *Disponibilidad de datos*

Se tiene un total de 6 estaciones con datos de precipitación localizadas en las cuencas de Casma y Culebras. Asimismo, se ha contabilizado el número de datos de precipitación por estación, a nivel mensual siendo Pira la que tiene mayor longitud de registro (488 datos) seguido por Quian con menor longitud de registro (384 datos) (ver Figura 19).

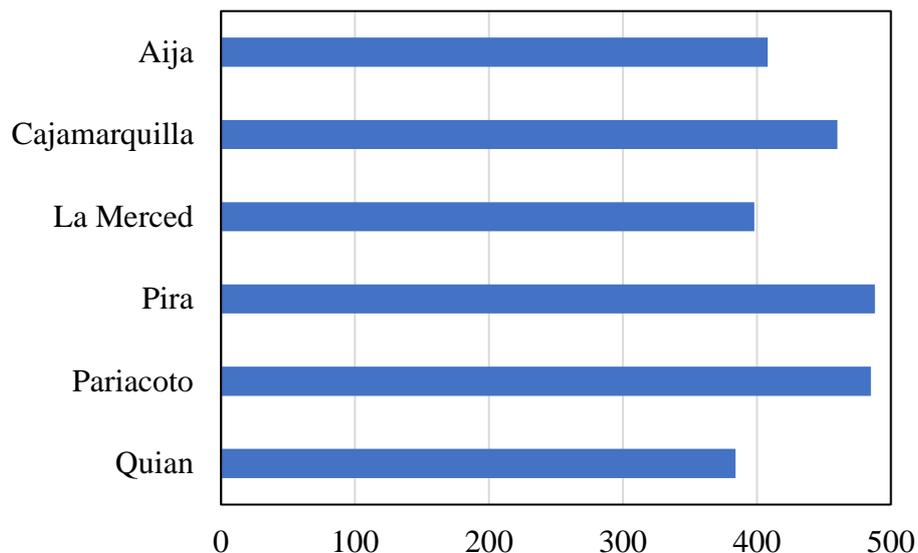


Figura 19: Longitud de registro por estación meteorológica

Fuente: SNIRH(s.f.) y SENAMHI (s.f.)

— *Método del Vector Regional*

El método del vector regional emplea para el cálculo de la estación “vector” el concepto de precipitación media extendida al periodo de trabajo, salvando los problemas del peso de estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas (como ocurriría con promedio simple) y la existencia de datos faltantes o diferentes periodos de funcionamiento (que calcularían promedios alterados en caso de tener solamente años húmedos o años secos de determinada estación) bajo estos conceptos, se emplea el método de mínimos cuadrados para encontrar los índices Pluviométricos Regionales Anuales “Zi” y la precipitación media extendida “Pi” (Ver Ecuación 3)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i \right) \quad (3)$$

Donde, “i” es el índice de año, “j” índice de la estación, “N” el número de años y “M” el número de estaciones, “Pij” es la precipitación anual en la estación del año j en la estación i, “Pi” es la precipitación media extendida al periodo de N años y finalmente Zi es el índice pluviométrico regional de año i.

Los parámetros más importantes, que dan buena idea del comportamiento de una estación son:

- a) Desviación estándar de los desvíos (DED)
- b) Correlación entre la estación y el vector

Si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos al vector. Al término del proceso de crítica, y según el nivel de precisión que se requiera, se obtienen regiones de estaciones con semejante comportamiento multianual.

En el Tabla 9, se califica los valores estadísticos como la correlación con el vector regional superior a 0.5 se considera buena correlación, así como los desvíos deben ser cercanos por ende los próximos a 0 son los más adecuados.

Los resultados muestran los parámetros estadísticos de las estaciones que guardan correlación y comportamiento similar. Se tiene una correlación más alta en la estación Quian con 0.705. Significa que hay estrecha relación entre el vector regional y las estaciones. Sin embargo, hay una relación medianamente baja en los desvíos para las tres estaciones y la variación.

Tabla 9: Estadística del Vectorial Regional

Estación	Nº Años	Coef. Variación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Quian	32	0.259	34.9	20.4	0.748	0.404
Pariacoto	42	0.82	119	163.8	0.515	0.704
Cajamarquilla	42	0.337	486	523.4	0.269	0.627
Pira	42	0.303	621.6	656	0.289	0.511
La Merced	34	0.527	465.3	515.7	0.414	0.581

Indices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret)

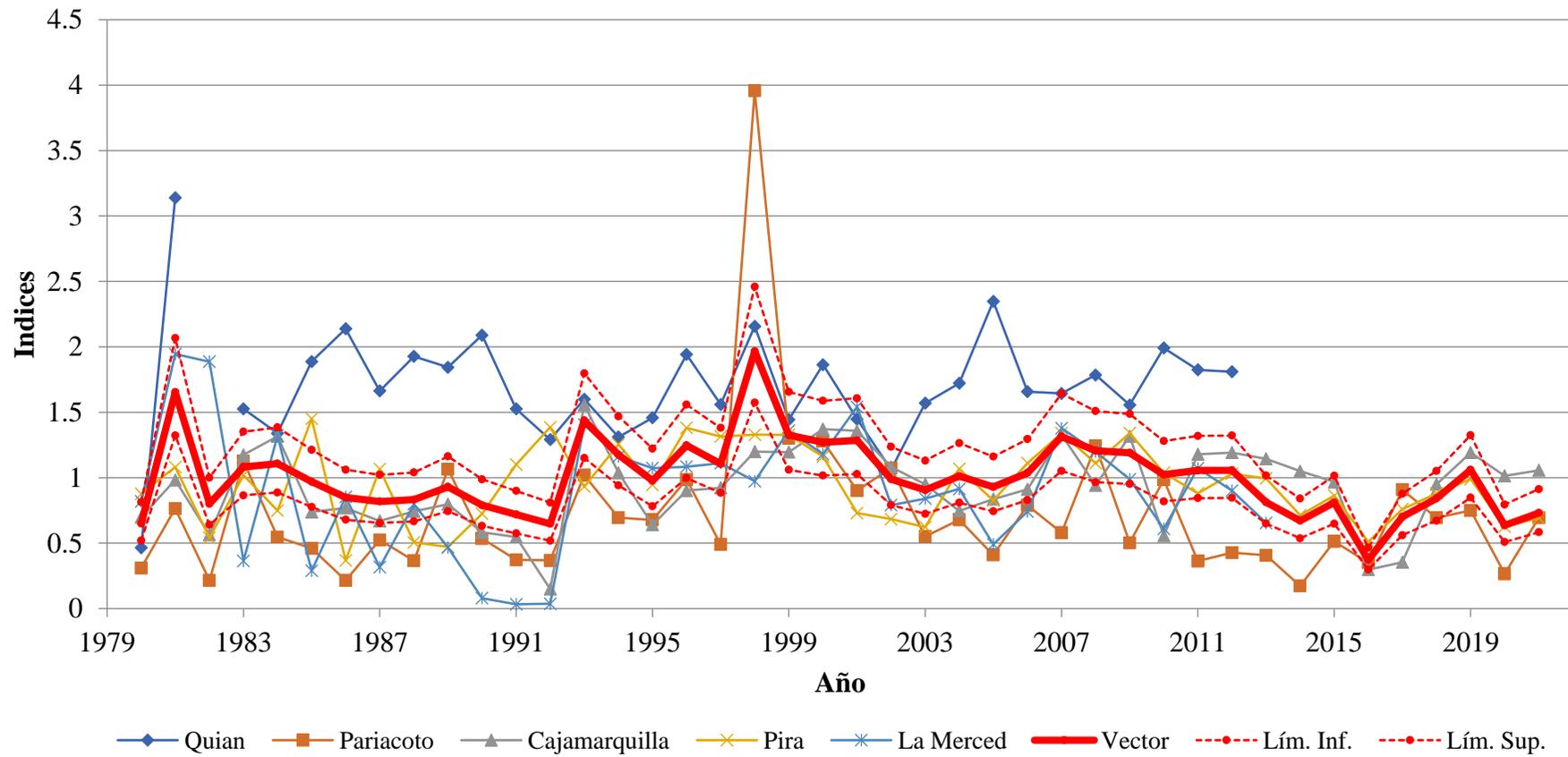


Figura 20: Vector regional de las estaciones

— *Completación y extensión de datos*

Los datos faltantes se completaron con data consistente de las estaciones cercanas y la selección de las estaciones fue propuesta por la correlación que presentan (ver Tabla 9). Por otro lado, para completar los datos se usó el software Hec 4 que utiliza el método de análisis de regresión múltiple donde asume que la distribución de las variables es la normal (Gauss), empleándose sus logaritmos (Hydrologic Engineering Center, 1971).

Para el área de estudio fue considerado como periodo confiable los años de 1980 a 2007 en su mayoría por lo que el estudio hidrológico presentado por la Autoridad Nacional del Agua presenta hasta el 2007. Fue necesario completar a todas las estaciones, sin embargo; hubo dos estaciones que necesitaban extender (La Merced y Quian). (Ver Anexos 6 y 7)

— *Homogeneización de datos*

En primera instancia se tomó los datos estadísticos que la Autoridad Nacional del Agua (ANA) considera en los diversos estudios hidrológicos, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Prueba de tendencias
- b) Pruebas de quiebres de Medias/Medianas
- c) Pruebas de diferencias de Medias/ Medianas

En la Tabla 10, se muestra los resultados con datos completados y extendidos sin corrección obtenido con el software Trend, el cual nos servirá para determinar el año quiebre y realizar las correcciones por los métodos conocidos como “T” de Students y “F” de Fisher.

Del resultado estadístico obtenido, se observa en la Tabla 10, que las estaciones Cajamarquilla y la merced necesitan corrección. Estas estaciones serán analizadas con el análisis de doble masa y análisis estadístico de “T” de Student y “F” de Fisher.

Tabla 10: Resultado de pruebas estadísticas sin corrección de las estaciones

Estación	Tipos de Prueba	Pruebas Estadísticas	Estadístico	Valor Tabular			Resultados
				a=0.1	a=0.05	a=0.01	
*La Merced	Prueba de Tendencias	Mann-Kendall	2.902	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
		Spearman's Rho	3.245	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
		Linear regression	-0.681	1.652	1.971	2.599	NS
	Prueba de Quiebres	Cusum	44	27.389	30.532	36.593	S (0.01)
	Diferencias de Medias	Rank Sum	0.811	1.645	1.96	2.576	NS
		Student's t	0.721	1.652	1.971	2.599	NS
Pariacoto	Prueba de Tendencias	Mann-Kendall	-0.006	1.645	1.96	2.576	NS
		Spearman's Rho	3.91	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
		Linear regression	-0.33	1.652	1.971	2.599	NS
	Prueba de Quiebres	Cusum	25	27.389	30.532	36.593	NS
	Diferencias de Medias	Rank Sum	1.235	1.645	1.96	2.576	NS
		Student's t	1.16	1.652	1.971	2.599	NS
Quian	Prueba de Tendencias	Mann-Kendall	1.032	1.645	1.96	2.576	NS
		Spearman's Rho	1.253	1.645	1.96	2.576	NS
		Linear regression	-0.064	1.652	1.971	2.599	NS
	Prueba de Quiebres	Cusum	14	27.389	30.532	36.593	NS
	Diferencias de Medias	Rank Sum	0.497	1.645	1.96	2.576	NS
		Student's t	-0.271	1.652	1.971	2.599	NS
*Cajamarquilla	Prueba de Tendencias	Mann-Kendall	1.893	1.645	1.96	2.576	S (0.1)
		Spearman's Rho	4.259	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
		Linear regression	2.726	1.652	1.971	2.599	S (0.01)
	Prueba de Quiebres	Cusum	14	27.389	30.532	36.593	NS
	Diferencias de Medias	Rank Sum	-3.234	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
		Student's t	-2.237	1.652	1.971	2.599	S (0.05)
Pira	Prueba de Tendencias	Mann-Kendall	0.49	1.645	1.96	2.576	NS
		Spearman's Rho	0.991	1.645	1.96	2.576	NS
		Linear regression	-0.259	1.652	1.971	2.599	NS
	Prueba de Quiebres	Cusum	20	27.389	30.532	36.593	NS
	Diferencias de Medias	Rank Sum	-0.077	1.645	1.96	2.576	NS
		Student's t	1.168	1.652	1.971	2.599	NS

— Curva doble masa

Conocida también como curva de acumulación, este método se usó para verificar la homogeneidad de los datos, así mismo percatarse de la existencia de anomalías en un periodo de tiempo (Monsalve Sáenz, 2009).

Para este análisis se generó estaciones ficticias en cada grupo, que representó el promedio de las estaciones; con el gráfico obtenido de comparar la ficticia con cada estación se observará el año de quiebre y para decidir el rango de datos dudosos se observa en los Anexos 6 y 7 para la estación La Merced y Cajamarquilla. Finalmente, en la Figura 21, se observa la curva doble masa de las estaciones obtenido con el software *Hydracces*.

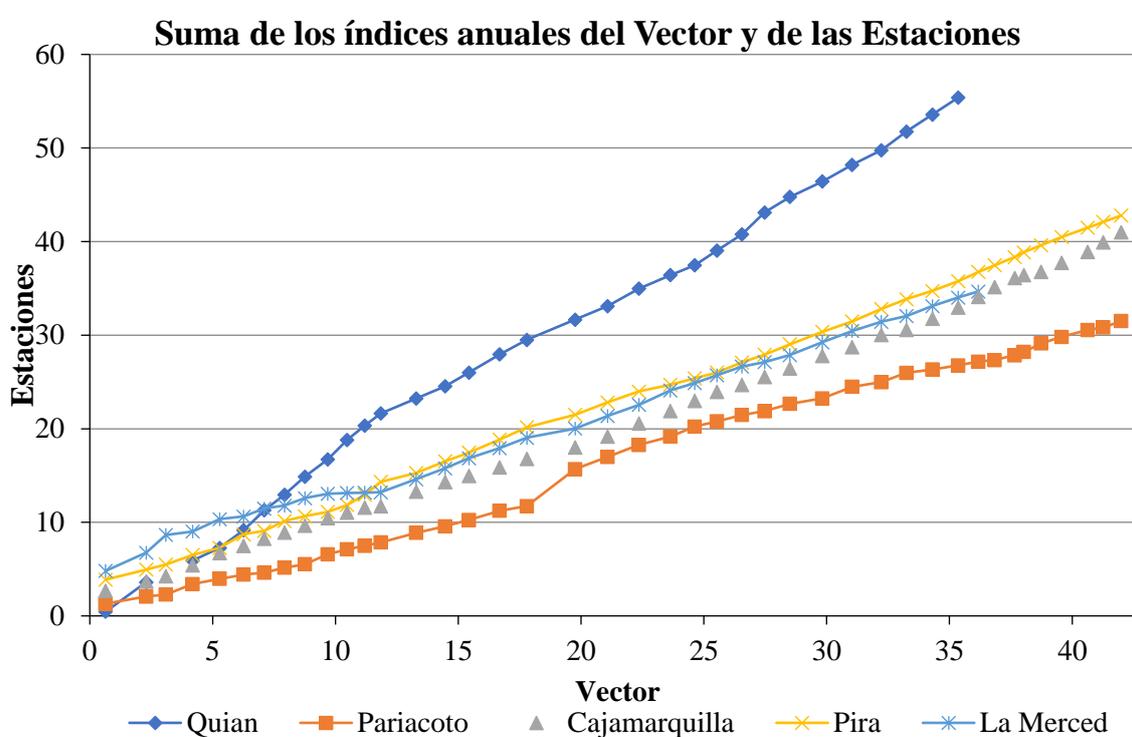


Figura 21: Índice acumulado para las estaciones del área de estudio

Se usó el software Trend para determinar los quiebres tomando en cuenta que hasta el año 2007 son datos confiables propuestos por la Autoridad Nacional del Agua. En la Figura 22 y Figura 23 se tiene la fecha de quiebre para hacer el análisis.

— Cajamarquilla: 2010/06

— La merced: 2011/09

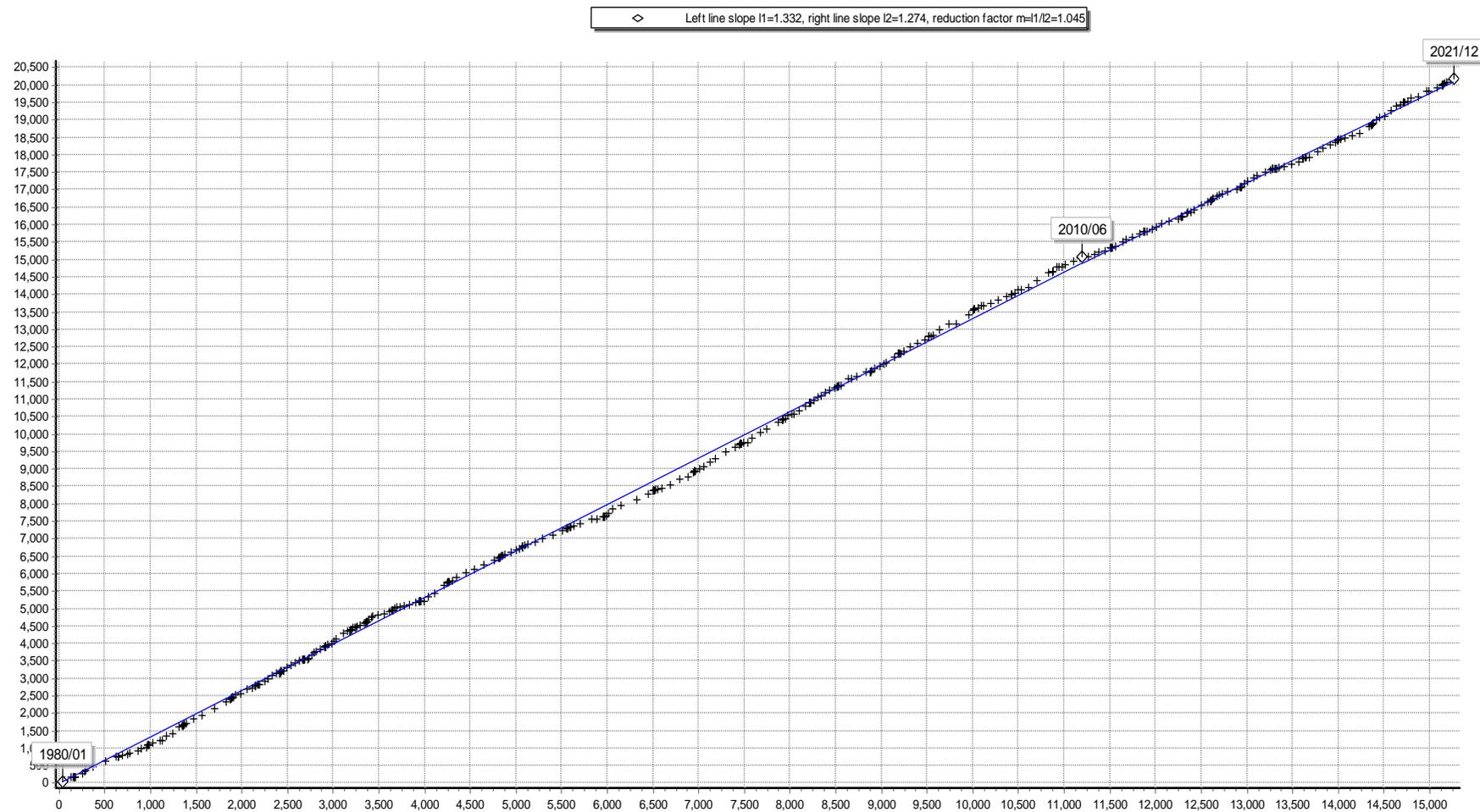


Figura 22: Fecha de Quiebre para la estación Cajamarquilla

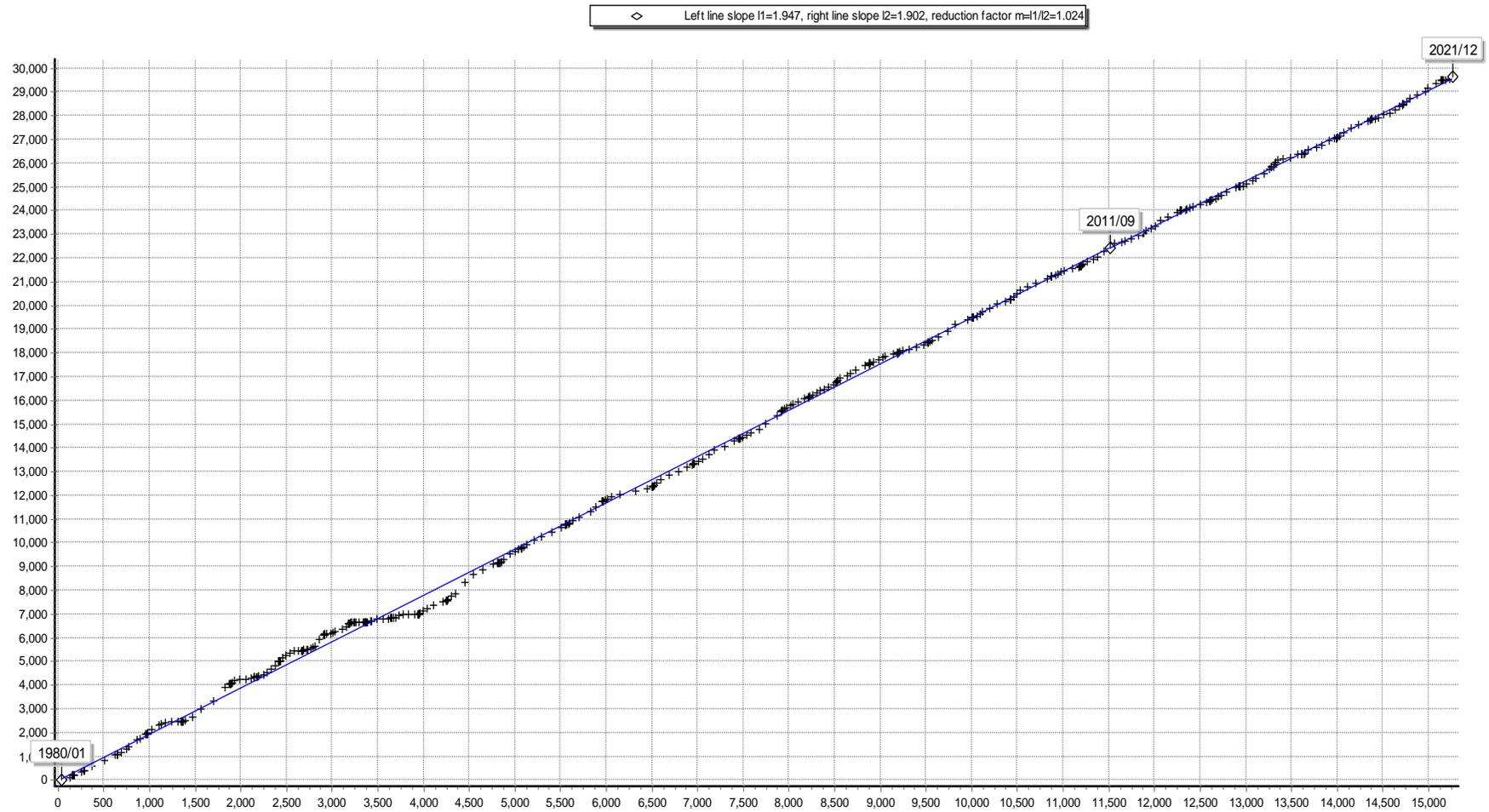


Figura 23: Fecha de quiebre para la estación La merced

— *Análisis Estadístico*

De las pruebas de homogeneización de datos y las curvas de doble masa se tiene el año de quiebre, así como el periodo de datos dudosos y confiables, fueron sometidos a las pruebas de “T” de Student y “F” de Fisher

Análisis de consistencia Media

Este análisis consiste en probar lo valores medios (X1 y X2) de las submuestras sean iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con 5% del nivel de significación mediante la prueba “t” (Ecuación 4 y 5) (Villón Bejar, 2004).

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i ; S_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j ; S_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde se tiene:

x_i = valores de la serie del período 1

x_j = valores de la serie del período 2

\bar{x}_1, \bar{x}_2 = media de los períodos 1 y 2 respectivamente

$S_1(x), S_2(x)$ = desviación estándar de los períodos 1 y 2 respectivamente

n = tamaño de la muestra

n_1, n_2 , = tamaño de las submuestras

$n = n_1 + n_2$

Para determinar el t calculado (t_c) se tiene la ecuación 5

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_{\bar{d}}} \quad (5)$$

Donde $\mu_1 - \mu_2 = 0$; queda como la ecuación 6.

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_{\bar{d}}} \quad (6)$$

Sabiendo que la ecuación 7 y 8:

$$s_{\bar{d}} = \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$s_p = \left[\left(\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

Donde:

s_d = Desviación de las diferencias de los promedios

s_p = desviación estándar ponderada

Para determinar el t tabular (t_t), son obtenidas de las tablas del “t” de Student de los Anexos 6 y 7, tienen una probabilidad del 95% o el nivel de significación del 5%.

Entonces si se tiene:

$$|t_c| \leq t_t \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \text{ (no es necesario realizar la prueba de corrección)}$$

$$|t_c| > |t_t| \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \text{ (Es necesario hacer corrección de la información)}$$

Consistencia de la Desviación Estándar

Con este análisis se comprobó mediante la prueba F de Fisher si los valores de desviaciones estándar de las rangos dudosos y confiables son estadísticamente iguales o diferentes con 95% de probabilidad o 5% de nivel de significancia (Villón Bejar, 2004).

Se calculó las varianzas en ambos periodos con las Ecuaciones 9 y 10:

$$s_1^2(x) = \left(\frac{1}{n_1 - 1} \right) \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad (9)$$

$$s_2^2(x) = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad (10)$$

F calculado (F_c) se hizo con las ecuaciones 11 y 12:

$$F_c = \frac{s_1^2(x)}{s_2^2(x)}, \text{ si } s_1^2(x) > s_2^2(x) \quad (11)$$

$$F_c = \frac{s_2^2(x)}{s_1^2(x)}, \text{ si } s_2^2(x) > s_1^2(x) \quad (12)$$

Cálculo del F tabular se obtiene de las tablas del Anexo 8: 8, para una probabilidad del 95% o con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y grados de libertad (ecuación 13 y 14).

$$\begin{aligned} \text{G.L.N} &= n_1 - 1 \uparrow, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \\ \text{G.L.D} &= n_2 - 1 \downarrow \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{G.L.N} &= n_2 - 1 \uparrow, \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \\ \text{G.L.D} &= n_1 - 1 \downarrow \end{aligned} \quad (14)$$

Donde:

G.L.N. = Grados de libertad el numerador

G.L.D. = Grados de libertad del denominador

Entonces sí:

— Si $F_c \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x)$; entonces no es necesario corregir

— Si $F_c > F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x)$; entonces sí es necesario corregir

En los Anexos 6 y 7, Se muestra los resultados para las estaciones sometidas a las dos pruebas de estadística mencionada anteriormente, donde se corrobora y se ajusta los datos de precipitación.

— *Resultado del tratamiento de datos pluviométricos*

Al terminar de completar y extender datos, análisis previo de estadísticas se volvió a tomar la correlación que existe entre las estaciones con el método de vector regional (VR), se usó el software Hydracces para el periodo de 1982 a 2021 de enero a diciembre como se muestra en la Tabla 11 y Figura 24. Por otro lado, según el análisis de doble masa, se observa en la Figura 25, una tendencia similar en todas las estaciones, con la excepción de la estación Quian. Sin embargo, se incluyó esta estación en el análisis debido a su ubicación única en la zona baja del área de estudio, además de tener en cuenta la altitud en estas zonas.

Tabla 11: Estadísticas del vector regional con datos completos y corrección

Estación	N° Años	Coef. Variación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Quian	42	0.215	35.5	26.2	0.467	0.269
Pariacoto	42	0.513	112.7	129.7	0.368	0.654
Cajamarquilla	42	0.282	519.5	554.5	0.202	0.685
Pira	42	0.283	634.7	660.5	0.245	0.503
La Merced	42	0.471	509.1	593.1	0.351	0.601

— *Mapa de precipitaciones medias*

Para determinar los valores medios de la precipitación en la cuenca se usó el software Hydracces, este programa contiene varios métodos de interpolación como: media aritmética, polígono de Thiessen, IDW y Kriging. Sin embargo, para el área de estudio se tomó el último método por que se apoya en la interferencia de una función de correlación espacial, considerando que la lluvia constituye una función aleatoria en ciertos puntos. Por ende, es necesario estimar lo mejor posible la precipitación en otros sitios del área de estudio y simular eventualmente el efecto de la lluvia en estos puntos de manera aleatoria (Cisneros Iturbe *et al.*, 2001). Entonces, Kriging posee un procedimiento geoestadístico avanzado donde la varianza de salida opcional del ráster de predicción contiene la varianza de Kriging en cada celda del ráster de salida, suponiendo que los errores de Kriging se distribuyen normalmente, existe una probabilidad del 95.5% de que el valor Z real en la celda sea el valor predicho en el ráster, más o menos dos veces la raíz cuadrada de valor en el ráster de varianza (ESRI, 2021a). El resultado se muestra en la Figura 26 y la ponderación en la Tabla 12.

Indices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret)

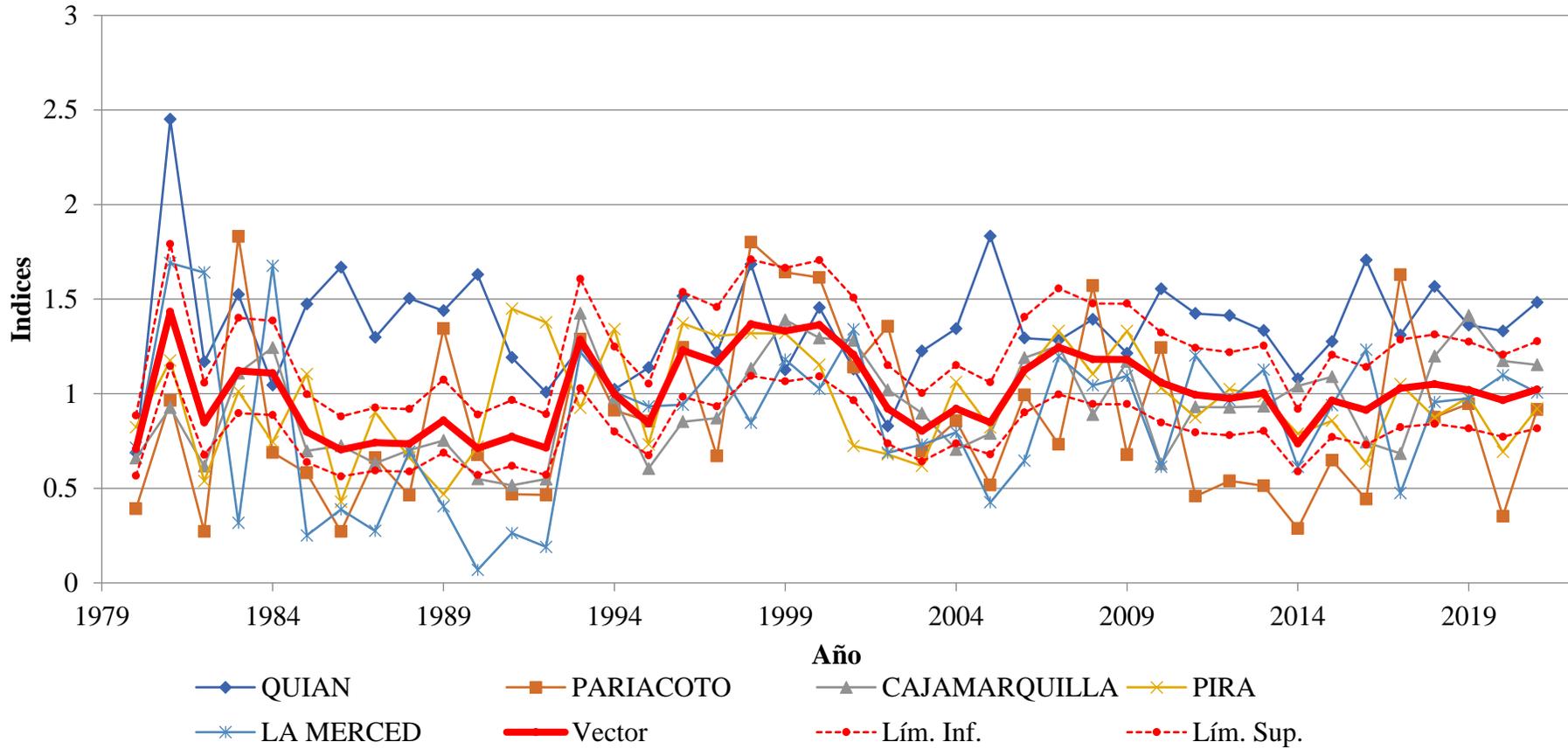


Figura 24: Vector regional de las estaciones

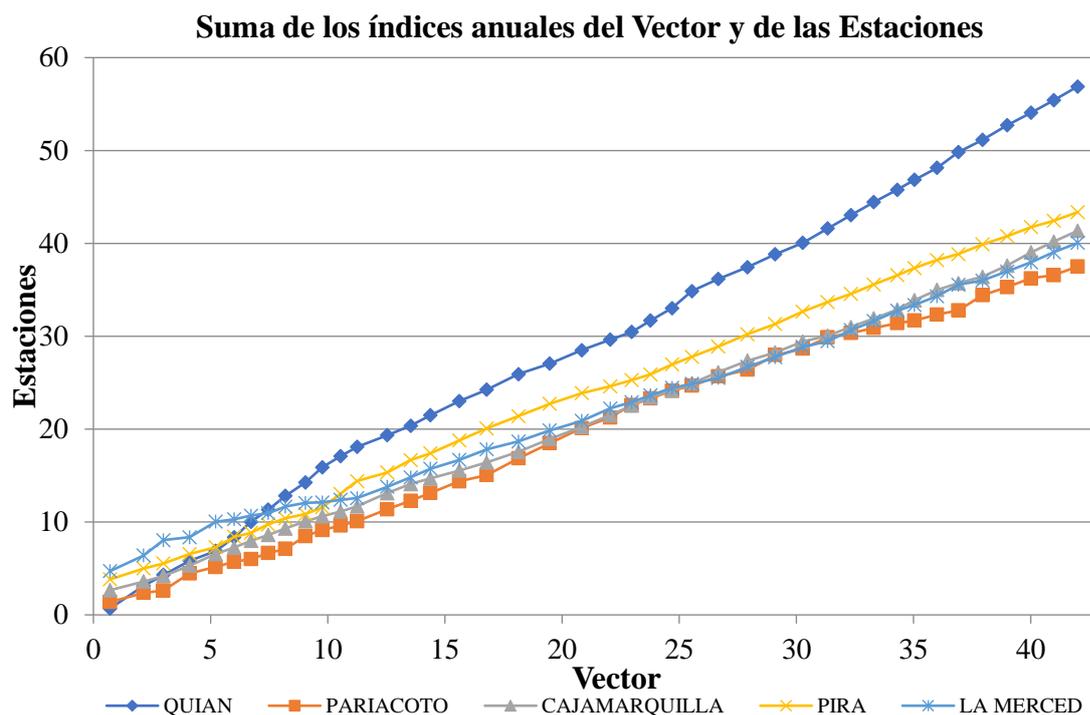


Figura 25: Análisis de doble masa entre el vector y las estaciones

Tabla 12: Clasificación y ponderación de las precipitaciones

Capa Temática	Categoría (mm)	Clasificación	peso
precipitación	<50	muy baja	1
	50-100	baja	2
	100-200	moderada	3
	300-400	buena	4
	>400	muy buena	5

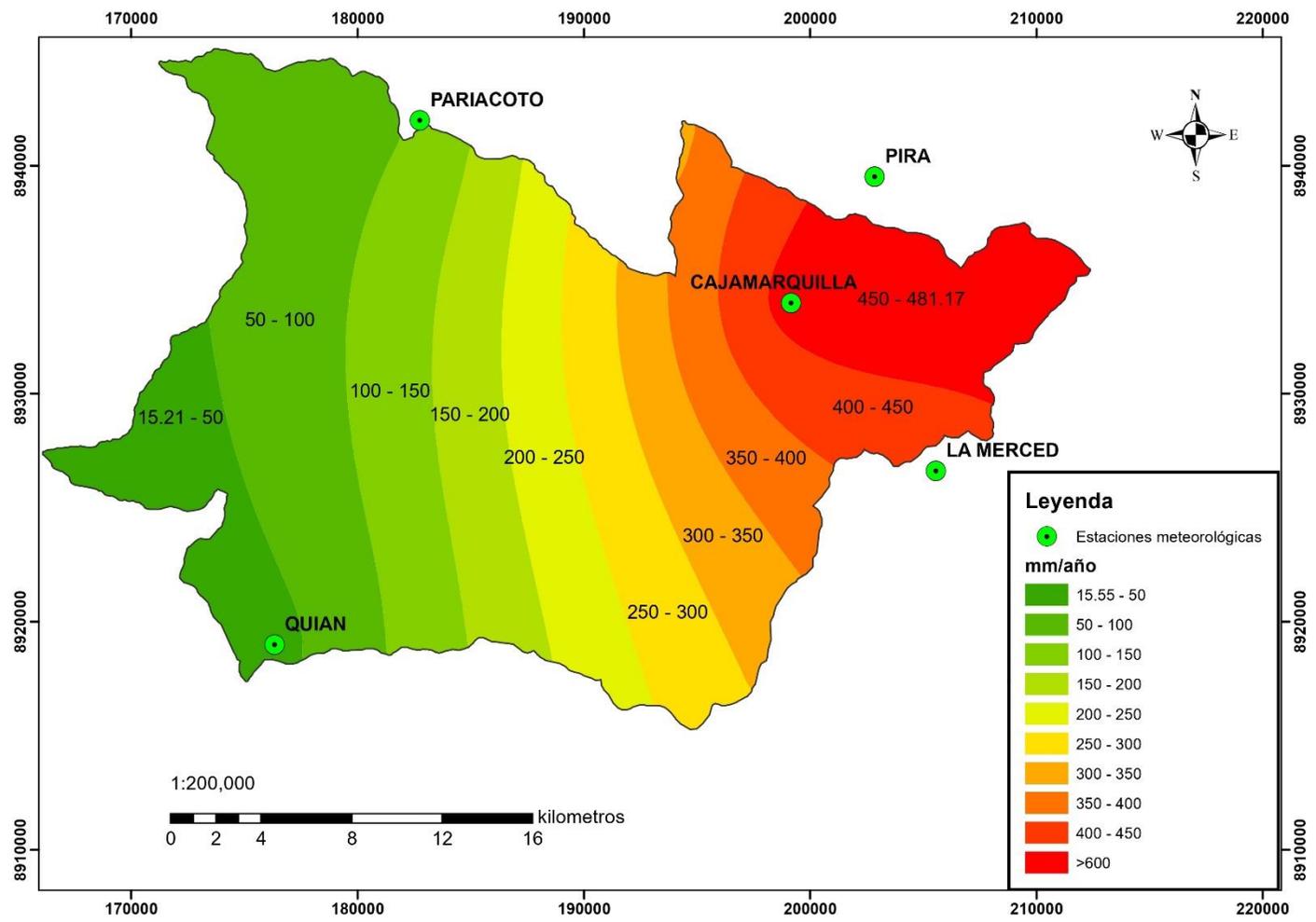


Figura 26: Precipitación media en el área de estudio

b) Imágenes Satelitales

— *Modelo digital de elevaciones*

El área de estudio usa datos del sensor Alos Palsar con una resolución producto de 12.5 m
Las escenas descargadas fueron:

- ALPSRP261556980 (22/12/2010 04:02:51Z)
- ALPSRP261556990 (22/12/2010 04:02:43Z)

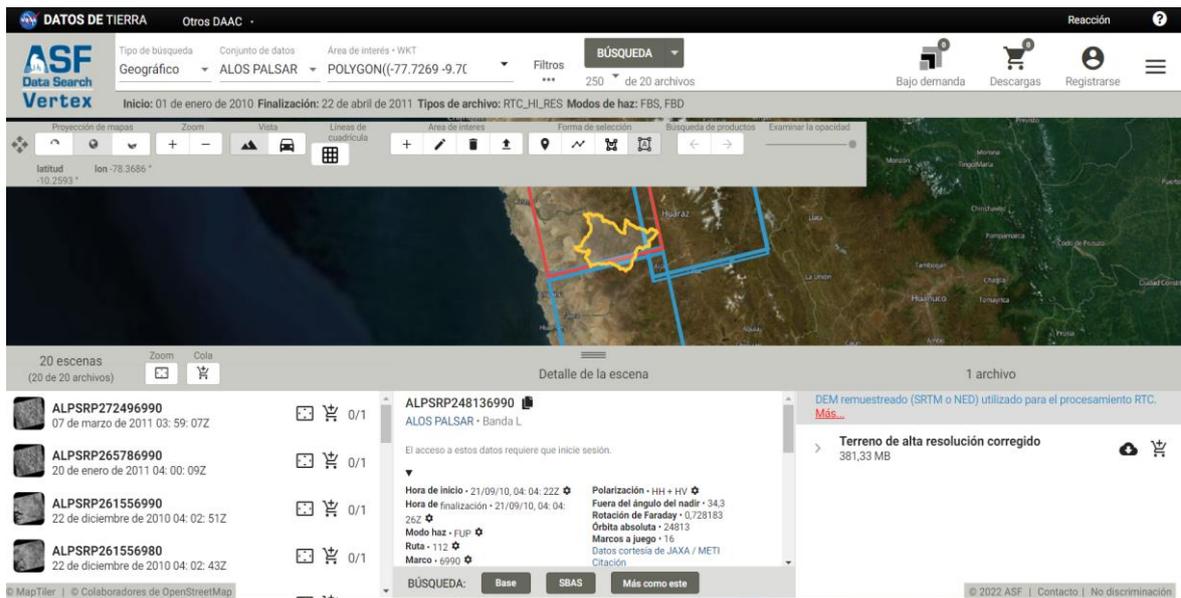


Figura 27: Fuente de descargas de imágenes Alos Palsar

Fuente: UAF (2024).

— *Imagen Multiespectral – Sentinel 2*

La Agencia Espacial Europea, nos brinda datos satelitales de manera operativa para diferentes aplicaciones como la agricultura de precisión, gestión del agua, monitorización de bosques, etc. El área de estudio se compone de la siguiente imagen:

S2B^a_MSIL2A^b_20210806T152639^c_N0301d_R025^e_T18LTP^f_20210806T210702^g

Donde:

- a: Satélite (S2A o S2B)
- b: Instrumento MSI y nivel de procesado (MSIL1C, MSIL2A)
- c: Fecha de adquisición (inicio final), el formato de fecha:YYMMDDTHHMMSS

d: Número de línea de base de procesamiento

e: Número de líneas de procesamiento

f: Código de observación de la tile

g: Fecha de generación del producto

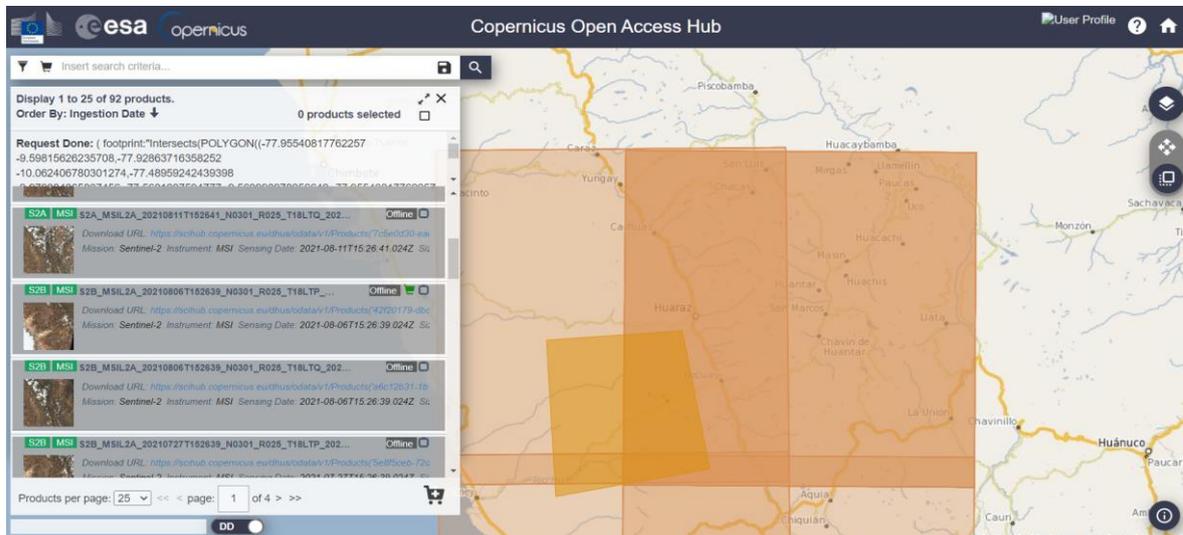


Figura 28: Fuente para descargar imágenes Sentinel

Fuente: Copernicus (2020).

c) Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se define como la longitud de cursos de agua por unidad de superficie. La densidad de drenaje es una función inversa de la permeabilidad. Cuanto menos permeable es una roca, menor es la infiltración de las precipitaciones, por el contrario, concentración de la escorrentía superficial es mayor. (Magesh *et al.*, 2012a). Altas densidades de drenaje indican que una gran proporción de la precipitación escurre. Por otro lado, las densidades de drenaje bajas indican una alta infiltración de las precipitaciones. Un valor bajo de densidad de drenaje es más favorable para un alto potencial de agua de grupo y se le asigna un mayor peso (Mandal *et al.*, 2016)

El índice de densidad de drenaje es una medida que proporciona información sobre el grado de desarrollo de un sistema de drenaje. Este índice se calcula como la relación entre la longitud total de los cursos de agua (L, km) y el área total (A, km²) de la cuenca el que se expresa en la Ecuación 15 (Mejía Marcacuzco, 2012).

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (15)$$

La densidad de drenaje de la zona de estudio se ha calculado a partir del modelo de elevación digital de terreno con el software ArcGIS. A continuación, se detalla el procedimiento.

1. Preparación de datos: Al modelo digital de elevación, se realiza el relleno de sumideros con la herramienta “*Fill*” y se asignan las coordenadas de la zona de estudio (17 S)

2. Cálculo de la acumulación de flujo: Con la herramienta “*Flow direction*” determina la dirección del flujo de agua en un DEM, el cual sirve como input para obtener “*Flow Accumulation*”. Finalmente, con las herramientas de “*stream order*” y “*Raster to polygon*” se obtiene la red de drenaje en formato vectorial. De este último se calculó la longitud de los ríos en km.

3. Cálculo de la densidad de drenaje: La herramienta “*Line density*” considera un vecindario alrededor de cada celda del raster de salida y cuenta el número de líneas que intersecan o están dentro de ese vecindario. El campo del vecindario se establece mediante el parámetro de “*Search Radius*”

La Ecuación 16 es la que usa esta herramienta “*Line Density*”:

$$Densidad\ de\ líneas = \frac{\text{número de línea en vecindario}}{\text{área del vecindario}} \quad (16)$$

Siguiendo la Ecuación 15, para obtener la densidad de drenaje en el área de estudio en la herramienta “*Line density*” se considera la longitud de los ríos en lugar de Número de línea en vecindario, de tal forma que se obtiene la densidad de drenaje. En la Figura 29 y la Tabla 13, se muestra el cálculo de la densidad de drenaje para la zona de estudio.

Tabla 13: Clasificación y ponderación para la densidad de drenaje

Capa Temática	Categoría (km/ km ²)	Clasificación	Peso
Densidad de Drenaje	1 a 2	alto	5
	2 a 3	bueno	4
	3 a 4	Moderado	3
	>4	bajo	2

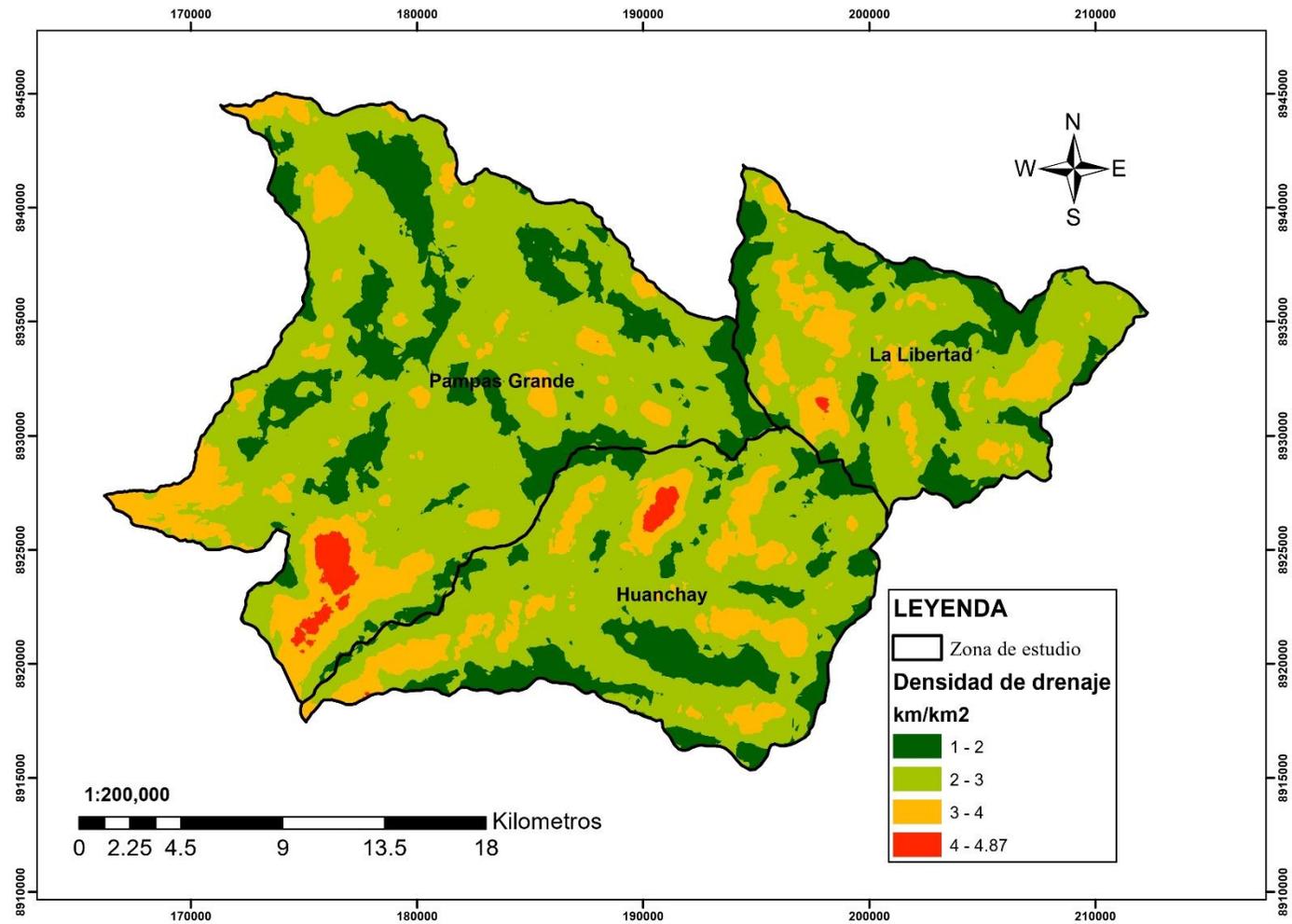


Figura 29: Densidad de drenaje

d) Pendiente

La pendiente es uno de los factores que influyen directamente en la infiltración de las precipitaciones, porque las pendientes más pronunciadas generan menos recarga debido a que el agua fluye rápidamente sobre la superficie en consecuencia no permite infiltrarse (Fonseca *et al.*, 2019).

- La metodología que se utilizó para obtener la pendiente del terreno fue la siguiente secuencia:
- Del satélite Alos Palsar se descargó las dos escenas que contienen el modelo digital de elevaciones (DEM) con resolución de 12.5 m en formato “.tiff”.

Usando el Software ArcMap 10.5 aplicamos la función “slope” se genera el mapa de pendientes y reclasificamos en cinco partes de acuerdo con los diversos estudios realizados.

En la Tabla 14 y Figura 30, se observa el resumen y ponderación de las pendientes que hay en la zona de estudio el cual se clasificó en muy buena, buena, moderada, pobre y muy pobre de acuerdo con la clasificación de los estudios realizados por (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018; Mandal *et al.*, 2016).

Tabla 14: Clasificación y ponderación de las pendientes

Capa Temática	Pendiente (grados)	Clasificación	peso
Pendiente	0° - 5°	muy buena	5
	5° - 10°	buena	4
	10° - 20°	moderada	3
	20° - 30°	pobre	2
	> 30°	muy pobre	1

Fuente: Macas-Espinosa & López-Escobar (2018) y Mandal *et al.* (2016).

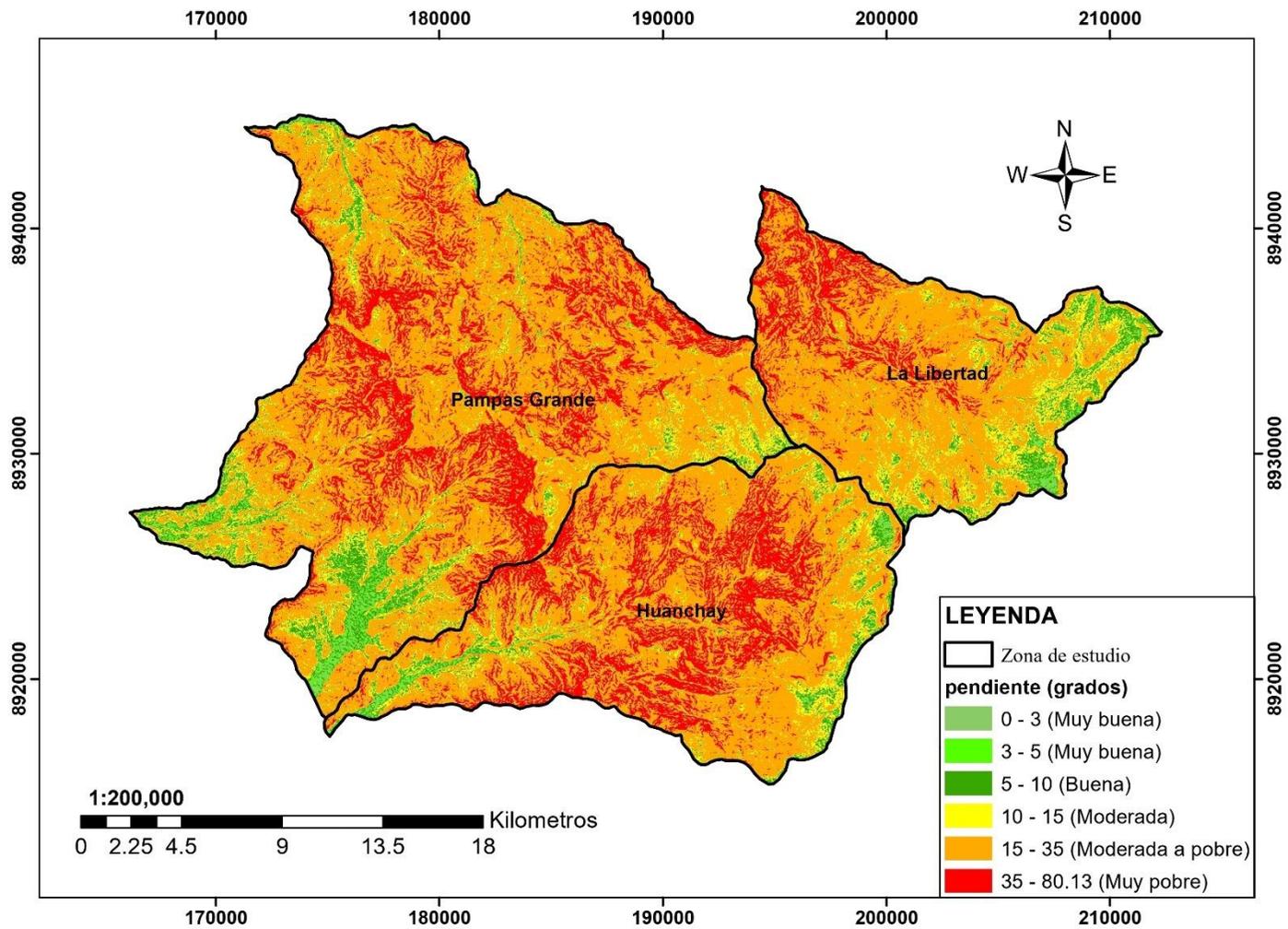


Figura 30: Variación espacial de las pendientes del terreno

e) Geología

Se toma en cuenta las características litológicas de las unidades litoestratigráficas debido a que desempeñan un papel importante en la configuración del mapa hidrogeológico. El tipo de roca de cualquier zona tiene un efecto significativo sobre la disponibilidad de las aguas subterráneas y su recarga. Aunque algunas investigaciones han ignorado este factor al considerar fallas y los caracteres de drenaje como una función de la porosidad primaria y secundaria, se incluye la geología para reducir la incertidumbre en la determinación de las fallas y el drenaje.

La litoestratigráfica para la zona de estudio se obtuvo del portal GEOCATMIN con apoyo en su descripción en el Boletín N° 76, Serie A: Carta geológica Nacional y se visualiza en la Figura 33.

- **Depósitos aluviales:** Acumulaciones de grava, limo y arcillas con clastos subangulosos de diferente composición. Acumulaciones de arenas, limos y clastos redondeados, que conforman terrazas recientes. Su espesor varía de 1 a 3 m. Estos depósitos están constituidos por materiales acarreados por los ríos emplazados en las depresiones de los valles formando terrazas y conos fluviales deyectivos, se puede observar a lo largo de los principales ríos de la costa y el río Casma, formando extensas terrazas fluviales, con presencia de arcillas y arenas finas con gravas arenosas bien clasificadas, con una profundidad de mezclas con cantos rodados y arenas que en parte son usados para la agricultura. Asimismo, están constituidas por gravas mal clasificadas mezclada con limos y arenas en forma caótica, en lugares de cursos amplio se han desarrollado las capas de arcilla y arcilla gravosa que se usa para la agricultura.
- **Tonalita:** Roca leucocrata de grano medio a grueso inequigranular. Presenta cristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y anfíboles, además presenta xenolitos melanocratos.
- **Granodiorita:** Roca leucocrata de grano medio a grueso inequigranular. Presenta cristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y anfíboles, además presenta xenolitos melanocratos. Cuerpos intrusivos de composición granodiorítica que se distribuyen ampliamente en todo el departamento conformando cuerpos irregulares de diferente dimensión. Los afloramientos de este macizo son conspicuos por su color y por las formas redondeadas de su superficie producidas por el intemperismo. La roca fresca es de color gris claro a blanco grisáceo, de textura granular, grano grueso,

holocristalino. Está compuesto principalmente de plagioclasas, cuarzo y moscovita (mica blanca). Además, se observan escasos granos de biotita. Las plagioclasas y el cuarzo constituyen la masa principal de la roca. La mica se presenta en masas irregularmente agrupadas. Es probable que esta granodiorita esté relacionada a la masa batolito granodiorítico de la Cordillera Occidental cuya edad se considera entre en Cretácico Superior y el Terciario Inferior.

- **Areniscas:** Areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio intercaladas con lutitas pardo amarillentas y ocasionales mantos de carbón. Espesor aproximado de 200 m. Intercalación de areniscas grises claras de grano medio, calizas color belga y lutitas parduzcas con depósitos de flujos piroclásticos retrabajados con clastos redondeados, con un promedio de 400 m.
- **Bloques:** Acumulaciones de cantos y bloques subangulosos a angulosos consolidados en una matriz limosa. Conforman espesores de 25 a 50 m.
- **Calizas:** calizas color belga y lutitas parduzcas con depósitos de flujos piroclásticos retrabajados con clastos redondeados, con un promedio de 400 m. Calizas color azul gris a verde, capas de yeso, limo arcillitas rojizas.
- **Andesita:** Depósitos de flujos de lava andesítica, color gris oscuro, textura porfírica con cristales de plagioclasa bien cristalizados. Conforman un espesor aproximado de 300 a 400 m.
- **Lutita Limo arcillita:** Lutitas grises a negras, laminadas a veces pizarrosas intercaladas con limo arcillitas pardo-amarillentas y calizas grises oscura (0.1 - 0.3 m)
- **Tonalita:** Rocas ígneas de textura granular hipidiomórficas, siendo los minerales esenciales las plagioclasas que en composición varían de andesina a oligoclasa y sus formas son euhedrales a anhedrales, ocasionalmente como granoblastos; se tiene además hornblenda y cuarzo de forma anhedral. Entre los minerales accesorios se consideran la sericita, epidota-zoicita, arcillas, feldspatos potásicos, piroxenos, cloritas, opacos en trazas, así también carbonatos, albita, esfena, apatito y zircón. Se distribuyen en forma paralela a la unidad anterior y se asume que dichas intrusiones han ocurrido durante el cretáceo inferior.
- **Tonalita granodiorita:** Cuerpo intrusivo de composición granodiarítica y tonalítica que se distribuye ampliamente a lo largo de la cordillera blanca y negra. La roca fresca es de color gris claro a blanco grisáceo, de textura granular, grano grueso, holocristalino. Está compuesto principalmente de plagioclasas, cuarzo y moscovita (mica blanca).

Además, se observan escasos granos de biotita. La tonalita es de textura granular hipidiomórficas, siendo los minerales esenciales la plagioclasa, hornblenda y cuarzo. Entre los minerales accesorios se considera la sericita, epidotazoicita, arcillas, feldespato potásico, piroxenos, cloritas y opacos en trazas.

- **Granitos y Monzogranitos:** Son rocas intrusivas compactas de color gris claro a blanquecino con tonalidades verdosas, de textura fanerítica, de grano grueso, con densidad media y magnetismo muy débil; está compuesta mayormente por cuarzo y plagioclasas y feldespatos potásicos. Está usualmente en afloramientos de topografía moderada a fuerte.
- **Depósitos morrénicos:** Son característicos de la sedimentación glacial que se producen por la acumulación de roca y arcilla (tillitas), transportados y depositados por un glaciar. Las morrenas forman crestas y lomas alargadas, se ubican en la zona del frente glacial.

Para ponderar se tomó en cuenta los valores estimados por Sanders sobre la porosidad eficaz (%), debido a que representa la fracción del volumen de una formación geológica que está disponible para almacenar y transmitir agua subterránea. Como se observa en la Tabla 15. Así como los valores estimados de la conductividad hidráulica (m/día) de la Tabla 16. (Sánchez, 2019).

Tabla 15: Valores de la porosidad (%), según Sanders (1998)

Tipo	Total	Eficaz
Arcillas	40 a 20	0 a 5
Limos	30 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale Intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fracturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Fuente: Sanders (1998)

Tabla 16: Valores de conductividad hidráulica (m/d)

Rocas	Schwartz	Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Materiales no consolidados						
Grava	49 a 183	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
Grava con arena						
Arena gruesa	24 a 91	0,1 a 500			1 a 100	1 a 100
Arena media	20 a 29	0,1 a 50	0,01 a 1000	1 a 1000		
Arena fina	8 a 16	0,02 a 20			0,01 a 1	
Arena arcillosa	6 a 29			0,01 a 100	0,001 a 0,1	0,01 a 1
Silt, loess	0,3 a 1,2	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
Arcilla	3*10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada		10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷		
Rocas sedimentarias						
Calizas carstificadas		0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
Calizas, dolomías		10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		0,1 a 1
Areniscas		3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
Argilitas (siltstone)		10 ⁻⁶ a 0,001				
Pizarras sedimentarias (shale) intactas		10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
Pizarras sed (Shale) fracturadas/alteradas			10 ⁻⁴ a 1			

Continuación...

Rocas	Schwartz	Domenico	Smith &W	Freeze	Fetter	Sanders
Rocas cristalinas						
Basalto inalterado, sin fracturar			10^{-6} a 10^{-3}			10^{-6} a 10^{-3}
Basalto fracturado / versicular cuaternario			10 a 1000			
Basalto permeable		0,03 a 2000		0,02 a 1000		
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar		10^{-9} a 10^{-5}	10^{-9} a 10^{-5}	10^{-9} a 10^{-5}		10^{-9} a 10^{-5}
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas		0,001 a 25	10^{-5} a 1	0,0005 a 20		10^{-5} a 1
Granito alterado		0,3 a 5				
Grabro alterado		0,05 a 0,3				

Fuente: Sánchez (2019).

En adición a los valores estimados; se usó la clasificación de permeabilidad primaria de la Tabla 17. (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018).

Tabla 17: Atributos de la litología y conductividad hidráulica

Permeabilidad Primaria	Litología	Permeabilidad Primaria	Litología
Alta	Deposito aluvial Terraza aluvial		Andesita basáltica Conglomerado arcilla
Media	Deposito glacial Conglomerado arenisco	Baja	Andesitas Arcilla Caliza pizarra Rocas Metamórficas Cuarcita Lutita
Baja a Media	Toba Aglomerado Flujos de lava andesítica		
Impermeable	Granodiorita Granito Peridotita Filita Esquistos Anfibolita Riolita, Tonalita	Muy baja	Rocas Volcánicas Intercalaciones de lava Intercalaciones de Sedimentos Capas de lava Capas meta volcánicas

Fuente: Macas-Espinosa & López-Escobar (2018)

Fallas: Es una zona de fractura con desplazamientos diferenciales. Las fallas son de tres tipos: normal, inversa y de rumbo.

— Fallas Normales: En la zona se encuentra fallas normales como se observa en la Figura 31 y Figura 32. Lineamientos: Son factores condicionantes de los procesos de inestabilidad de ladera.



Figura 31: Fallas normales en el área de estudio - Huanchay



Figura 32: Fallas normales en el área de estudio - Pampas Grande

De lo mencionado y considerado en esta sección, en la Figura 33 y Tabla 18, se presenta la ponderación de acuerdo con las unidades litológicas que presenta el área de estudio.

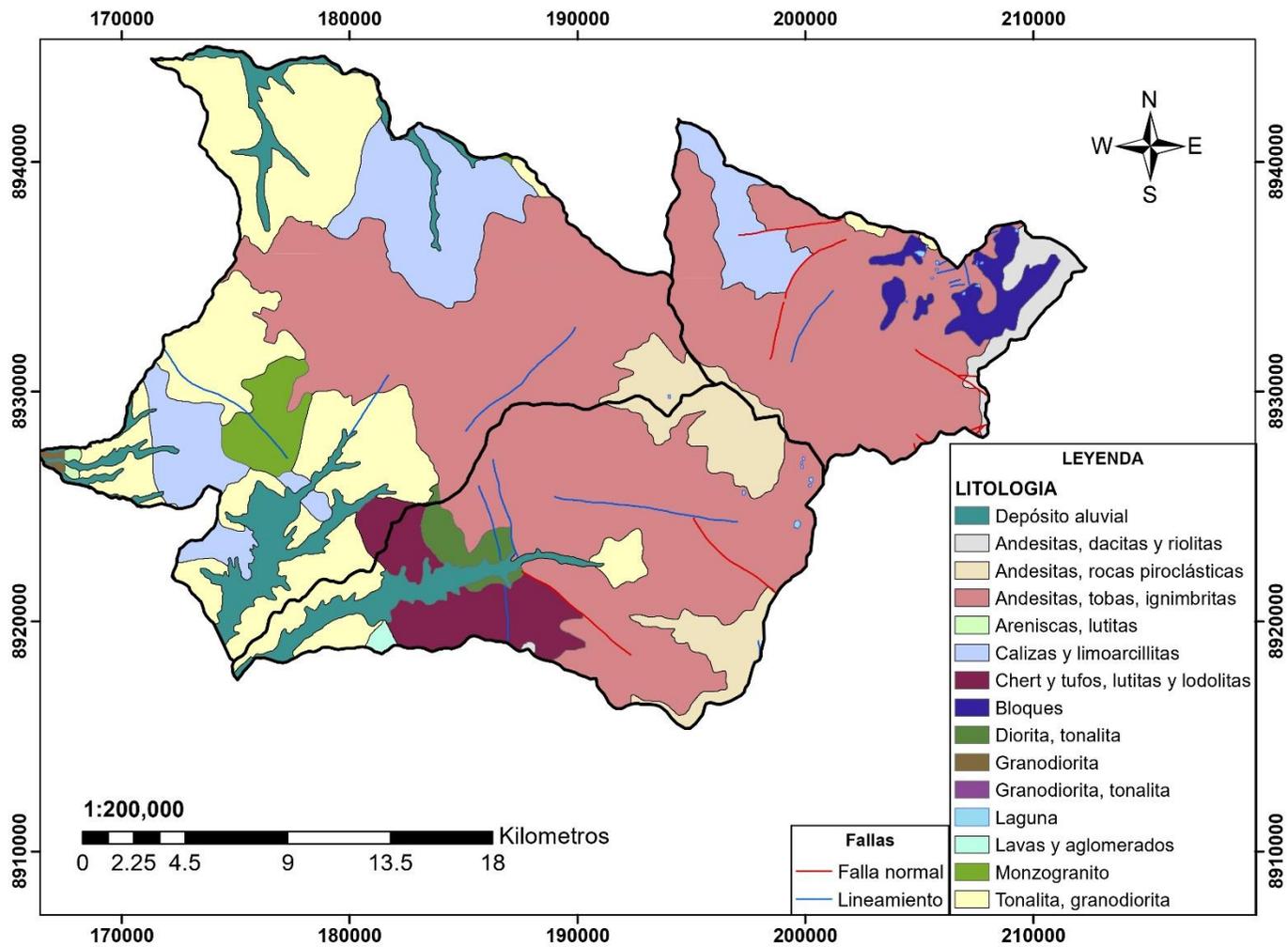


Figura 33: Mapa geológico y estructural

Tabla 18: Clasificación y ponderación de la litología

N°	Nombre	Grupo	Descripción	Litología	Área (km ²)	Peso
1	Laguna	Laguna	Laguna	Laguna	0.41	4
2	Ks-bc/hu-gd	Batolito de la Costa - Super Unidad Humaya	Granodiorita	Granodiorita	0.58	1
3	Ki-ca	Formación Carhuaz	Areniscas gris verdosas, lutitas negras y limolitas marrones, gris verdosas, lutitas negras y limolitas marrones.	Areniscas, lutitas	0.65	5
4	Ki-ju	Formación Junco	Lavas almohadilladas, aglomerados, flujos de lavas, lavas brechadas y horizontes tobáceos	Lavas y aglomerados	1.13	4
5	Ki-bc/p-di,tn	Batolito de la Costa - Super Unidad Paccho - diorita, tonalita.	Diorita, tonalita	Diorita, tonalita	7.18	1
6	PN-c	Grupo Calipuy	Andesitas, dacitas y riolitas de color gris pardo, marrón, morado, en bancos gruesos. conglomerados y lutitas marón rojizos.	Andecitas, dacitas y riolitas	9.51	3
7	Pe-bc/p/p-mgr	Batolito de la Costa - Super Unidad Pativilca - Plutón Pariacoto - monzogranitola Costa - Super Unidad Pativilca - Plutón Pariacoto	Monzogranito	Monzogranito	12.9	1

Continuación...

N°	Nombre	Grupo	Descripción	Litología	Área (km²)	Peso
8	Q-gl	Depósito glaciario	Depósitos morrénicos, bloques angulosos rellenos con arcillas, limos y arenas.	Bloques	13.16	3
9	Ki-coch	Formación Cochapunta	tonalita Chert y tufos, lutitas y lodolitas. Diorita, tonalita.	Chert y tufos, lutitas y lodolitas	28.18	3
10	PN-c/s	Grupo Calipuy - Miembro superior	Andesitas, rocas piroclásticas gruesas de composición andesítica con ignimbritas y tobas dacíticas.	Andesitas, rocas piroclásticas	39.16	3
11	Q-al	depósito Aluvial	Acumulación de grava, arena, limo y arcillas con clastos subangulosos a angulosos de diferente composición.	depósito Aluvial	43.37	5
12	Ki-s,ca	Formación Santa, Carhuaz	Calizas color azul grises, limoarcillitas color gris a verde, capas de yeso, limoarcillitas rojizas.	Calizas y Limoarcillitas	74.3	4
13	Ks-bc/sr/c-tn,gd	Batolito de la Costa - Super Unidad Santa Rosa - Unidad Corralillo	Granodiorita y tonalita	Granodiorita y tonalita	128.99	1
14	Peo-c-lv,pi	Grupo Calipuy - lavas, rocas piroclásticas	Andesitas, tobas, ignimbritas, flujos de cenizas y clasticastobas, ignimbritas, flujos de cenizas y clasticas	Andesitas, tobas e ignimbritas	350.56	3

f) Suelos

El suelo juega un papel importante en la determinación de las zonas con potencial de agua subterránea. Por ejemplo, los suelos de textura gruesa suelen ser más permeables, mientras los de textura fina son menos permeables. Se debe tener en cuenta la alta permeabilidad que permite tasa de infiltración rápida por lo que gran parte del agua de lluvia llega con mayor velocidad a la napa freática. (Mandal *et al.*, 2016)

El mapa de suelos del área fue obtenido del sistema nacional de información sobre el suelo ofrecido por la FAO/UNESCO se presenta en la Tabla 19, que considera una capa superior del suelo (0-30 cm) y para subsuelo (30-100 cm) para parámetro químicos y físicos (Food and Agriculture Organization [FAO], 1980b).

Tabla 19: Características de suelos en la zona de estudio según FAO

Número de registro	Nombre de la unidad cartográfica	arena (%) superficie de tierra	arena (%) subsuelo	Limo (%) superficie de tierra	Limo (%) subsuelo	Arcilla (%) superficie de tierra	Arcilla (%) subsuelo	Peso
5518	I-Bh-Tv-c	59.527	41.702	21.084	13.784	19.389	9.527	5
5527	I-HI-KI-bc	45.584	29.033	24.544	15.869	29.955	20.095	1
5533	I-KI-c	49.35	19.8	25.075	14.725	25.6	14.025	2
5548	I-c	58.9		16.2		24.9		4

Fuente: FAO (1980a).

Donde las características de cada tipo de suelo se podrán ver el en 10 y el nombre de cada símbolo es:

Bc: Chromic Cambisols (Cambisoles crómicos)

I: Lithosols

Bh: Humic Cambisols (Cambisoles húmicos)

C: Chernozems

HI: Luvic Phaeozems

KI: Luvic kastanozems

Tv: Vitric Andosols

g) Uso actual de tierras

En la determinación del uso actual de tierras se usó como referencia de clasificación de Uso Actual de la Tierras propuesto por la Unión Geográfica Internacional (UGI). Además, como complemento se tiene en cuenta las imágenes proporcionadas por Google Earth y los mapas disponibles de ecosistemas y cobertura vegetal realizado al 2015 que fueron propuestos por el (MINAM). Sin embargo, fue necesario realizar modificaciones menores para el área de estudio mediante el proceso de imagen multiespectral del satélite Sentinel 2. Por lo que se consideró las siguientes fases:

- Las bandas de las imágenes Sentinel 2 con producto de nivel 2A (imágenes con reflectancia nivel de superficie con corrección atmosférica) fueron combinadas de acuerdo con la Tabla 20, con el fin de hacer una clasificación más precisa.

Tabla 20: Combinación de banda Sentinel-2

Resultado composición	Combinación de bandas
Color Natural	B8-B4-B2
Falso Color Urbano	B12-B11-B4
Color Infrarrojo (vegetación)	B8-B4-B3
Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)	$(B8A-B4)/(B8A+B4)$
Índice de Humedad	$(B8A-B11)/(B8A+B11)$
SWIR	B12-B8A-B4
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)	$(B3-B8)/(B3+B8)$

Fuente: European Space Agency (2022).

- -Proceso de la clasificación supervisada de la imagen donde se le asignó una categoría de acuerdo con lo propuesto por la Unión Geográfica Internacional (UGI) (ver Tabla 21). Así como el previo conocimiento de área que fue realizado en la visita a campo. Del cual se tienen una primera aproximación.
- -La clasificación supervisada fue realizada en la herramienta ArcGIS que nos permite clasificar de acuerdo con cada pixel, donde se determina con polígonos las celdas similares con previo conocimiento, para luego generar la firma espectral con la herramienta *create signatures*.

— -Se usó el método de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*), porque combina la media, varianza y covarianza de cada categoría en cada banda. En el software ArcGIS se encuentra en la siguiente ruta: (ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Multivariate > Maximum Likelihood Classification) (Liang *et al.*, 2020).

Tabla 21: Clasificación y ponderación del uso de la tierra según la UGI

Categoría de uso actual de la tierra		Descripción de las categorías	Peso
1	Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	1
2	Terrenos con vegetación cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	5
3	Cardonales	Terrenos con praderas naturales	3
4	Depósitos aluviales	Terrenos con drenados	4
5	Desierto costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	3
6	Lagos, lagunas y cochas	Zona de agua	2
7	Matorrales y bosques	Terrenos con bosques, bosques húmedos y matorrales	4
8	Pajonal andino	Terrenos con praderas naturales	3

Fuente: Cesel ingenieros (s.f.) y International Geographical Union (1976).

h) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fue generada mediante el caulo de operaciones algebraicas de las bandas 8 y 4 de las imágenes multiespectrales Sentinel 2 de producto 2A, el cual nos permitió determinar la superficie de vegetación (Carbajal & Onofre, 2020). El análisis del NDVI considera una estimación aproximada de la cantidad de vegetación presente y de la perspectiva de las aguas subterráneas en el espacio (Mandal *et al.*, 2016).

La ecuación 15 mediante el cual se calculó usando el software RStudio (ver código en el Anexo 11) es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad 15$$

Donde:

- NIR: es representada por la banda 8
- RED: es representada por la banda 4

Asimismo, la clasificación de los valores resultantes se encuentra en el intervalo de -1 a 1 (ver Tabla 22). Según Chuvieco, citado por Olivo (2017) es::

Tabla 22: Clasificación para zonificar la cubierta vegetal de los valores del NDVI

	Rangos de NDVI	Peso
< 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra	1
0 – 0.2	Suelo Desnudo	2
0.2 – 0.4	Vegetación Escasa + suelo	3
0.4 – 0.6	Vegetación Dispersa	4
> 0.6	Vegetación Alta	5

Fuente: Olivo Candelario (2017).

3. 4. 2. Integración de mapas

En esta etapa se cumple con el segundo y tercer objetivo específico el que fue “*determinar el factor de ponderación para cada variable y generar el mapa de potencial de agua subterránea*” y “*Zonificar áreas con alta probabilidad para la prospección de aguas subterráneas mediante técnicas de teledetección*” donde se ha construirá una matriz de Saaty para establecer los criterios de importancia y las ponderaciones relativas de cada criterio. Estos criterios incluyen la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, la vegetación y otros factores que influyen en el ciclo hidrológico.

Se aplicará la matriz de Saaty para asignar valores numéricos a las ponderaciones y calcular una clasificación jerárquica de las áreas de la cuenca.

Para la integración de los mapas temáticos se decidió usar el método de análisis jerárquico o matriz de Saaty (Saaty & Vargas, 1980), por lo que este método está fundamentado en la evaluación de diferentes criterios basados en la experiencia de campo, sin embargo, para reducir el sesgo de las ponderaciones se toma en cuenta la normalización (Kumar & Krishna, 2016; Taoufikallah, 2018). La técnica AHP es una metodología completa que incluye tanto

datos empíricos como la opinión subjetiva de los expertos para obtener un proceso de toma de decisiones sólido (Sener *et al.*, 2005).

Las prioridades de las variables (mapas temáticos) dentro de cada sección de la jerarquía se logró evaluando de forma pareada entre ellos con el fin de delimitar la zona con potencial de agua subterránea (Kumar & Krishna, 2016).

A continuación, se muestra el proceso de análisis jerárquico de 7 variables que se tomó en cuenta para la delimitación de las zonas con potenciales de agua subterránea en los distritos de Pampas grande, Huanchay y La Libertad. Esta información corresponde a la matriz de comparación (Matriz de Saaty).

En la Tabla 4 se muestra la categorización de los valores asignados a la matriz de comparación, donde los valores asignados a las variables del área de estudio son subjetivos y se basan en los criterios de algunos artículos y expertos del área en la delimitación de aguas subterráneas. De esta forma para la:

a) Precipitación

Sabiendo que la cantidad de precipitación es un factor dominante o crítico para la recarga y el flujo de agua subterránea y se considera entre igual y moderadamente preferible que la densidad de drenaje, debido a que indica la capacidad del terreno para permitir el flujo y la infiltración del agua. Así como la geología (permeabilidad y porosidad del subsuelo) y uso actual de tierras (indicar la recarga e impermeabilidad en ciertas zonas) (Macas *et al.*, 2018). Por otro lado, se considera moderadamente preferible que suelos y el índice de diferencia normalizada, por lo que estas dos variables influyen en la retención y contribución del agua al subsuelo. Sin embargo, se considera entre fuertemente y muy fuertemente preferible que la pendiente, debido a que para el área de estudio se tiene mayor cantidad de áreas con pendientes pronunciadas y pueden afectar el movimiento del agua, aumentando la velocidad de escorrentía superficial y disminuyendo la infiltración hacia el subsuelo (Montgomery & Dietrich, 1994).

b) Densidad de drenaje

Ayuda a identificar áreas con mayor potencial de drenaje superficial, lo que podría influir en la distribución mediante la infiltración del agua. Para nuestra área de estudio, consideramos que la densidad de drenaje es fuertemente preferible que la pendiente, ya que, como se

mencionó previamente, tenemos pendientes pronunciadas. Nuestro objetivo es identificar zonas con una menor probabilidad de escorrentía y una mayor capacidad de infiltración hacia el subsuelo (Macas *et al.*, 2018).

c) Pendiente

Como se mencionó previamente, el área de estudio presenta pendientes pronunciadas y estas pueden afectar el movimiento del agua y aumenta la velocidad de escorrentía. Por tal motivo respecto a las demás variables se considera débilmente menos preferible que el suelo. Así como débil y fuertemente menos preferible que geología, uso actual de tierras y NDVI (Magesh *et al.*, 2012b; Selvam *et al.*, 2015).

d) Geología (litología)

La litología desempeña un papel fundamental en la delimitación de aguas subterráneas, ya que define las características de permeabilidad y porosidad del subsuelo, influyendo en la cantidad y disponibilidad de agua subterránea. Por tal motivo, el valor en la matriz de 2 (igual y moderadamente preferible) respecto a las variables suelo, uso actual de tierras y NDVI (Macas *et al.*, 2016; Mandal *et al.*, 2018).

e) Suelos

Mediante esta variable podemos determinar la capacidad de retención y la infiltración del agua en el suelo, por lo que se considera relativamente entre moderada y fuertemente menos preferible respecto al uso actual de suelos (según los tipos de usos de suelo pueden alterar la recarga de agua subterránea al modificar la infiltración y la capacidad de retención del suelo). Por otro lado, se considera entre igual y moderadamente preferible respecto al NDVI, ya que permite identificar las zonas donde se produce una mayor infiltración de agua subterránea en el área de estudio (Mandal *et al.*, 2016).

f) Uso actual de tierras

Es importante en la delimitación de aguas subterráneas, por lo que tipos de uso actual como la agricultura intensiva, la urbanización o la actividad industrial, puede alterar la recarga de agua subterránea al modificar la infiltración y la capacidad de retención del suelo. Por lo tanto, se ha considerado que es entre moderada y fuertemente preferible que el índice de vegetación normalizada (NDVI) (Mandal *et al.*, 2016).

g) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

proporciona información sobre la cobertura vegetal en un área. Esta información es útil para identificar zonas con una mayor y vegetación, lo que puede indicar áreas propensas a una mayor recarga de agua subterránea (Macas *et al.*, 2018).

Por lo tanto, en la Tabla 23 exhibe la matriz de comparación correspondiente al área de estudio.

Tabla 23: Matriz de comparación de variables

	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendiente	Geología	Suelos	Uso Actual de Tierra	NDVI
Precipitación	1	2	6	2	3	2	3
Densidad de Drenaje	1/2	1	7	1/2	5	1/3	5
Pendiente	1/6	1/7	1	1/4	1/3	1/4	1/4
Geología	1/2	2	4	1	2	2	2
Suelos	1/3	1/5	3	1/2	1	1/4	2
Uso Actual de tierras	1/2	3	4	1/2	4	1	4
NDVI	1/3	1/5	4	1/2	1/2	1/4	1
suma:	3.33	8.54	29.00	5.25	15.83	6.08	17.25
1/suma:	0.30	0.12	0.03	0.19	0.06	0.16	0.06

— Matriz normalizada, se multiplicó la sumatoria inversa con cada elemento de su columna correspondiente (Ver Tabla 24).

Tabla 24: Matriz normalizada de las variables

	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendiente	Geología	Suelos	Uso Actual de Tierra	NDVI
Precipitación	0.30	0.23	0.21	0.38	0.19	0.33	0.17
Densidad de Drenaje	0.15	0.12	0.24	0.10	0.32	0.05	0.29
Pendiente	0.05	0.02	0.03	0.05	0.02	0.04	0.01
Geología	0.15	0.23	0.14	0.19	0.13	0.33	0.12
Suelos	0.10	0.02	0.10	0.10	0.06	0.04	0.12
Uso Actual de tierras	0.15	0.35	0.14	0.10	0.25	0.16	0.23
NDVI	0.10	0.02	0.14	0.10	0.03	0.04	0.06

- Vector de Priorización, se obtuvo calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. Los valores de este vector corresponden a los pesos ponderados para cada variable (Tabla 25).

Tabla 25: Vector de priorización de las variables

	Vector priorización	Vector priorización (%)
Precipitación	0.259	25.92%
Densidad de drenaje	0.181	18.06%
Pendiente	0.032	3.22%
Geología	0.183	18.34%
Suelos	0.077	7.75%
Uso actual de tierras	0.198	19.76%
NDVI	0.070	6.96%

- Relación de consistencia (RC), sirve para comprobar el método haya sido aplicado correctamente, donde la relación de consistencia debe ser menor al 10% ($RC < 0.1$). Para obtener la RC, se debe multiplicar la matriz de comparación con el vector de priorización. Luego se tiene el vector suma ponderada de la multiplicación de la matriz y el vector de priorización y resulta la Tabla 26.

Tabla 26: Resultado de los vectores de suma ponderada y priorización

Vector Priorización	÷	Vector Suma Ponderada	Resultado
2.02	÷	0.259	7.78
1.43	÷	0.181	7.91
0.24	÷	0.032	7.44
1.49	÷	0.183	8.14
0.58	÷	0.077	7.45
1.68	÷	0.198	8.49
0.50	÷	0.070	7.19
		Promedio	7.69
		N (variables)	7

Se calculó el índice de consistencia (IC), mediante la ecuación 16:

$$IC = \frac{\text{Promedio} - N(\text{variables})}{N(\text{variables}) - 1} \quad (16)$$

$$IC = \frac{7.69 - 7}{7 - 1} \rightarrow IC = 0.115$$

Otro punto para considerar es el índice aleatorio (IA), para conocer este índice se usa la tabla que propone (Aguarón & Moreno-Jiménez, 2003). Donde “n” es el número de elementos del vector de priorización (Anexo 14).

Finalmente, la Relación de consistencia se calcula dividiendo el índice de consistencia (IC) con el índice aleatorio (IA).

$$RC = \frac{0.115}{1.341} = 0.086$$

Como resumen de la ponderación de variables, se puede observar en la Tabla 27.

Tabla 27: Método de integración de mapas

Modelo	Zonas potenciales de aguas subterráneas
Objetivo	Identificar las zonas potenciales de aguas subterráneas para los distritos de Pampas Marca, La Libertad y Huanchay – Ancash, Perú.
Datos requeridos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Precipitación (P) 2. Densidad de Drenaje (Dd) 3. Pendiente (S) 4. Geología (G) 5. Suelos (T) 6. Uso de Actual de Tierras (US) 7. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)
Criterios de ponderación	<ol style="list-style-type: none"> a. A mayor precipitación puntuación más alta b. A menor densidad puntuación alta c. A menor pendiente mayor puntuación d. Depende del tipo de rocas que presenta la zona e. Depende del tipo de suelo que tiene la zona f. Depende el uso que tiene la zona g. A mayor NDVI mayor ponderación
Pesos	$a* [P]+b*[Dd] +c* [S] + d*[G]+e*[T]+f*[US]+ g*[NDVI]$
Procedimiento de análisis	Los valores de a, b, c, d, e, f y g; son obtenidos de la matriz de Saaty. Las puntuaciones son consideradas de acuerdo con quien aporta más hacia la infiltración para agua subterránea
Pesos Finales	$25.92*[P]+18.06*[Dd] +3.22*[S]+18.34*[G]+7.75*[T]+19.76*[US]+6.96*[NDVI]$

3. 4. 3. Generación del mapa para la prospección de aguas subterráneas

Se llevó a cabo la identificación de las áreas que podrían tener potenciales de aguas subterráneas en la zona de estudio, a través de la combinación de las siete capas temáticas y la asignación de factores de influencia con diferentes valores numéricos. El objetivo fue establecer zonas que pudieran tener un potencial para la presencia de agua subterránea.

Se clasificaron siete factores condicionantes de las aguas subterráneas basados en conocimientos de expertos y revisión de literatura. En la Tabla 28, se muestra los rangos asignados a las diferentes características de los factores individuales y sus pesos normalizados, la clasificación de los factores individuales se encuentra en la escala de 1 a 5 donde 1 es muy bajo y 5 muy alto. (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018; Machiwal *et al.*, 2011; Rahmati *et al.*, 2015; Selvam *et al.*, 2015).

Tabla 28: Pesos asignados y normalizados para la zonificación de aguas subterráneas

Variable	Rango Asignado (%)	Clasificación	Perspectiva de agua subterránea	Peso
Precipitación	26	15.21 - 100	Muy pobre	1
		100 - 200	Pobre	2
		200 - 300	Moderada	3
		300 - 400	Buena	4
		400 - 500	Muy buena	5
		500 - 613.36	Muy buena	5
Densidad de Drenaje	18	1.124 - 1.77	Muy buena	5
		1.77 - 2.54	Buena	4
		2.54 - 3.31	Moderada	3
		3.31 - 4.08	Pobre	2
		4.08 - 4.87	Muy pobre	1
Pendiente	3	0° - 3°	Muy buena	6
		3° - 5°	Muy buena	5
		5° - 10°	Buena	4
		10° - 15°	Moderada	3
		15° - 35°	Baja	2
		35° - 83.85°	Muy baja	1
Geología	18	laguna	Buena	4
		Depósito Aluvial	Muy buena	6
		Areniscas, lutitas	Muy buena	5
		Lavas y aglomerados	Buena	4
		Andecitas, dacitas y riolitas	Moderada	3
		Andesitas, rocas piroclásticas	Moderada	3
		Andesitas, tobas e ignimbritas	Moderada	3
		Calizas y limoarcillitas	Buena	4
		Chert y tufis, lutitas y lodotitas	Moderada	3

Continuación...

Variable	Rango Asignado (%)	Clasificación	Perspectiva de agua subterránea	Peso
Geología	18	Calizas y limoarcillitas	Buena	4
		Chert y tufis, lutitas y lodotitas	Moderada	3
		Bloques morreneicos	Moderada	3
		Granodiorita y tonalita	Muy baja	1
		Diorita y Tonalita	Muy baja	1
		Granodiorita	Muy baja	1
		Monzogranito	Muy baja	1
Suelos	8	I-Bh-Tv-c	Muy Buena	5
		I-HI-KI-bc	Muy Pobre	1
		I-KI-c	Pobre	2
		I-c	Buena	4
Uso Actual de Suelos	20	Zona Urbana	Muy pobre	1
		Terrenos con vegetación cultivada	Muy buena	5
		Cardonales	Moderada	3
		Depósitos aluviales	Buena	4
		Desierto costero	Moderada	3
		Lagos, lagunas y cochas	Baja	2
		Matorrales y bosques	Buena	4
Pajonal andino	Moderada	3		
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	7	-0.97 - 0	Muy pobre	1
		0 - 0.2	Pobre	2
		0.2 - 0.4	Moderada	3
		0.4 - 0.6	Buena	4
		0.6 - 0.8	Muy buena	5

Para la superposición de los mapas temáticos se usó la herramienta “*Weighted Overlay*” que superpone varios rásteres con una escala de medición y considera según orden de importancia; asimismo estos ráster son considerados entradas con valores enteros de 1 a 5. (ESRI, 2021b). Además, se usó el lenguaje de programación “*Model Builder*” para crear flujos de trabajo de geoprocésamiento (ver Figura 34).

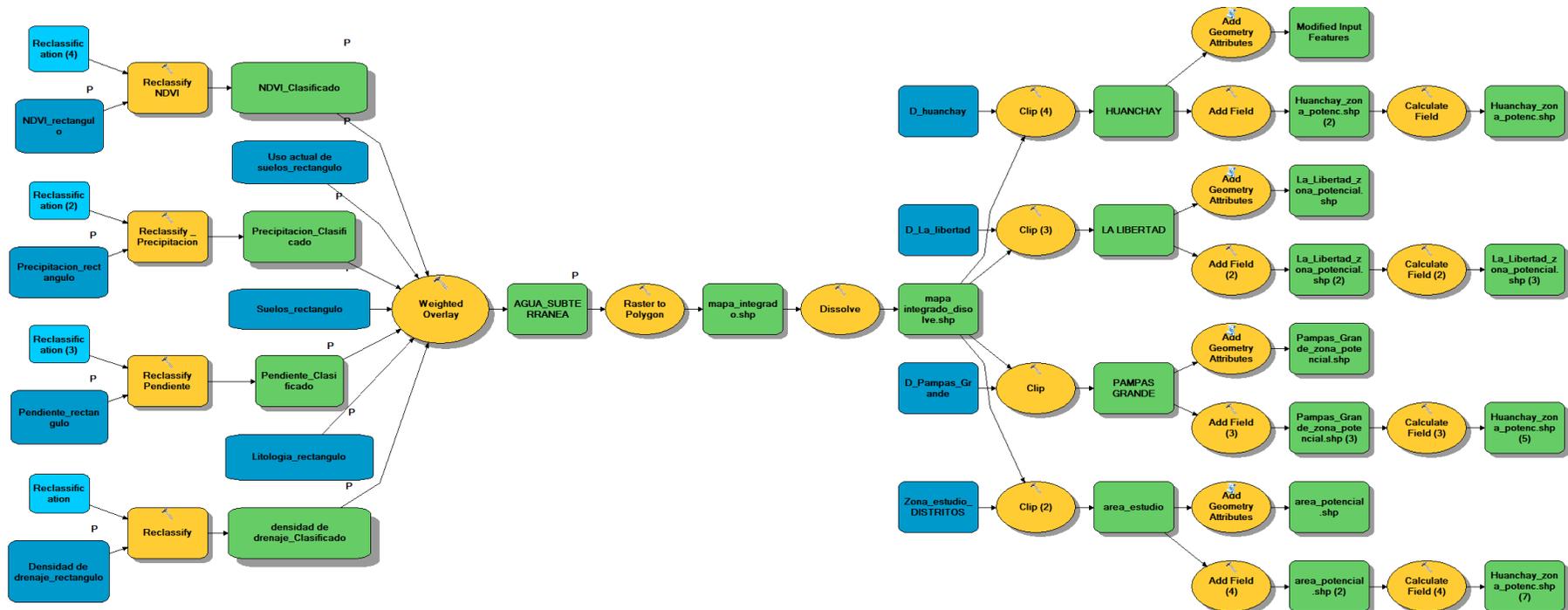


Figura 34: Integración de mapas en *Model Builder*

3. 5. Etapa de campo

Teniendo en cuenta el objetivo específico “*validar los resultados mediante el método geofísico de Self-Potential (SP) hasta 500 m de profundidad y el inventario de afloramientos de agua subterránea*” se realizó una validación de los resultados obtenidos mediante técnicas de muestreo y mediciones en campo. Se seleccionaron sitios representativos de las áreas identificadas como importantes. Luego estas mediciones se compararán con los resultados obtenidos a través de la teledetección y la matriz de Saaty para evaluar la precisión y confiabilidad de la metodología.

De lo mencionando anteriormente, la visita a campo fue realizada en setiembre del 2021 durante 4 días (02/8/2021 – 06/08/2021) en compañía de los pobladores de la zona:

- Sr. Javier Urbano
- Sr. Mercedes Sánchez
- Sr. Winder Cano Jaimes

Tabla 29: Pobladores guía que acompañaron la visita a campo

Sr. Winder Cano	Sres. Winder Cano y Javier Urbano
 A photograph of Sr. Winder Cano sitting on a rocky, grassy hillside. He is wearing a dark jacket with yellow stripes on the sleeves and blue jeans. In the background, another person is visible sitting on a rock.	 A photograph showing two people, Sr. Winder Cano and Sr. Javier Urbano, standing in a field. They are surrounded by sparse vegetation and a white line is visible on the ground, possibly marking a survey area.

Continuación...

Sres. Javier Urbano y Mercedes Sánchez	Sr. Javier Urbano, explicando la ruta
	

En la Tabla 29, se muestra las imágenes de los pobladores quienes estaban interesados en conocer los posibles lugares con alta probabilidad de encontrar agua subterránea y considerar como puntos de captación para futuros proyectos.

3.5.1. Reconocimiento de campo

El reconocimiento de campo fue realizado con ayuda de los pobladores de la zona que nos acompañaron en el proceso, los mismos que nos ayudaron a ubicar las posibles zonas que se delimitaron en un mapa previo. Por otro lado, se tomó en cuenta las fallas en las rocas, ojos de agua, afloraciones, como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30: Reconocimiento de campo en la zona de estudio

Imágenes de la zona	Descripción
	<p>En la imagen se muestra una zona para evaluar el nivel de agua que presenta. Es un punto que se encuentra en la parte alta que limita con los distritos de Pampas Grande y Huanchay. Se tomó este punto debido a la cercanía de una zona húmeda (comentada por los pobladores).</p>
	<p>Las fallas de las rocas se pueden considerar conductos de agua subterránea.</p>
	<p>Los pobladores hicieron un pequeño reservorio para sus animales (ovejas y vacas) el cual es recargado por un manantial lateral debido a las afloraciones de agua en la superficie. Lo que nos indica que dicha zona es potencial para realizar pruebas.</p>
	<p>En la imagen se observa un ojo de agua proveniente de una roca fracturada. Se puede considerar como Manantial de laderas. Este punto se encuentra en la parte alta del distrito de Pampas Grande.</p>

Continuación...

Imágenes de la zona	Descripción
	Se observa la corriente que se produce del manantial de ladera. Ubicado en la parte alta del distrito de Pampas Grande. Se puede considerar esta zona como potencial para captaciones.

3. 5. 2. Ubicación de puntos

Después de reconocer el área de estudio, ya sea según a la cercanía de afloraciones, ojos de aguas y fallas se determinó el mejor punto, luego se procedió a ubicar los electrodos con una separación de 10 m. Ver Figura 35. Previamente se instala los electrodos como se observa en la Figura 36 y después de realizar las mediciones por cada metro 10 veces se procede a ubicar el mejor punto según la gráfica que nos muestra el equipo de exploración.



Figura 35: Ubicación de los electrodos



Figura 36: Armado de electrodos con el cable y posición del punto óptimo

Los ensayos geofísicos han sido desarrollados en 8 puntos de interés para el trabajo, cuya ubicación se muestra en la Tabla 31 y Figura 37, dichos puntos se encuentran en el distrito de Pampas Grande, siendo este distrito el que sufre más en época seca. Por otro lado, la cercanía entre puntos se dio debido al difícil acceso, tiempo y costo de exploración. Además la exploración geofísica tiene la siguiente disposición de los electrodos M-N mostrada en la Figura 38, siendo 10 m la distancia entre M y N, y el punto de prospección geofísica localizado a 5 m (inicio), en el siguiente sondeo M estará a 1 metro y N a 11 m, la distancia se mantiene constante igual a 10 m, y el punto de prospección está a 6 m y así sucesivamente hasta lograr unos 10 o más puntos.

Tabla 31: Ubicación de puntos de exploración geofísica

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
SP1	194093	8932315	4185
SP2	194030	8932394	4156
SP3	193912	8933124	4114
SP4	191949	8929641	4269
SP5	192007	8929586	4268
SP6	192222	8929650	4311
SP7	193078	8930141	4362
SP8	192584	8930932	4244

Nota: Datum: WGS84 Zona 18 Sur

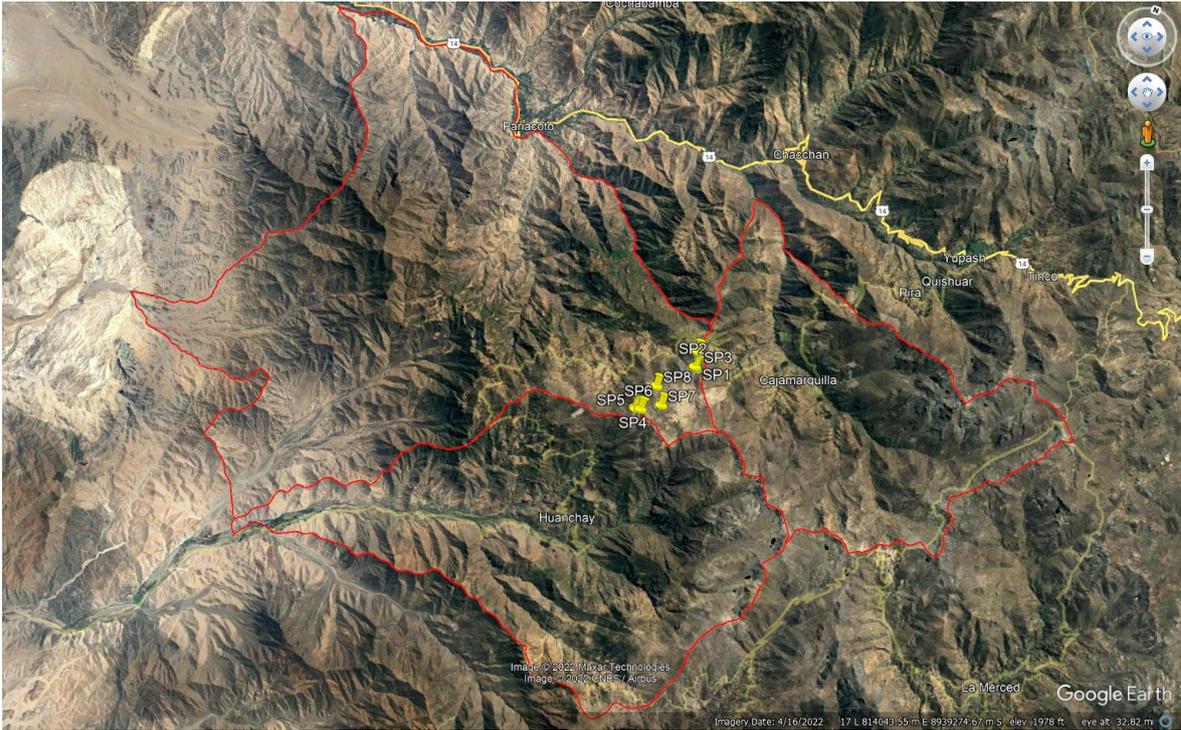


Figura 37: Ubicación de puntos de exploración geofísica

Fuente: Google Earth (s.f.)

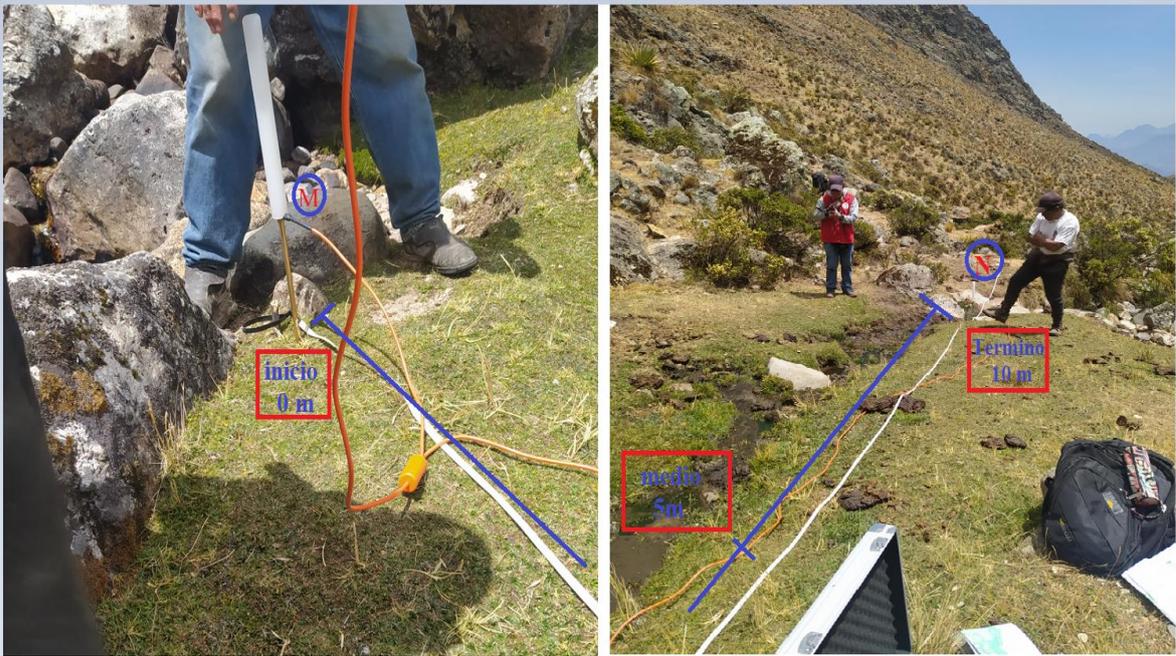


Figura 38: Esquema del proceso de sondeo geofísico y disposición de los electrodos

3. 5. 3. Característica de operación

a) Equipo empleado

El equipo de prospección geofísica que se usó es el detector de agua subterránea PQWT-S500m; que utiliza el campo eléctrico natural (resistividad de rocas subterráneas, minerales o agua subterránea). Elaborado por el Instituto de Exploración Geológica de Hunan Puqi.



Figura 39: Detector de agua subterránea

Fuente: PQWT (s.f.)

b) Accesorios

Para realizar las pruebas se usó:

- 01 GPS
- 01 wincha de 100 metros
- 02 electrodos de cobre
- 01 lector de características de agua
- 01 cable de electrodos

3. 5. 4. Trabajo de gabinete

Culminado la etapa de campo se procedió a realizar el análisis e interpretación de la información obtenida. Donde el equipo usado emite imágenes de los puntos analizados

proporcionando una visualización previa de la estructura del subsuelo mediante la variación de los potenciales propios (medidos en milivoltios, mV).

Por otro lado, se recolectó algunos puntos de afloramiento, el cual fue añadido para corroborar que dichos puntos estén dentro del mapa potencial generado. (Figura 37)

3. 5. 5. Verificación de resultados

Los datos recolectados en la etapa de campo mediante sondeo geofísico fueron procesados y evaluados utilizando software que viene incorporado en el equipo S500. Los resultados ofrecen la distribución espacial de los potenciales propios (mV) con la profundidad (m).

a) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 1

En la Figura 40, se muestra la variación espacial y en profundidad de los potenciales propios. La primera capa con bajos potenciales propios comprendido entre 0 a 75 m en promedio (0.0 a 0.04 mV de potencial propio) entre los sondajes 5 a 6 esta profundidad se extiende hasta 105 m. Seguido se tiene otra capa entre 75 a 110 m de profundidad con potencial propio que varía entre 0.04 a 0.08 mV. Entre los puntos de sondeo 5 y 6 se observa la presencia de una falla geológica que presenta potenciales propios entre 0.08 hasta 0.16 mV, hasta 230 de profundidad, esta zona muestra buenas condiciones de saturación y **reúne las condiciones favorables** para la exploración de agua subterránea. A mayor profundidad los potenciales propios se incrementan, por lo que se tratan de rocas secas y competentes.

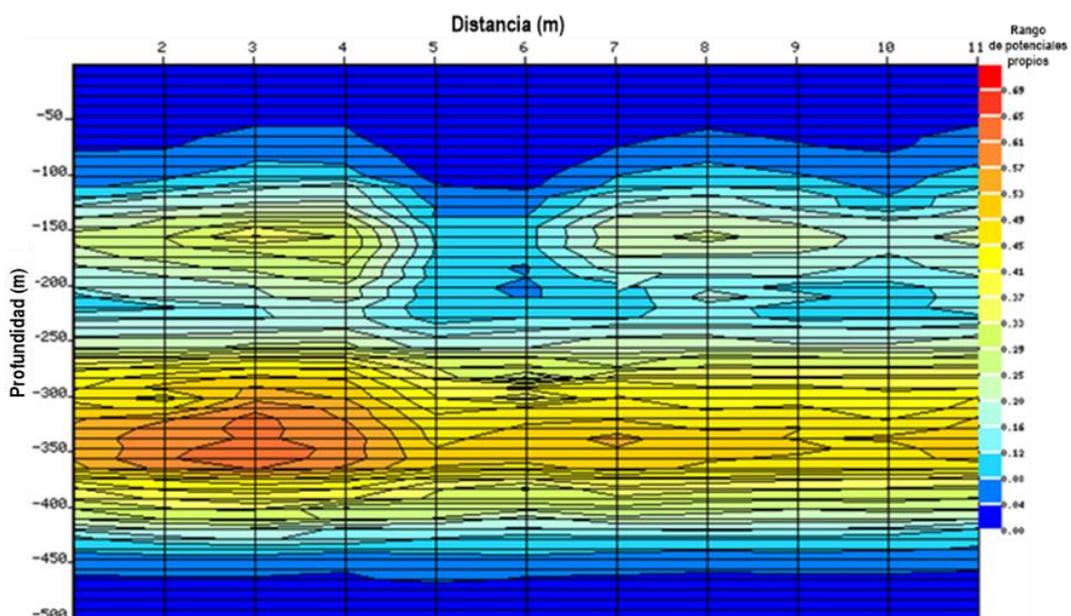


Figura 40: Sección geoelectrica – sondaje 1

b) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 2

En la sección geoelectrica de la Figura 41, la primera capa tiene un espesor que está comprendido entre 0 a 110 m de profundidad, con bajo potencial propio (comprendido entre 0 a 0.06 Mv de potencial propio), corresponde a material fluvio glacial, acumulada sobre rocas. El sondaje en el punto 5 constituye una falla geológica conductora de agua que se extiende hasta los 500 m explorados, **por lo que constituye punto favorable** para perforación exploratoria de agua subterránea.

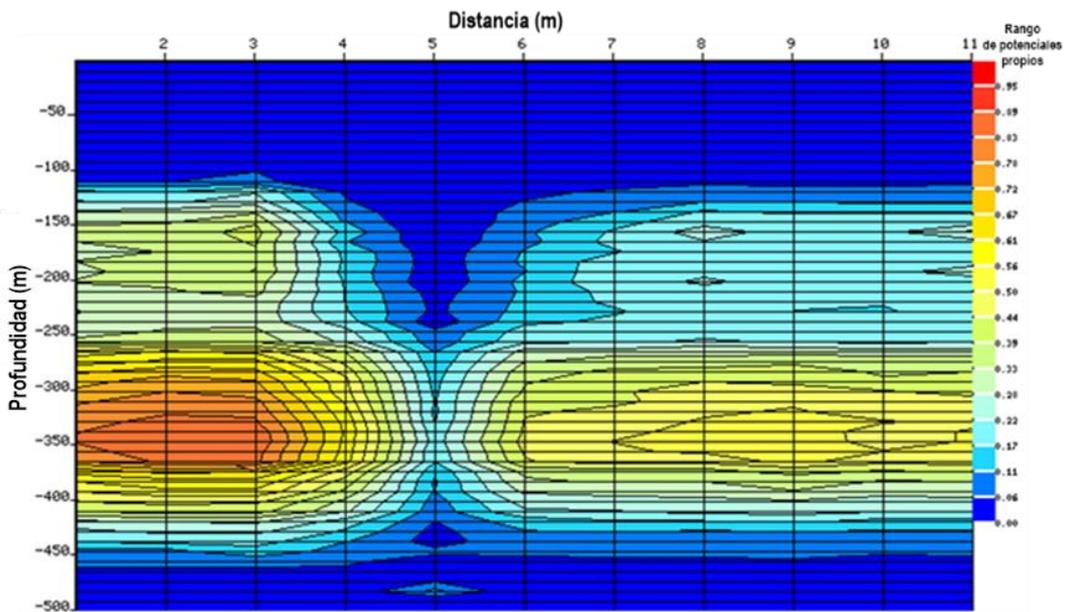


Figura 41: Sección geoelectrica – sondaje 2

c) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 3

En la sección de la Figura 42, la capa con potencial propio bajo (0.0 a 0.11 mV) se extiende hasta los 120 m de profundidad constituida por deposito fluvio glacial, sin importancia hidrogeológicamente debido la gran presencia de limo y arcilla. El punto de mayor importancia es esta zona es el punto de exploración 9, donde se localiza una falla geológica que alcanza los 450 m de profundidad, por lo que constituye un punto favorable para la exploración de agua subterránea, hacia la derecha e izquierda se observan rocas fracturadas con baja capacidad de almacenamiento de agua.

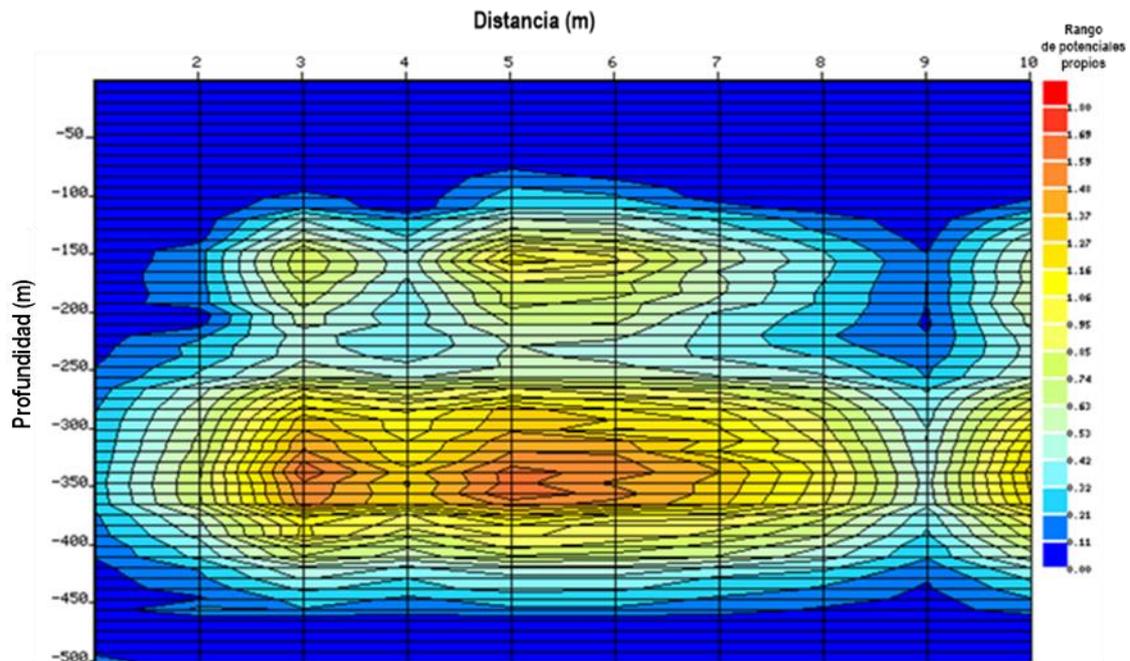


Figura 42: Sección geoelectrica – sondaje 3

d) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 4

En la sección geoelectrica de la Figura 43, la primera capa se ubica entre 0 y 190 m de profundidad con 0 a 0.03 Mv de potencial propio, constituida por material fluvio glaciar, con presencia de material limo – arcilloso, mezclado con gravas angulosas, por lo que no tiene importancia. El punto de sondaje 7 muestra la presencia de una falla rellenada de finos, por lo que **no constituyen punto favorable** para la exploración de agua subterranea, a pesar de extenderse hasta los 480 m de profundidad.

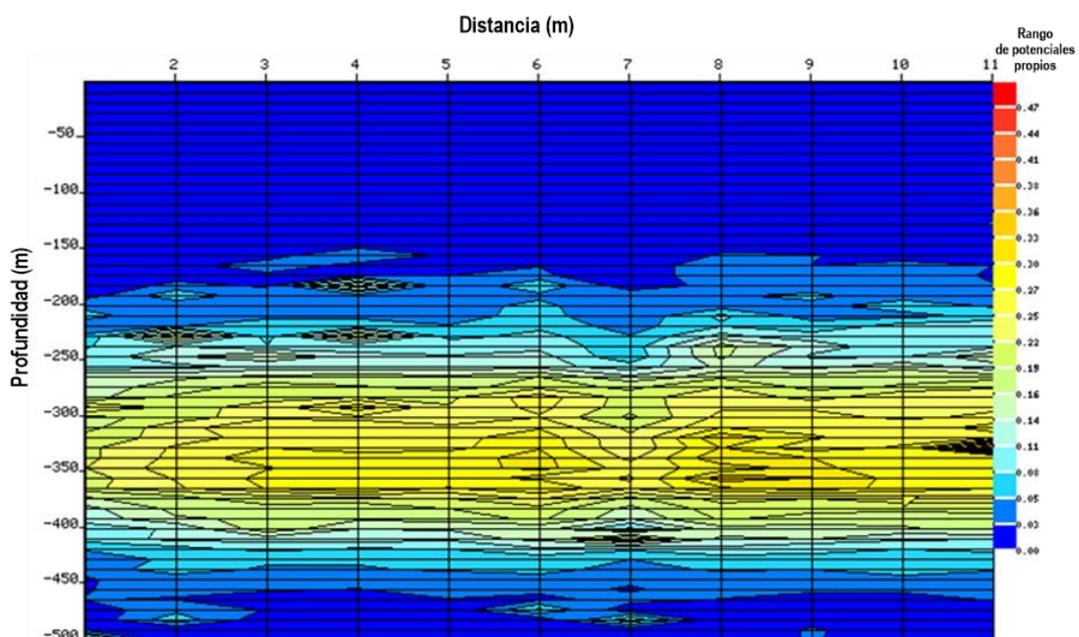


Figura 43: Sección geoelectrica – sondaje 4

e) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 5

En la sección geoelectrica de la Figura 44, muestra que se trata de un depósito fluvio glaciar de gran espesor, constituida por mezcla de grava, limo y arcilla, las condiciones de trasmisión y almacenamiento de agua son limitadas por la presencia de finos como se mencionó, en consecuencia, **no es recomendable** la zona para propósitos de exploración de agua subterránea.

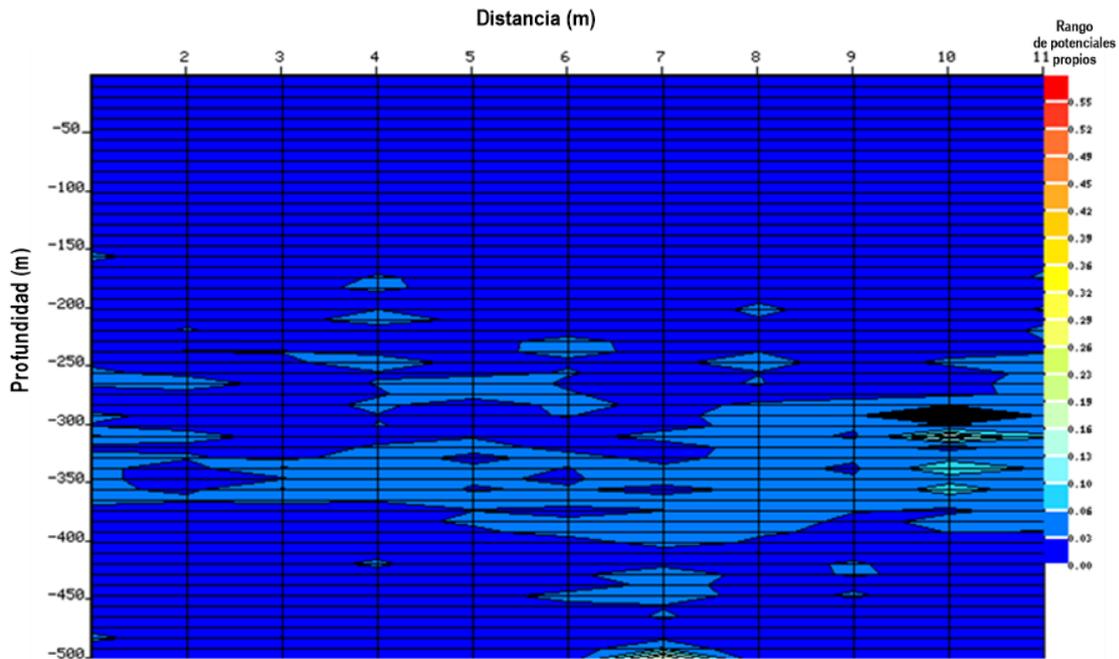


Figura 44: Sección geoelectrica – sondaje 5

f) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 6

En la sección de la Figura 45, muestra similares potenciales propios al del sondaje 5, con gran espesor de relleno fluvio glaciar, compuesta por mezcla de limo, arcilla, grava, siendo el material fino el limitante para considerar acuífero con buenas condiciones de trasmisión y almacenamiento. Entre los puntos 12 al 14, se observa la presencia de roca competente, en consecuencia, la zona **no es recomendada** para fines de exploración de agua subterránea.

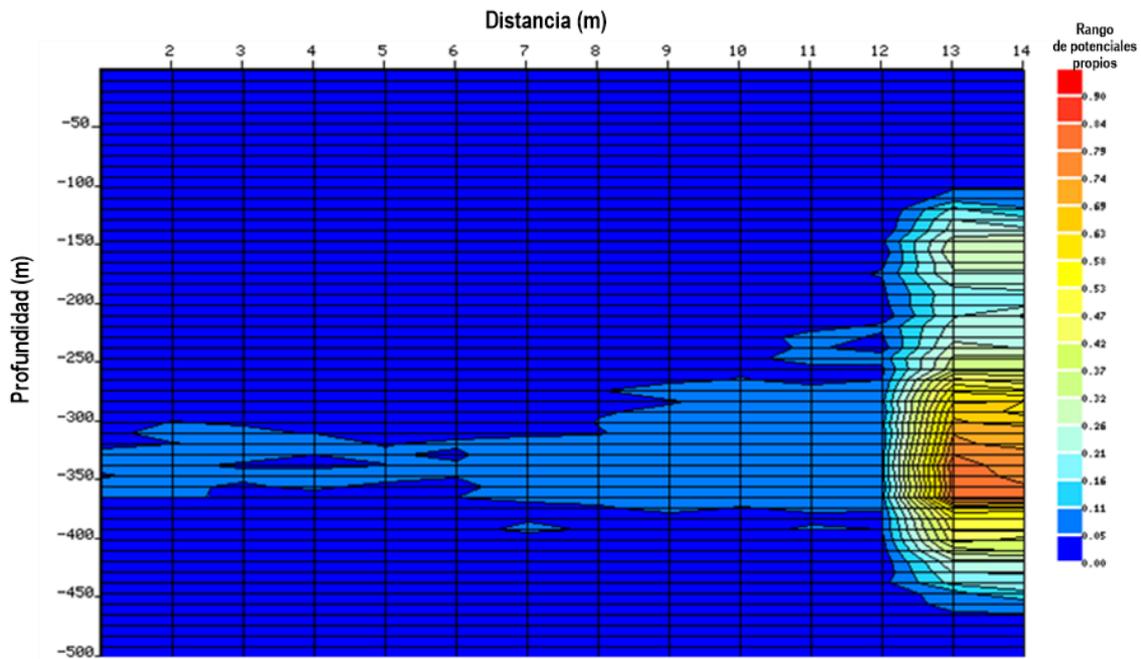


Figura 45: Sección geoelectrica – sondaje 6

g) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 7

En la sección de la Figura 46, el relleno fluvio glacial abarca hasta los 140 m de profundidad, por debajo se muestra roca fracturada desde los 230 a 450 m de profundidad, entre los puntos de exploración 9 a 11 se observa la presencia de roca competente, en consecuencia, esta zona **no es recomendada** para la exploración de agua subterránea.

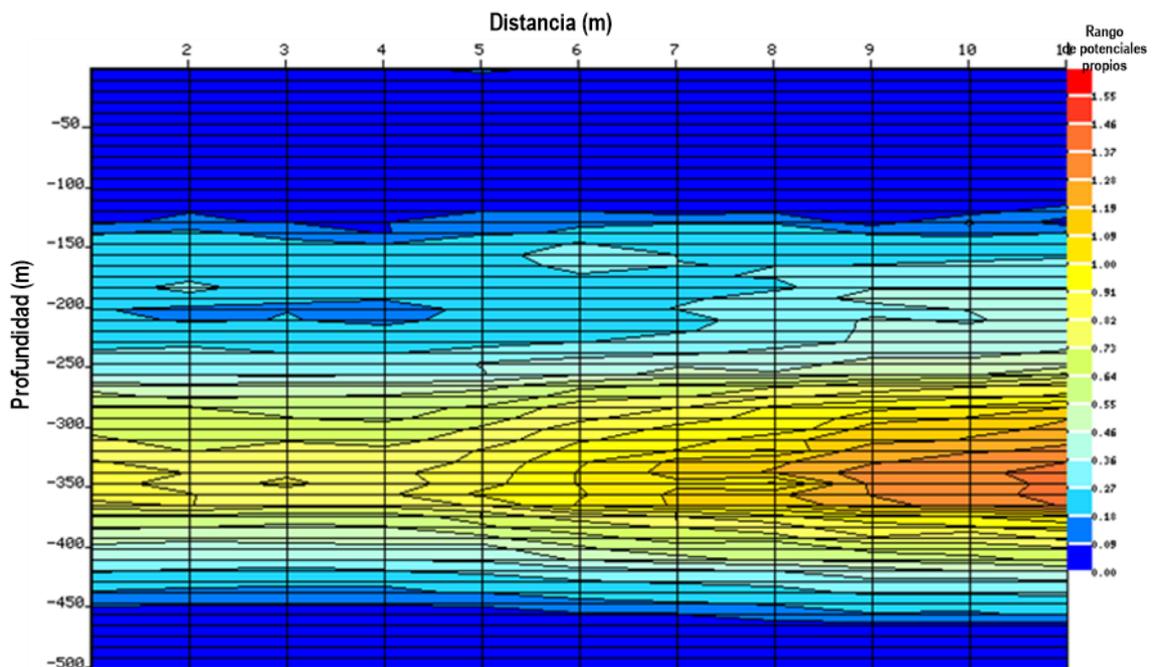


Figura 46: Sección geoelectrica – sondaje 7

h) Interpretación de la sección geoelectrica – sondaje 8

En la sección de la Figura 47, el relleno fluvio glacial abarca hasta los 120 m de profundidad, a mayor profundidad se observa la presencia de roca fracturada desde los 120 hasta 250 m de profundidad, a mayor profundidad se observa la presencia de roca competente, en consecuencia, **la zona no es recomendada** para explorar agua subterránea.

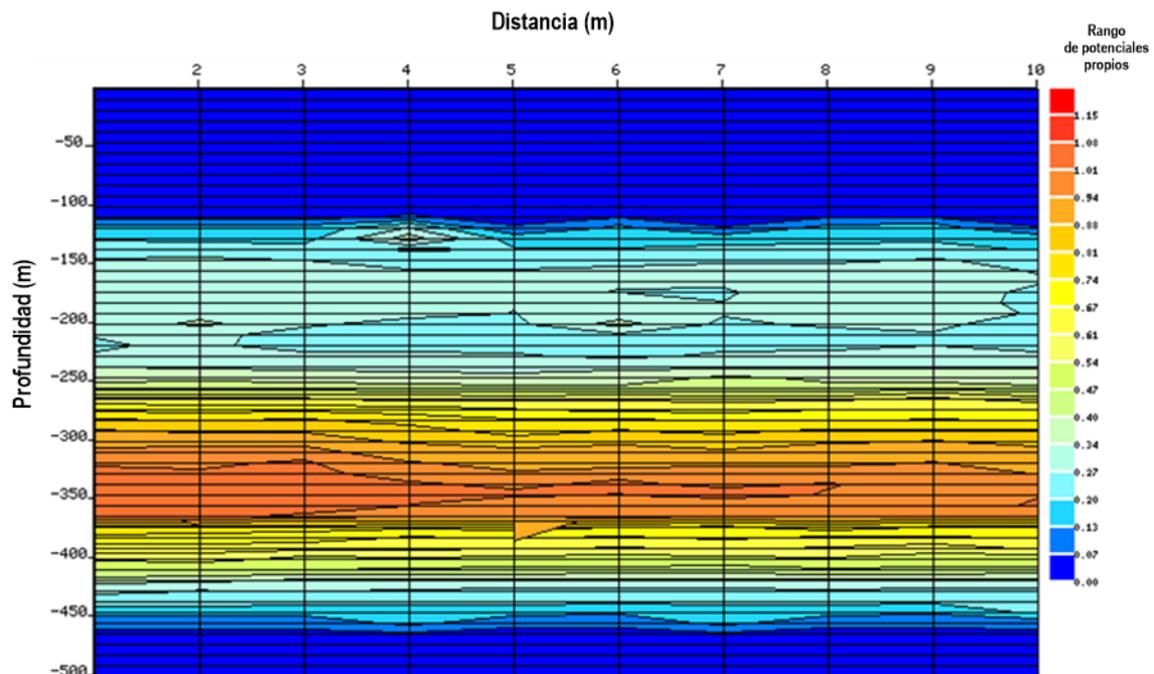


Figura 47: Sección geoelectrica – sondaje 8

Por otro lado, en la etapa de campo se logró identificar algunos afloramientos los mismos que se muestran en la Figura 48, cabe mencionar que dichos puntos solo se encuentran en los distritos de Pampas Grande y límite con Huanchay, esto debido al tiempo que se toma para medir cada punto. Finalmente, los sondajes y los afloramientos hallados nos permitirán corroborar en cierto grado los posibles puntos de captación

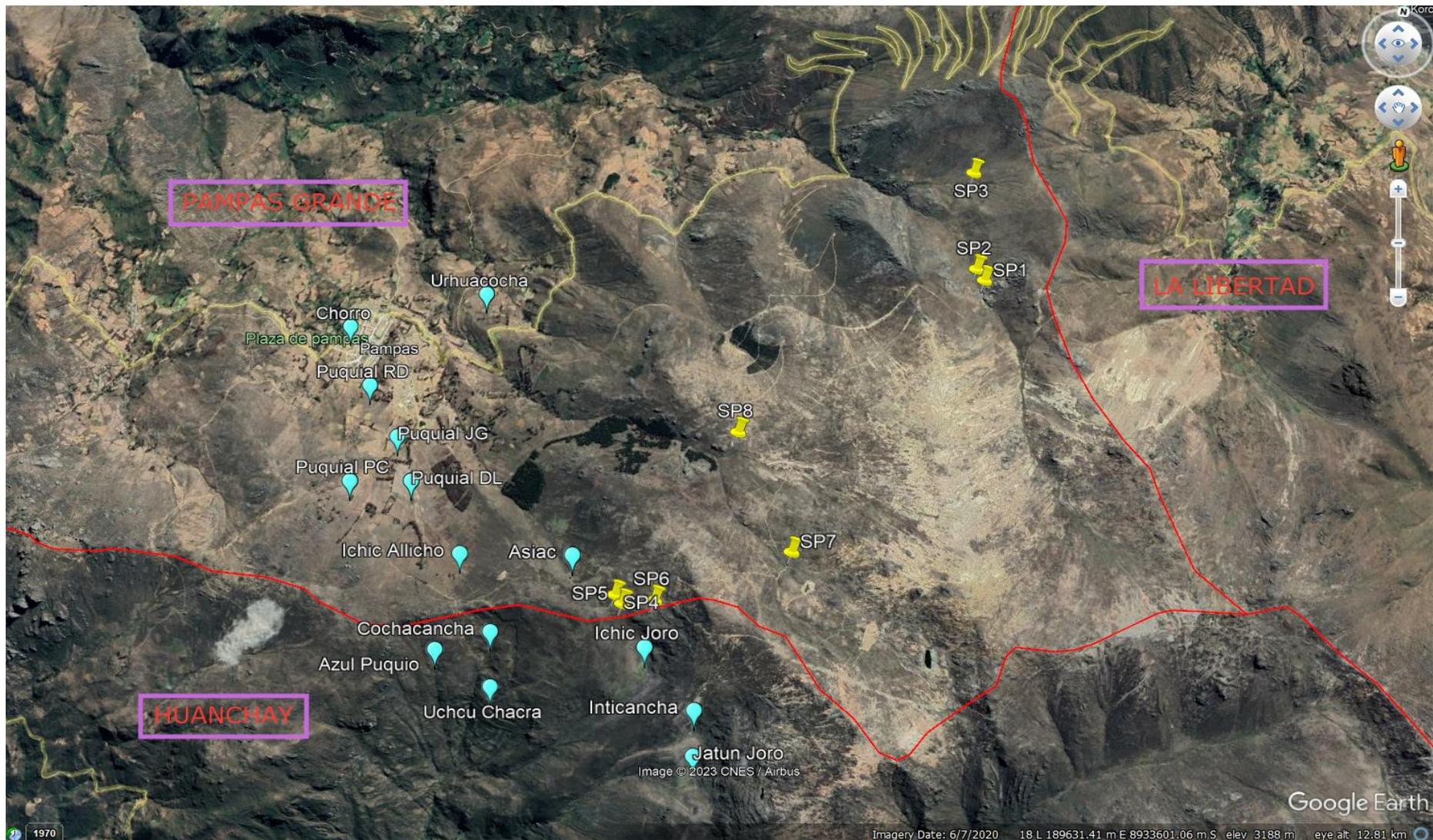


Figura 48: Puntos de afloramiento de agua subterránea y ubicación de puntos de exploración geofísica

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 1. Transformación temática generada

4. 1. 1. Precipitación

La información de precipitación promedio corresponde a promedios anuales para 32 años (1980 -2021). Se tiene en cuenta lo mencionado por Musa *et al.* (2017), quienes afirman que la precipitación es una variable importante como fuente de recarga en acuíferos a través de la infiltración, así como la recarga de fuentes secundarias como ríos, lagos y lagunas por lo que se considera un factor clave para la sostenibilidad de los acuíferos.

Acorde con Rahmati *et al.* (2015) y Machiwal *et al.* (2011), la precipitación se clasificó en seis partes con una escala de valor de 1 a 5, tal como se muestra en la Tabla 32. Se observa que la precipitación varía desde 15.21 hasta 613.36 mm con intervalo de 100 mm, además se observa que en la zona de estudio predominan los rangos de 15.21 a 100 mm y 100 a 200 mm con un 46.16 % del total del área, clasificación realizada de acuerdo con Machiwal *et al.* (2011).

Tabla 32: Clasificación de la precipitación

Item	Precipitación (mm)	Área (km ²)	Área (%)	Clasificación
1	15.21 - 100	182.84	25.75	Baja a Muy baja
2	100 - 200	144.92	20.41	Moderada
3	200 - 300	116.15	16.36	Moderada
4	300 - 400	95.54	13.46	Buena
5	400 - 500	74.56	10.50	Muy buena
6	500 – 613.36	96.04	13.53	Muy Buena
TOTAL		710.05	100.00	

Continuación...

Item	Precipitación (mm)	Área (km²)	Área (%)	Clasificación
Distrito Pampas Grande				
1	15.21 - 100	171.14	48.59	Baja a Muy baja
2	100 - 200	108.22	30.73	Moderada
3	200 - 300	45.51	12.92	Moderada
4	300 - 400	26.49	7.52	Buena
5	400 -450	0.83	0.24	Muy Buena
Distrito La Libertad				
1	350 - 400	0.16	0.04	Buena
2	400 - 500	52.68	14.96	Muy buena
3	500 - 600	77.03	21.87	Muy buena
4	600 - >	18.69	5.31	Muy buena
Distrito Huanchay				
1	15 - 100	12.73	6.09	Baja a Muy baja
2	100 - 200	36.48	17.44	Moderada
3	200 - 300	70.46	33.69	Moderada
4	300 - 400	68.54	32.77	Buena
5	400 - 500	20.94	10.01	Muy buena

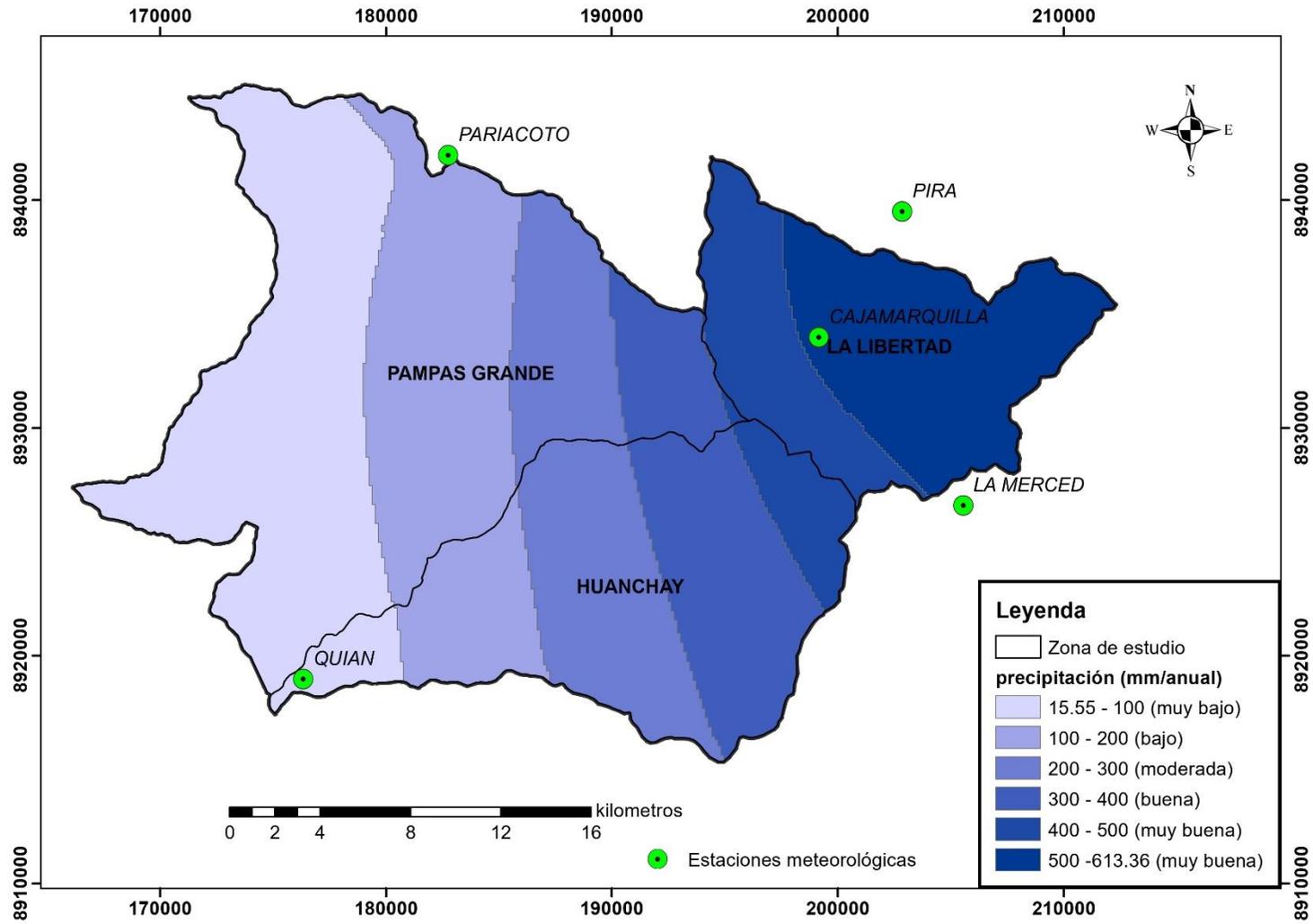


Figura 49: Mapa de precipitación clasificada

4. 1. 2. Densidad de drenaje

El sistema de drenaje indica la velocidad con la que el agua deja la cuenca (Mejía, 2012), por lo que las altas densidades de drenaje denotan que una gran proporción de precipitaciones escurre. Por otro lado, las bajas densidades de drenaje favorecen la infiltración de la precipitación por consiguiente estas bajas densidades son más favorables para delimitar el agua subterránea en la zona de estudio y son asignados con ponderación alta.

Como resultado se tiene que un 47% de área ocupada con alta densidad de drenaje (1.77 – 2.54 km/km²) y se observa en la Figura 50 en las partes altas. Seguido por una densidad media con 36.96% del total del área que usualmente se da en los cauces de ríos. Sin embargo, se tiene menor área ocupada por las bajas densidades, los resultados se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33: Clasificación de densidad de drenaje

Ítem	Densidad drenaje	Área (km ²)	Área (%)	Clasificación
1	1.124 – 1.77	65.84	9.27	Alto
2	1.77 – 2.54	333.75	47	Alto a bueno
3	2.54 – 3.31	262.41	36.96	Bueno a moderado
4	3.31 – 4.08	42.25	5.95	Moderado a bajo
5	4.08 – 4.87	5.80	0.82	Bajo
TOTAL		710.05	100.00	
Distrito Pampas Grande				
1	1.124 - 1.77	29.39	8.35	Alto
2	1.77 - 2.54	167.90	47.67	Alto a bueno
3	2.54 - 3.31	128.40	36.46	Bueno a moderado
4	3.31 - 4.08	22.49	6.39	Moderado a bajo
5	4.08 - 4.866	4.01	1.14	Bajo
Distrito La Libertad				
1	1.124 - 1.77	16.45	11.08	Alto
2	1.77 - 2.54	65.23	43.91	Alto a bueno
3	2.54 - 3.31	59.23	39.87	Bueno a moderado
4	3.31 - 4.08	7.48	5.03	Moderado a bajo
5	4.08 - 4.866	0.16	0.11	Bajo
Distrito Huanchay				
1	1.124 - 1.77	19.97	9.55	Alto
2	1.77 - 2.54	100.55	48.07	Alto a bueno
3	2.54 - 3.31	74.74	35.73	Bueno a moderado
4	3.31 - 4.08	12.28	5.87	Moderado a bajo
5	4.08 - 4.866	1.62	0.77	Bajo

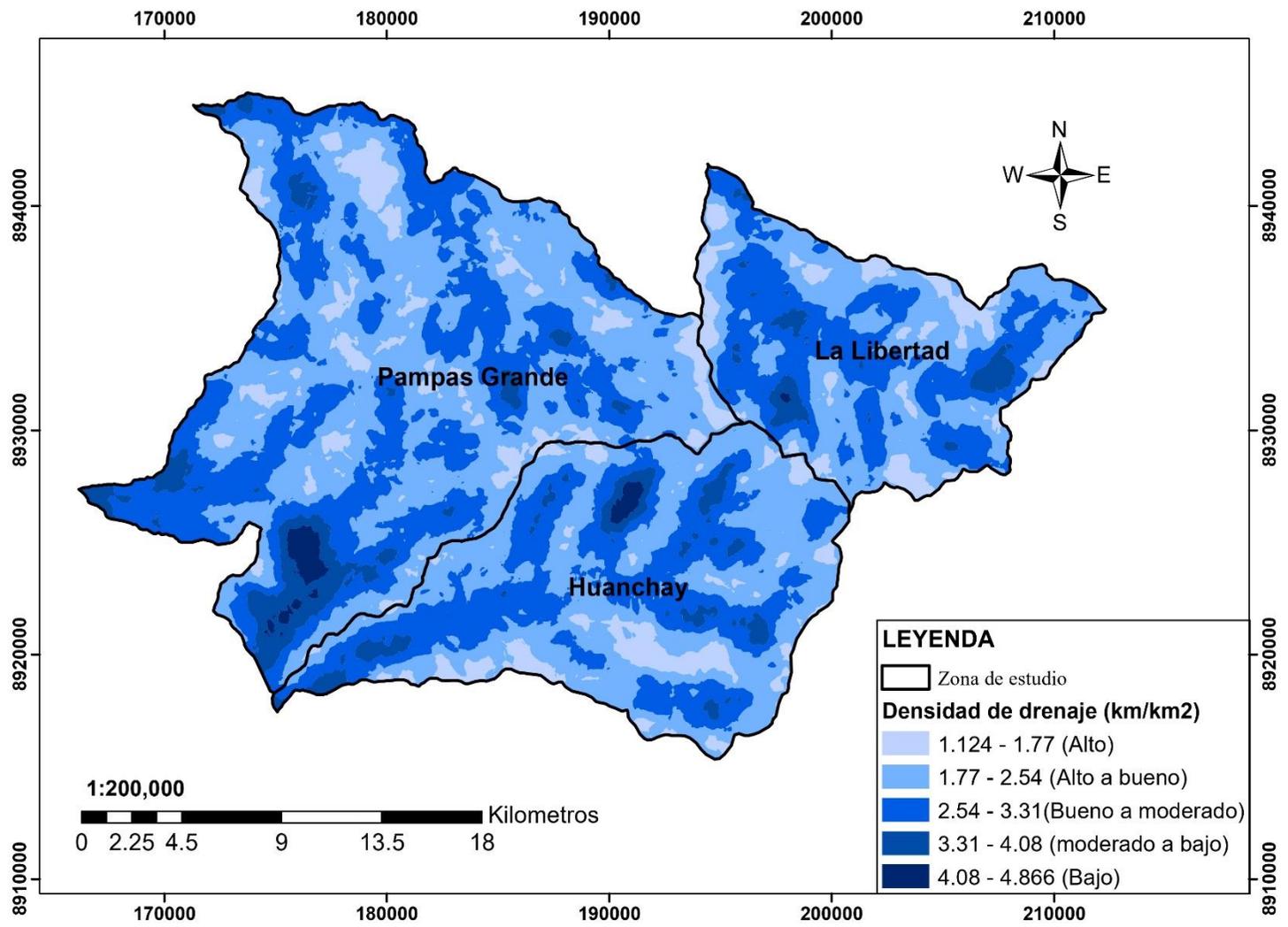


Figura 50: Mapa de densidad de drenaje clasificada

4. 1. 3. Pendiente

Según diversos estudios las pendientes repercuten en la intensidad de recarga de acuíferos, porque si se tienen altas pendientes ocurre menos infiltración respecto a las bajas (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018). Por lo tanto, la pendiente y la recarga pueden influir en la capacidad de un acuífero para almacenar aguas subterráneas, pero no son indicadores directos de la presencia del acuífero en sí mismo. De lo expuesto y calculado se tiene un 60.86% que va desde 15° a 35°, seguido de un 21.14% se encuentra en un rango de 35° a 48.85° y son consideradas con alta probabilidad de escurrimiento, lo cual se cataloga como infiltración baja. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados de la Tabla 34 se tiene un 18% del total del área de estudio con pendientes bajas que van de 0 a 15% el cual se considera un área con alta probabilidad de encontrar aguas subterráneas. En la Tabla 34 se muestra los resultados para la zona de estudio y se representa en la Figura 51.

Tabla 34: Clasificación de la variable pendiente

Ítem	Pendiente (°)	Área (km ²)	Área (%)	Clasificación
1	0 – 3	6.27	0.88	Muy Buena
2	3 – 5	10.32	1.45	Muy Buena
3	5 – 10	46.82	6.59	Buena
4	10 – 15	64.43	9.07	Moderada
5	15 – 35	432.13	60.86	Moderada a pobre
6	35 - 83.85	150.09	21.14	Muy pobre
TOTAL		710.05	100.00	
Distrito Pampas Grande				
1	0 – 3	3.49	0.99	Muy Buena
2	3 – 5	5.93	1.68	Muy Buena
3	5 – 10	23.77	6.75	Buena
4	10 – 15	30.19	8.57	Moderada
5	15 – 35	215.44	61.17	Moderada a pobre
6	35 - 83.85	73.38	20.83	Muy pobre
Distrito La Libertad				
1	0 – 3	1.41	0.95	Muy Buena
2	3 – 5	2.22	1.49	Muy Buena
3	5 – 10	12.48	8.40	Buena
4	10 – 15	18.84	12.68	Moderada
5	15 – 35	91.36	61.50	Moderada a pobre
6	35 - 83.85	22.24	14.97	Muy pobre
Distrito Huanchay				
1	0 – 3	1.37	0.65	Muy Buena
2	3 – 5	2.16	1.03	Muy Buena
3	5 – 10	10.52	5.03	Buena
4	10 – 15	15.37	7.35	Moderada
5	15 – 35	125.28	59.90	Moderada a pobre
6	35 - 83.85	54.45	26.04	Muy pobre

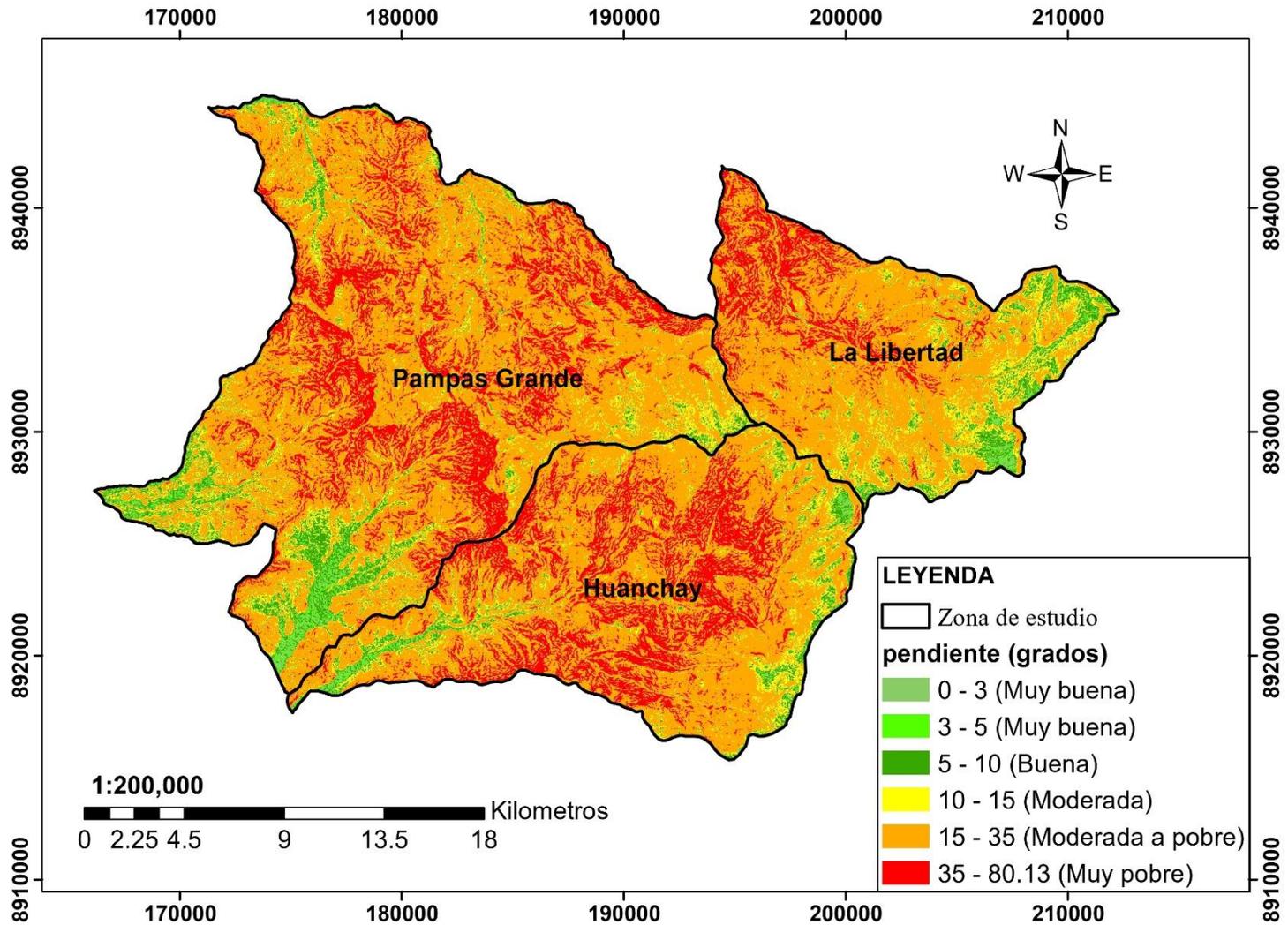


Figura 51: Mapa de pendiente clasificada

4. 1. 4. Combinación de bandas de imágenes multiespectrales

De la geología se consideró la litología para la delimitación de las zonas con potencial de aguas subterráneas siendo uno de los factores que interviene respecto al tipo de roca que presenta nuestra zona de estudio, esta variable nos indica el nivel de permeabilidad y conductividad hidráulica que poseen las rocas del área de estudio. De lo obtenido de la plataforma GEOCATMIN y calculado en con el software ArcGIS se observa que hay un porcentaje alto de rocas andesitas, tobas e ignimbritas con 49.37% considerada de permeabilidad baja, así como a las rocas granodioritas y tonalitas con 15.41% con permeabilidad baja. Sin embargo, la presencia de fallas influye en la filtración y afloramientos en la superficie como ojos de agua en las laderas (caso Pampas Grande). Los resultados finales obtenidos se observan en la Tabla 35 y Figura 52.

Tabla 35: Clasificación y ponderación de la litología

Geología	conductividad (k)	Área (km²)	Área (%)	Clasificació n
Laguna	media	0.41	0.06	4
Depósito Aluvial	alta	43.37	6.11	5
Areniscas, lutitas	media	0.65	0.09	5
Lavas y aglomerados	baja a media	1.13	0.16	1
Andesitas, dacitas y riolitas	bajas	9.51	1.34	2
Andesitas, rocas piroclásticas	bajas	39.16	5.52	3
Andesitas, tobas e ignimbritas	bajas	350.55	49.37	3
Calizas y limo arcillitas		74.3	10.46	4
Chert y tufis, lutitas y lodotitas		28.18	3.97	3
Bloques morreneicos		13.16	1.85	3
Granodiorita y tonalita	nula/impermeable	109.45	15.41	1
Diorita y Tonalita	nula/impermeable	26.7	3.76	1
Granodiorita	nula/impermeable	0.58	0.08	1
Monzogranito	nula/impermeable	12.9	1.82	1
TOTAL		710.05	100.00	
Distrito La Libertad				
Bloques morrénicos		13.16	8.86	3
Andecitas, dacitas y riolitas		9.29	6.25	3
Andesitas, rocas piroclásticas	bajas	1.96	1.32	3
Andesitas, tobas e ignimbritas	bajas	106.70	71.83	3
Calizas y limoarcillitas		16.00	10.77	4
Granodiorita y tonalita	nula/impermeable	1.22	0.82	1
Laguna	media	0.22	0.15	4
Distrito Pampas Grande				
Andesitas, rocas piroclásticas	bajas	8.32	2.36	3
Andesitas, tobas e ignimbritas	bajas	123.16	34.97	3

Continuación...

Geología	conductividad (k)	Área (km²)	Área (%)	Clasificació n
Distrito Pampas Grande				
Areniscas, lutitas	media	0.65	0.18	5
Calizas y limoarcillitas		58.27	16.55	4
Chert y tufis, lutitas y lodotitas		3.67	1.04	3
Depósito aluvial	alta	30.32	8.61	5
Diorita y Tonalita	nula/impermeable	10.15	2.88	1
Granodiorita	nula/impermeable	0.58	0.16	1
Granodiorita y tonalita	nula/impermeable	104.16	29.58	1
Laguna	media	0.01	0.00	4
Monzogranito	nula/impermeable	12.90	3.66	1
Distrito Huanchay				
Andecitas, dacitas y riolitas	Bajas	0.21	0.10	3
Andesitas, rocas piroclásticas	Bajas	28.86	13.80	3
Andesitas, tobas e ignimbritas	Bajas	120.65	57.68	3
Chert y tufis, lutitas y lodotitas		24.51	11.72	3
Depósito aluvial	Alta	13.04	6.23	5
Diorita y Tonalita	nula/impermeable	16.54	7.91	1
Granodiorita y tonalita	nula/impermeable	4.06	1.94	1
Laguna	media	0.17	0.08	4
Lavas y aglomerados	Baja a media	1.13	0.54	
Nota: En clasificación (1) muy baja, (2) baja, (3) moderada, (4) buena y (5) muy buena.				

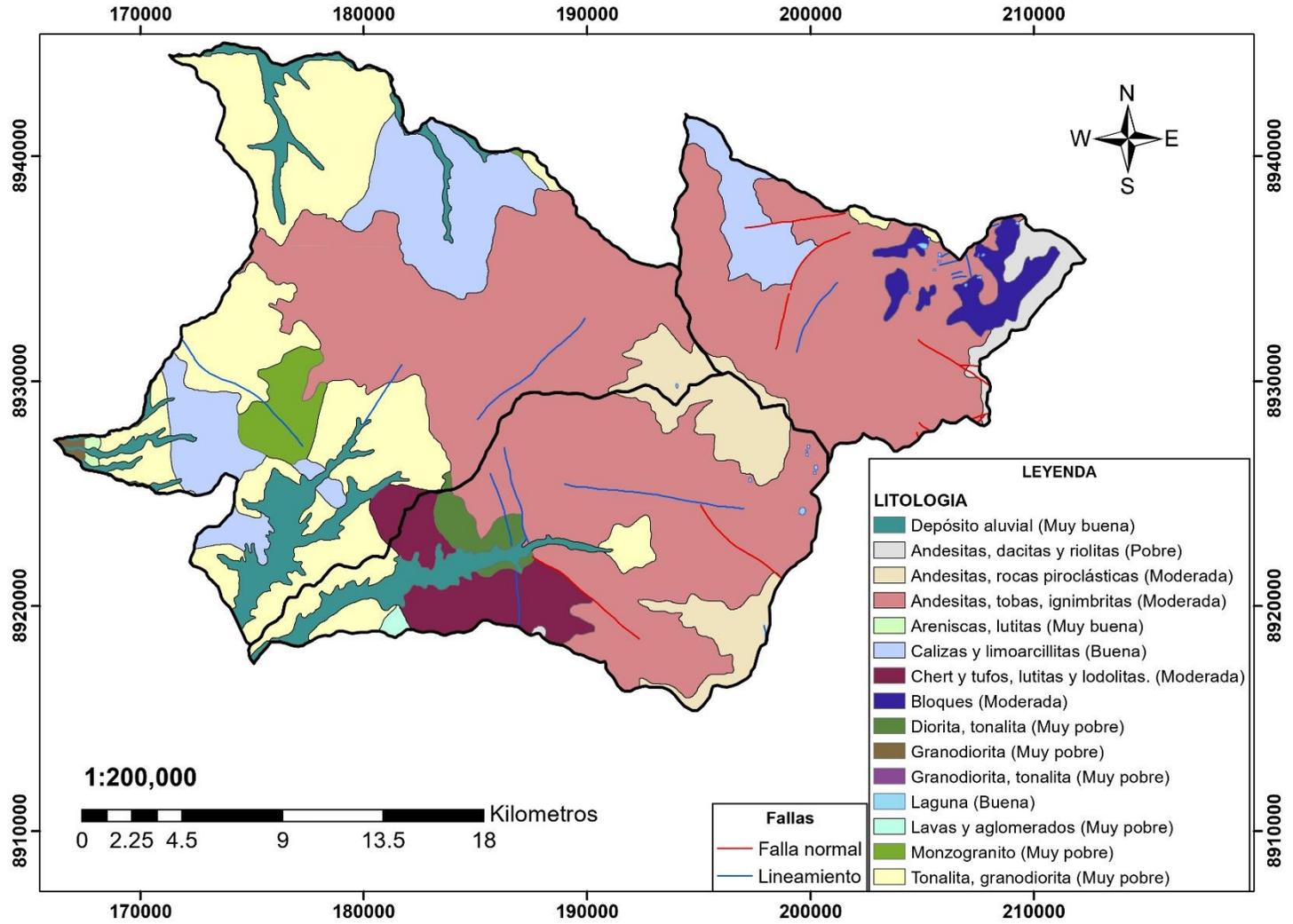


Figura 52: Mapa de litología y fallas clasificada

4. 1. 5. Uso actual de suelos

El uso actual de suelos es importante en la evaluación de agua subterráneas porque controla el movimiento o la infiltración del agua. Además, se puede identificar Según Kumar & Krishna (2016), la Hydrogeomorfología como un factor importante al igual que la litología, debido a que se enfoca en como la forma y estructura de la tierra influye en el flujo y almacenamiento de agua subterránea en acuíferos (Kumar & Krishna, 2016). Sin embargo la geomorfología, que es importante en los acuíferos pero en acuíferos fracturados, donde el agua subterránea fluye a través de fracturas y grietas en la roca, la geomorfología puede ser menos útil en la delimitación considerando que la zona de estudio tiene acuíferos fracturados. Asimismo, se consideró puntuación más alta a la vegetación, depósitos aluviales, bosques y matorrales debido a que retardan la escorrentía superficial y aumenta el tiempo de detención de agua por lo que mejora la infiltración; mientras que, a las zonas urbanas, ríos y lagunas retrasan la infiltración de las precipitaciones, por tanto, impiden que el agua recargada llegue a los depósitos de agua subterránea y se les considera con menor puntuación.

Se tiene un 48.56% del total del área con bosques y matorrales considerada con puntuación alta y 22.11% de pajonal andino ambas en las partes altas de la zona de estudio y como tercer porcentaje se tiene a los cardonales que representa a los terrenos con pradera natural con 15.17% de área. Los resultados se observan en la Figura 53 y Tabla 36.

Tabla 36: Resumen de parámetros geomorfológicos

Ítem	Uso actual de suelos	Descripción de las categorías	Área (km ²)	Área (%)	Peso
1	Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	6.11	0.86	1
2	Terrenos con vegetación cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	63.56	8.95	5
3	Cardonales	Terrenos con praderas naturales	107.8	15.17	3
4	Depósitos aluviales	Terrenos con drenados	24.1	3.39	4
5	Desierto costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	3.05	0.43	3
6	Lagos, lagunas y cochas	Zona de agua	3.75	0.53	2
7	Matorrales y bosques	Terrenos con bosques, bosques húmedos y matorrales	345.01	48.56	4
8	Pajonal andino	Terrenos con praderas naturales	157.12	22.11	3
TOTAL			710.05	100.00	
Distrito Pampas Grande					
1	Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	1.84	0.88	1
2	Terrenos con Vegetación Cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	21.83	10.43	5
3	Desierto Costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	0.65	0.31	3
4	Cardonales	Terrenos con praderas naturales	20.92	10.00	4
5	Matorrales y Bosques	Terrenos con bosques, bosques húmedos y matorrales	110.70	52.89	3
6	Lagos Lagunas y Cochas	Zona de agua	1.28	0.61	2
7	Pajonal Andino	Terrenos con praderas naturales	47.28	22.59	4
8	Depósitos Aluviales	Terrenos con drenados	4.79	2.29	3
Distrito La Libertad					
1	Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	3.27	0.93	1
2	Terrenos con Vegetación Cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	28.14	7.99	5
3	Desierto Costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	2.21	0.63	3
4	Cardonales	Terrenos con praderas naturales	83.08	23.58	4
5	Matorrales y Bosques	Terrenos con bosques, bosques húmedos y matorrales	156.97	44.55	3
6	Lagos Lagunas y Cochas	Zona de agua	1.89	0.54	2

Continuación...

Ítem	Uso actual de suelos	Descripción de las categorías	Área (km ²)	Área (%)	Peso
Distrito La Libertad					
7	Pajonal Andino	Terrenos con praderas naturales	60.02	17.04	4
8	Depósitos Aluviales	Terrenos con drenados	16.74	4.75	3
Distrito Huanchay					
1	Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	1.01	0.68	1
2	Terrenos con Vegetación Cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	13.58	9.13	5
3	Desierto Costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	0.16	0.11	3
4	Cardonales	Terrenos con praderas naturales	3.76	2.53	4
5	Matorrales y Bosques	Terrenos con bosques, bosques húmedos y matorrales	77.29	51.98	3
6	Lagos Lagunas y Cochas	Zona de agua	0.54	0.36	2
7	Pajonal Andino	Terrenos con praderas naturales	49.80	33.49	4
8	Depósitos Aluviales	Terrenos con drenados	2.56	1.72	3

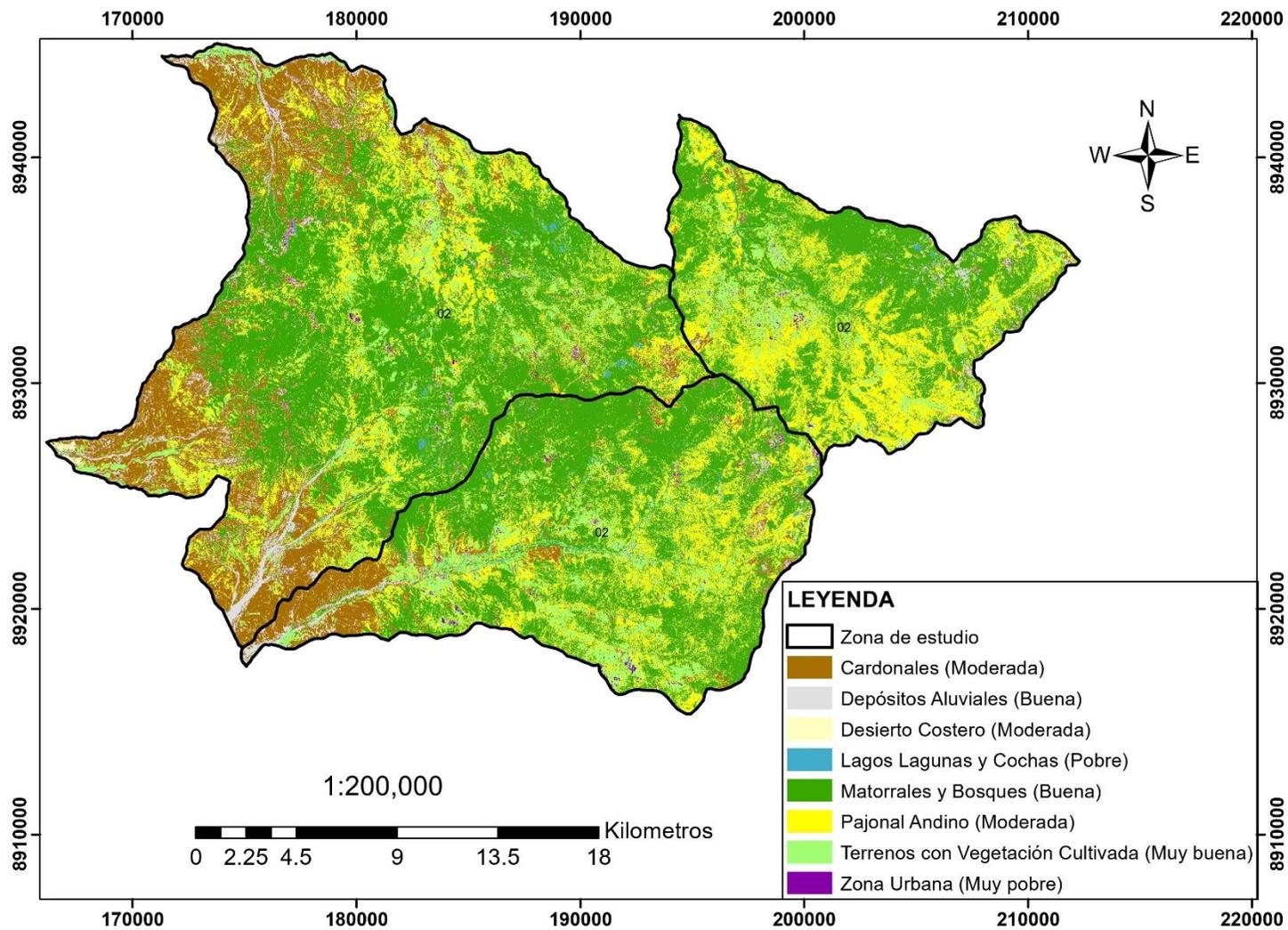


Figura 53: Mapa de uso actual de suelos clasificado

4. 1. 6. Suelos

El tipo de suelos es un factor importante como respuesta del suelo a las precipitaciones en términos de absorción y escorrentía, por lo que suelos con buena capacidad de absorción facilitan la infiltración del agua. El tipo de suelos que presenta el área de estudio con mayor porcentaje es I-c con 52.38% lo cual de acuerdo con sus características que muestra en el gráfico de barras se considera un suelo favorable para la infiltración y recarga al acuífero para almacenar aguas subterráneas debido a que presenta uno de los altos porcentajes de arena en la superficie y porcentajes menores de limo y arcillas (Figura 54). Así mismo, se tiene el suelo I-HI-KI-bc con 16.01% considerado como desfavorable para la capacidad de almacenamiento de agua subterránea, debido a que presenta niveles altos de limos arcilla tanto en la superficie y subsuelo frente a los otros tipos de suelo. En la Tabla 37 y en la Figura 55, se muestra el resultado final.

Se ubica en el lado norte y occidental de la quebrada San Francisco, colindante con la subunidad izquierda y alcanza una superficie de 55.5 km² con una pendiente accidentada y una forma muy alargada.

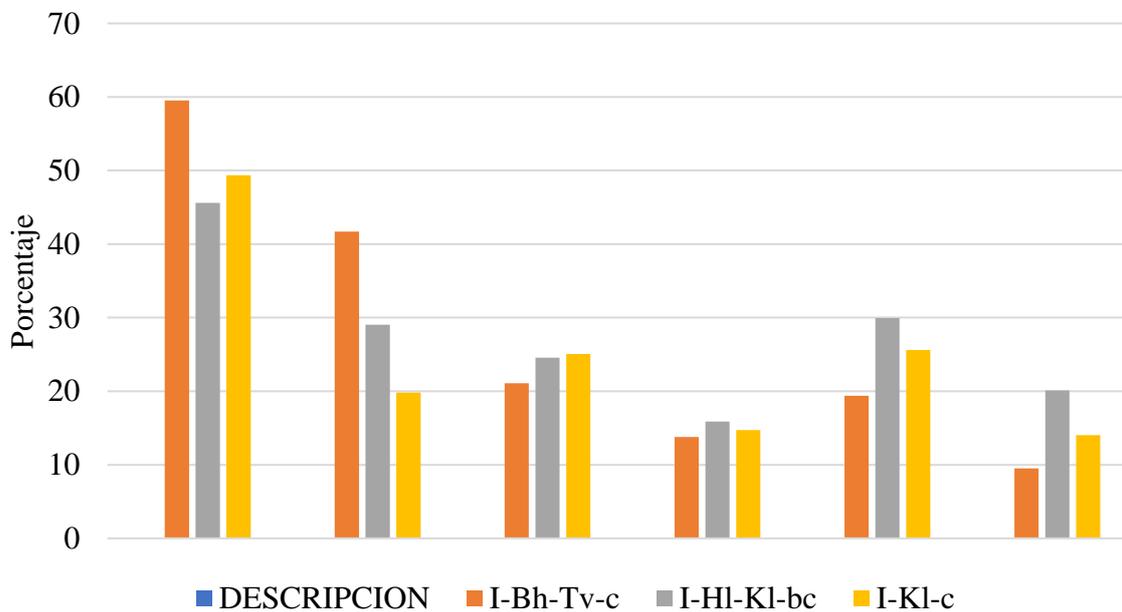


Figura 54: Distribución porcentual por texturas de suelos

Tabla 37: Clasificación textural de los suelos

N°	Tipo de Suelo	Arena Tierra %	Arena Subsuelo %	Limo superficie %	limo subsuelo %	arcilla superficie %	arcilla subsuelo %	Peso	área (km ²)	área (%)
1	I-Bh-Tv-c	59.53	41.70	21.08	13.78	19.39	9.53	5	33.26	4.68
2	I-HI-KI-bc	45.58	29.03	24.54	15.87	29.96	20.10	1	113.7	16.01
3	I-KI-c	49.35	19.8	25.08	14.73	25.6	14.03	2	191.16	26.92
4	I-c	58.9		16.2		24.9		4	371.93	52.38
Total									710.05	100

Tipo de Suelo	Arena Tierra %	Arena Subsuelo %	Limo superficie %	limo subsuelo %	arcilla superficie %	arcilla subsuelo %	Peso	área (km ²)	área (%)	
Distrito Huanchay										
I-HI-KI-bc	45.58	29.03	24.54	15.87	29.96	20.10	1	20.18	9.64	
I-KI-c	49.35	19.8	25.08	14.73	25.6	14.03	2	112.1	53.7	
I-c	58.9		16.2		24.9		4	76.70	36.7	
Total								209.19	100	
Distrito Pampas Grande										
I-KI-c	49.35	19.8	25.08	14.73	25.6	14.03	2	57.04	16.2	
I-c	58.9		16.2		24.9		4	295.2	83.8	
Total								352.3	100	
Distrito La Libertad										
I-Bh-Tv-c	59.53	41.70	21.08	13.78	19.39	9.53	5	33.26	22.4	
I-KI-c	49.35	19.8	25.08	14.73	25.6	14.03	2	21.80	14.7	
I-HI-KI-bc	45.58	29.03	24.54	15.87	29.96	20.10	1	93.52	62.9	
Total								148.6	100	

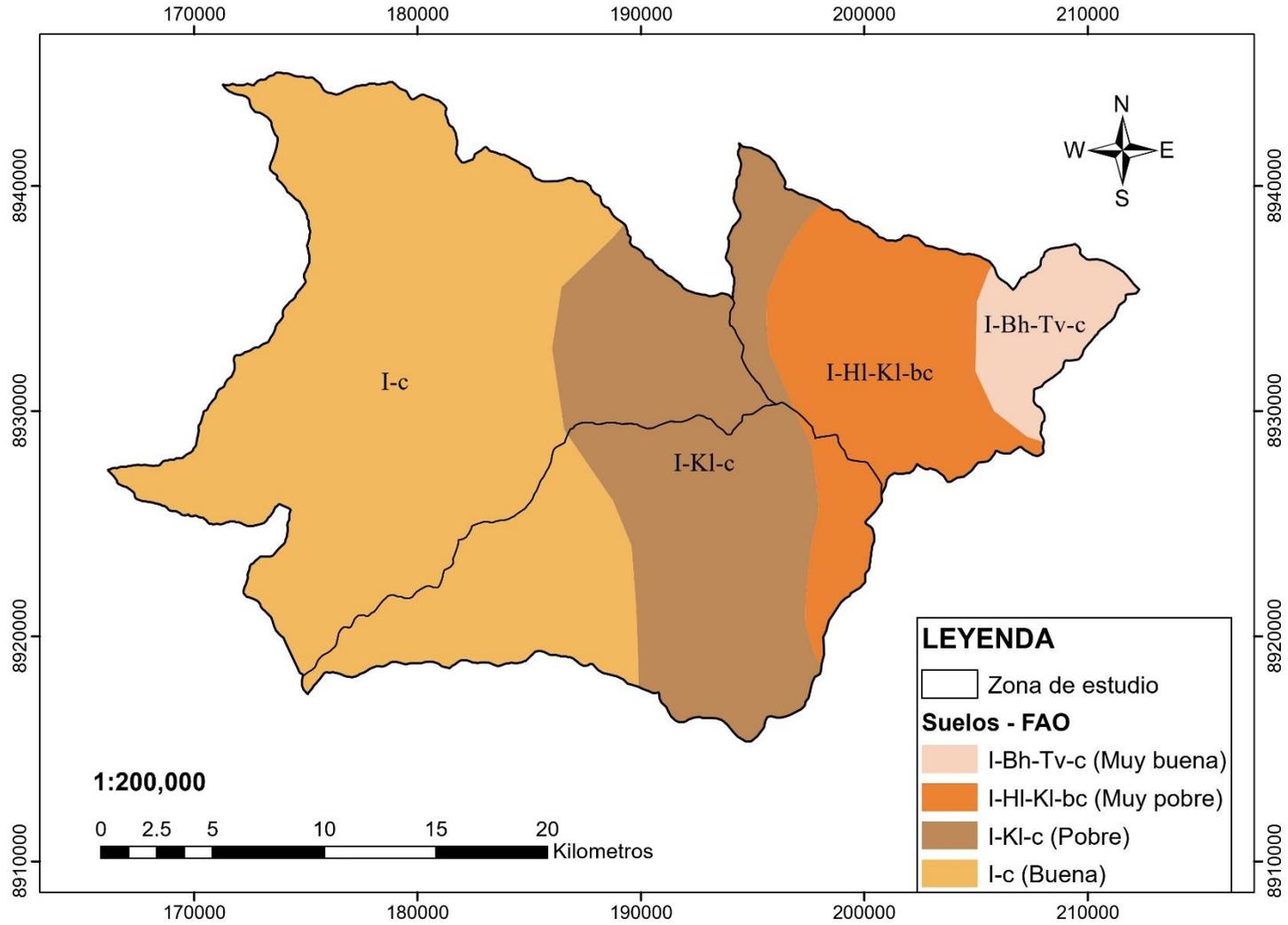


Figura 55: Clasificación del tipo de suelo

4. 1. 7. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se considera como una estimación aproximada de la cantidad de vegetación presente y de la perspectiva de agua subterránea en el espacio. La Figura 56, muestra el mapa de NDVI de la zona de estudio y los valores de NDVI se clasificaron en cinco (ver Tabla 38) que van de -0.97 a 0.8. Donde los valores de NDVI que van de 0 a 0.2 (Vegetación escasa más suelo) en las partes altas con 57.69% del total del área y un 34.57% que representa a suelos desnudos que se encuentran en las partes bajas. Asimismo, se muestra la ponderación realizada según la clasificación, donde las ponderaciones más altas para NDVI corresponden a las zonas con alta densidad de vegetación por ende acumula mayor humedad en el suelo (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018).

Tabla 38: Clasificación y ponderación de la variable NDVI

Ítem	Rango	Descripción	Área (km ²)	Área (%)	Clasificación
1	-0.97 – 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra	1.01	0.14	Muy baja
2	0 – 0.2	Suelo Desnudo	245.48	34.57	Baja
3	0.2 – 0.4	Vegetación Escasa + suelo	409.62	57.69	Moderada
4	0.4 – 0.6	Vegetación Dispersa	46.97	6.62	Buena
5	0.6 – 0.98	Vegetación Alta	6.97	0.98	Muy buena
TOTAL			710.05	100	
Distrito Huanchay					
1	-0.97 – 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra	0.13	0.06	Muy baja
2	0 – 0.2	Suelo Desnudo	53.67	25.66	Baja
3	0.2 – 0.4	Vegetación Escasa + suelo	133.48	63.82	Moderada
4	0.4 – 0.6	Vegetación Dispersa	18.81	8.99	Buena
5	0.6 – 0.98	Vegetación Alta	3.07	1.47	Muy buena
Distrito La Libertad					
1	-0.97 – 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra	0.13	0.09	Muy baja
2	0 – 0.2	Suelo Desnudo	22.33	15.03	Baja
3	0.2 – 0.4	Vegetación Escasa + suelo	115.05	77.45	Moderada
4	0.4 – 0.6	Vegetación Dispersa	9.79	6.59	Buena
5	0.6 – 0.98	Vegetación Alta	1.24	0.83	Muy buena
Distrito Pampas Grande					
1	-0.97 – 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra	0.75	0.21	Muy baja
2	0 – 0.2	Suelo Desnudo	169.41	48.10	Baja
3	0.2 – 0.4	Vegetación Escasa + suelo	161.02	45.72	Moderada
4	0.4 – 0.6	Vegetación Dispersa	18.37	5.21	Buena
5	0.6 – 0.98	Vegetación Alta	2.65	0.75	Muy buena

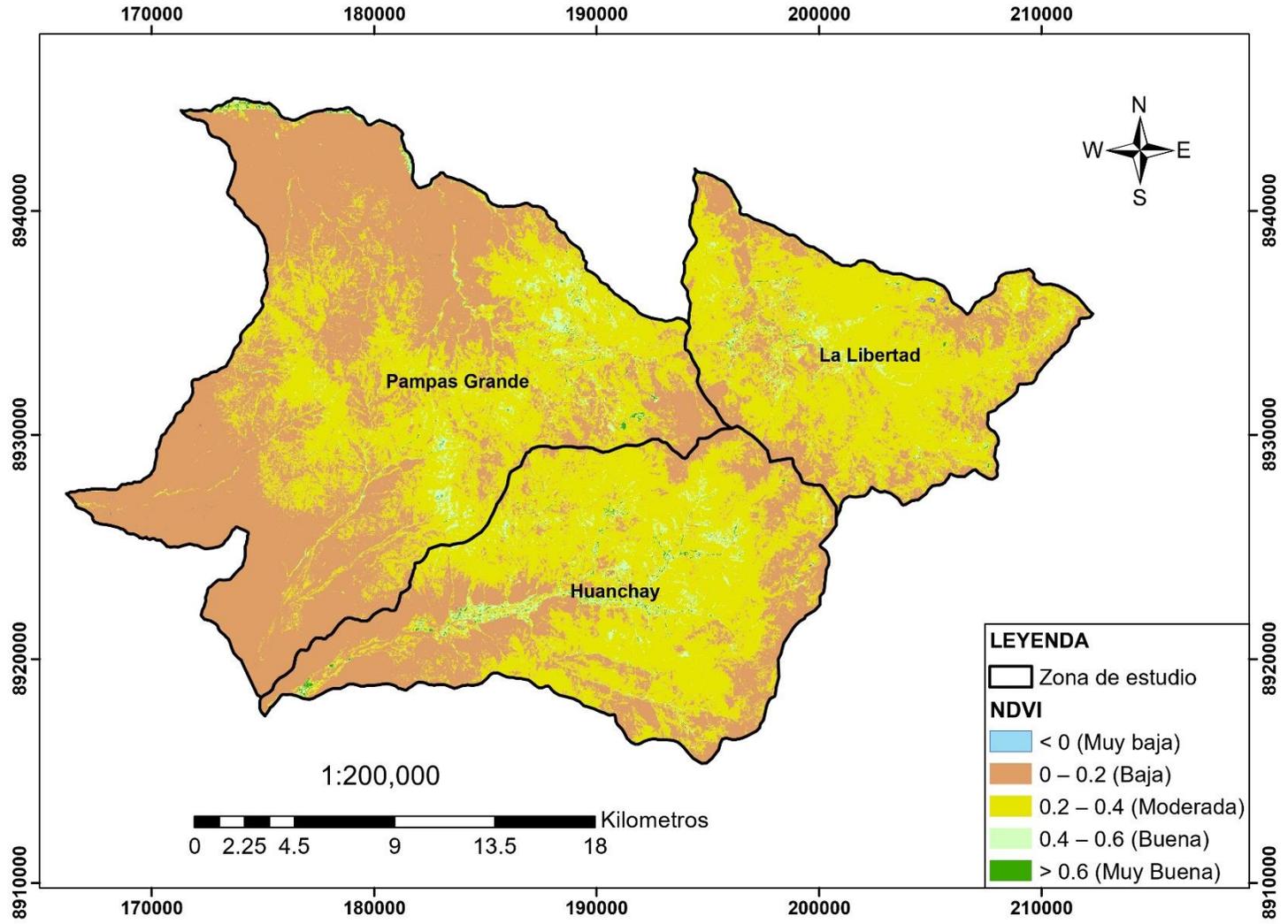


Figura 56: Mapa de NDVI en periodo seco año 2021 clasificado

4. 2. Delimitación de zonas con potencial de agua subterráneas

La delimitación de la zona con una alta probabilidad de encontrar agua subterránea fue definida mediante el proceso de análisis jerárquico con herramientas que ofrece el software ArcGIS. Se obtuvo zonas potenciales en las partes altas de la zona que abarca en el aspecto litológico a las andesitas, tobas, ignimbritas, rocas piroclásticas, así como los depósitos aluviales, areniscas y lutitas con presencia de fallas. Además, demarca zonas en las que el terreno hay matorrales y bosques, terrenos con vegetación cultivada.

En la Tabla 39, se muestra que hay un 58.11% de clase media para encontrar aguas subterráneas, como segundo porcentaje más alto (27.64%) se encuentra en las partes altas de distrito de Huanchay, Pampas Grande y en el distrito de La libertad en mayor parte de su área, así como en las áreas aledañas a los ríos.

El potencial de agua subterránea en la parte cercana a la costa del área de estudio es muy pobre o baja con 14.15 % y cubre una superficie de 100.543 km² con presencia de suelo desnudo, cardonales, suelos tipo lithosols – Chernozems y con granodioritas, tonalitas de la costa en cuanto a litología.

El agua potencial en la zona de estudio se debe probablemente a la presencia de afloramientos rocosos con pendientes pronunciadas (fallas). En la Figura 59, se ilustra el mapa potencial de agua subterránea.

Tabla 39: Clasificación de la zona potencial de agua subterránea

Clase	Descripción	Área (km ²)	Área (%)
1	Muy Baja	0.012	0.002
2	Baja	100.543	14.152
3	Medio	412.853	58.113
4	Alto	196.347	27.638
5	Muy Alto	0.679	0.096
Total		710.05	100.00

Tabla 40: Clasificación de la zona potencial de agua subterránea por distritos

Distrito	Nivel	Descripción	área (km²)	Área (%)
La Libertad	3	medio	24.771	16.655
	4	Alto	123.279	82.889
	5	Muy Alto	0.677	0.456
	Total		148.73	100
Pampas Grandes	1	Muy Baja	0.011	0.003
	2	baja	89.544	25.411
	3	Medio	239.525	67.972
	4	Alto	23.306	6.614
	Total		352.39	100
Huanchay	1	Muy Baja	0.001	0.001
	2	baja	10.999	5.254
	3	Medio	148.558	70.971
	4	Alto	49.763	23.773
	5	Muy Alto	0.002	0.001
Total		209.32	100	

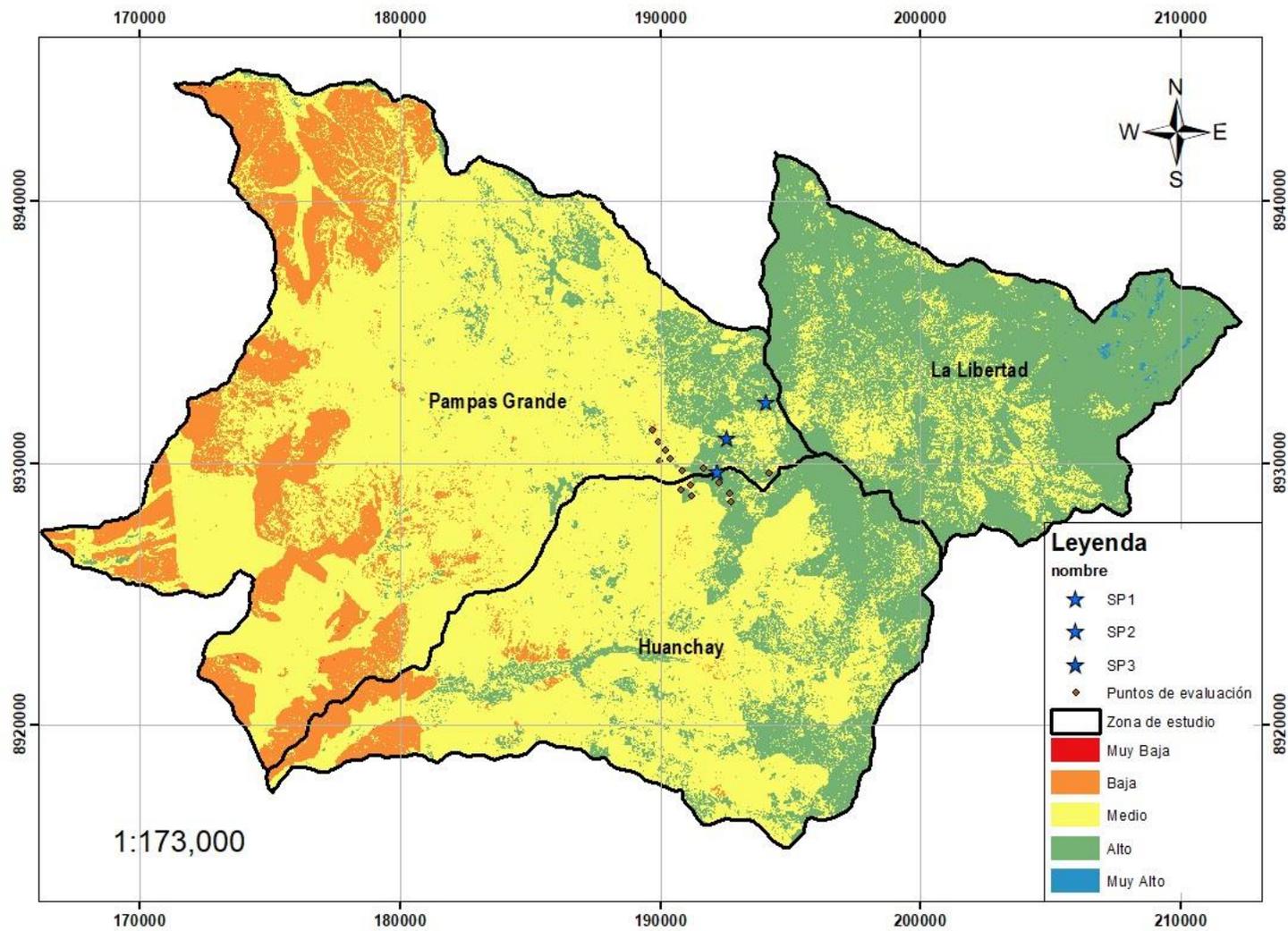


Figura 57: Mapa de probabilidad de zonas de agua subterránea en la zona de estudio

De los 8 puntos geoelectrónicos analizados mediante la geofísica y de la interpretación de estos sondeos, se observa que; solo tres puntos tienen el potencial hídrico subterránea a ser considerados (sondaje punto uno, dos y tres). Además, según los objetivos específicos mencionados, donde se busca caracterizar el ámbito hidrológico, geológico, cobertura vegetal y morfología topográfica utilizando teledetección, se puede observar que en la parte este de la zona de estudio existe una alta probabilidad para la prospección de aguas subterráneas. Esto se puede atribuir a varios factores:

- Presencia de cuerpos de agua superficiales: La identificación de ríos, lagunas y ojos de agua en la zona se realizó en Google Earth donde se identificó la existencia de un sistema hídrico. Estos cuerpos de agua pueden indicar la presencia de una fuente de agua subterránea en la región. Las principales lagunas identificadas por la ANA son: Laguna Miquicocha, Ampía, Chucaro, Tantarcocha, Huachua; las que se encuentran en la zona este. Por otro lado, en la parte alta del distrito de Huanchay son: Huangarcocha, Maco, Shillquill, Condorcocha y Cullucocha.
- Condiciones geológicas relativamente favorables, como andesitas tobas e ignimbritas y bloques que fueron considerados como moderada. Así como la presencia de fallas en el este que son propicias para la acumulación y almacenamiento de agua subterránea.
- Cobertura vegetal, según lo reportado en el mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada se observa que en el este hay presencia de cobertura vegetal con clasificación de buena a muy buena, asimismo de acuerdo con el uso actual de tierra se presenta bosques, matorrales y pajonal andino. Estas características pueden indicar la presencia de condiciones favorables para la acumulación y recarga de agua subterránea en la parte este.

Por otro lado, no se cuenta con inventariado de pozos para el área de estudio y para corroborar la delimitación del mapa de zona potencial de agua subterránea de la Figura 57 y Figura 58, se usó los afloramientos identificados en la etapa de campo incluyendo los tres sondeos potenciales que se muestran en la Tabla 41. Además, se consideró las fuentes de agua que se encuentran en los derechos de uso de agua dentro de la zona de estudio los que presentan en la Tabla 43.

En resumen, la combinación de la presencia de cuerpos de agua superficiales, condiciones geológicas favorables y las características identificadas mediante teledetección en la parte

este de la zona de estudio sugieren una alta probabilidad de encontrar agua subterránea en esta área. Sin embargo, es importante corroborar estos resultados utilizando métodos geofísicos, como el método de Self-Potential (SP) y la identificación de afloramientos de agua subterránea, para verificar la presencia y la profundidad del recurso hídrico subterráneo.

Tabla 41: Inventario de fuentes de agua subterránea y puntos favorables para las perforaciones exploratorias

N°	Este (m)	Norte (m)	Altura (m)	Nombre	pH	CE	T (°C)
1	194155	8929634	3705	Urhuacocha	7.6	0.48	10
2	192699	8928508	4064	Jatun Joro	6.8	0.65	12
3	192652	8928841	4107	Inticancha	7.2	0.72	14
4	192244	8929243	4178	Ichic Joro	6.6	0.48	10
5	191197	8928728	3824	Uchcu Chacra	7.2	0.76	12
6	190787	8928959	3956	Azul Puquio	7.8	0.68	14
7	191157	8929159	4116	Cochacancha	6.9	0.56	13
8	191646	8929818	4205	Asiac	6.7	0.58	12
9	190857	8929693	4070	Ichic Allicho	6.9	0.59	10
10	189960	8930088	3919	Puquial PC	6.8	0.47	12
11	190382	8930157	3887	Puquila DL	7.2	0.66	10
12	190211	8930472	3831	Puquial JG	7.1	0.64	14
13	189934	8930827	3795	Puquial RD	7.3	0.62	11
14	189672	8931261	3667	Chorro	7.5	0.58	12
15	194093	8932315	4185	SP1	8.2	-	14
16	192222	8929650	4311	SP2	7.5	-	19
17	192584	8930932	4244	SP3	9.42	-	19

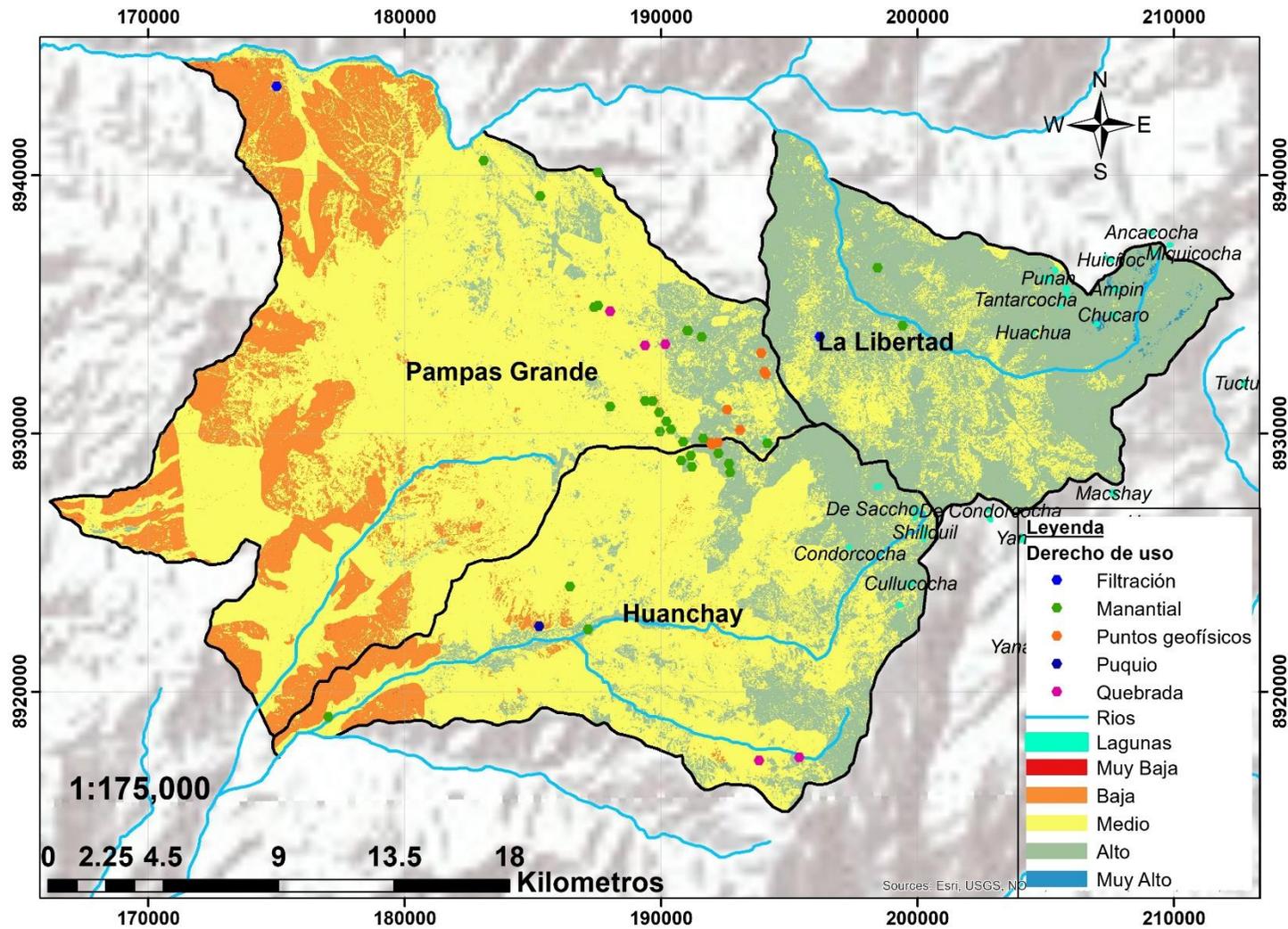


Figura 58: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea con puntos de evaluación usados para validar

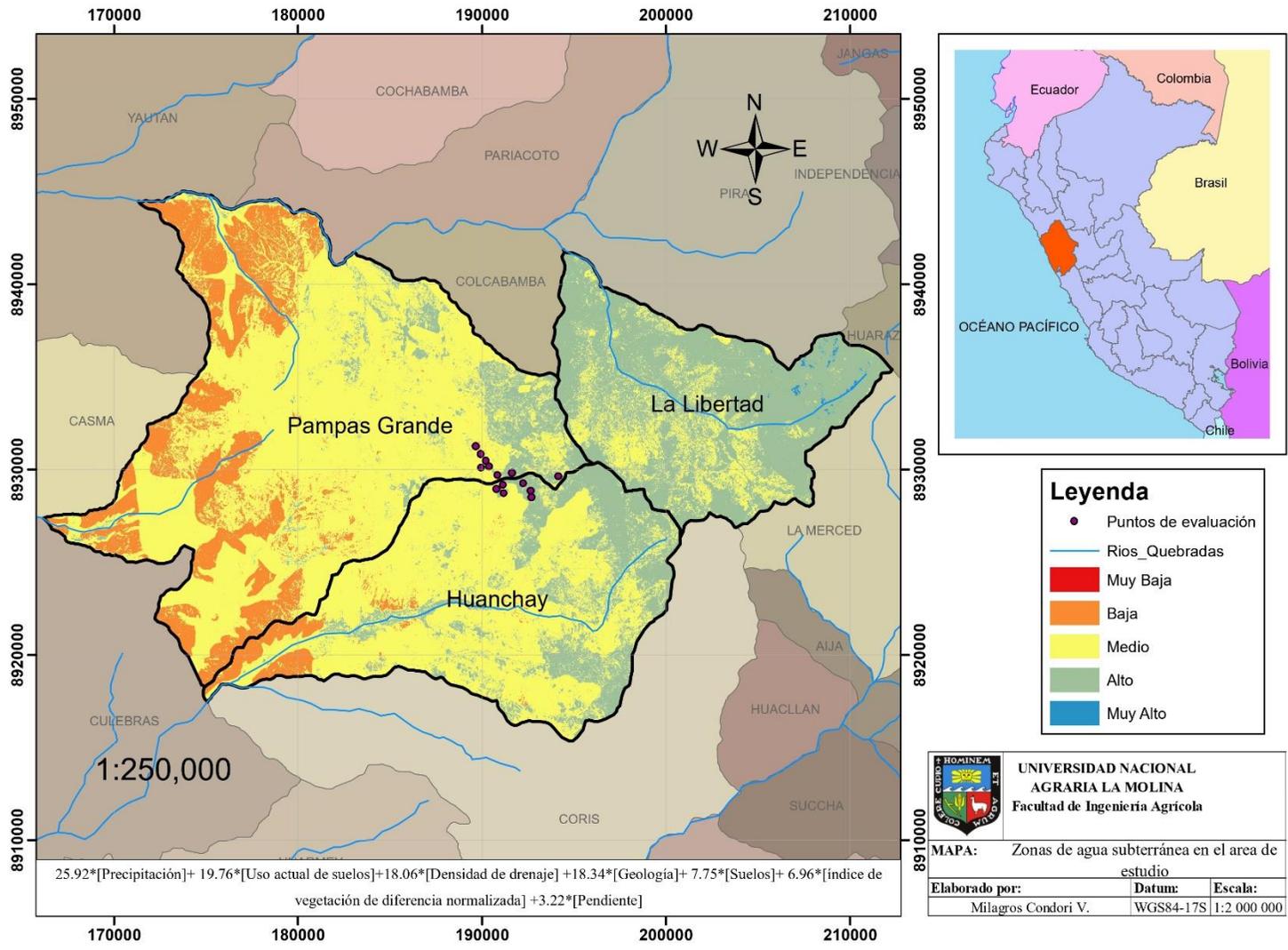


Figura 59: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea

4.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una metodología empleada en diversas investigaciones y estudios con el objetivo de examinar cómo cambian los resultados de un modelo o análisis en respuesta a modificaciones en las variables de entrada.

En el presente estudio se tomó en cuenta la variable de la precipitación en el análisis de sensibilidad debido a la influencia directa en la recarga de agua para almacenar aguas subterráneas. Se ha considerado pesos de 20%, 30%, 40%, 45%, 50%, 55% y 60% para la delimitación de zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas.

De la Figura 61 a la Figura 68, se observa los cambios en las delimitaciones al variar el peso de la precipitación, donde a medida que el peso de la precipitación aumenta la probabilidad “medio” disminuye y aumenta categoría “baja” desde la parte más baja hasta la zona media del área de estudio (Figura 60). Además, se puede observar en las delimitaciones que mientras el peso de la precipitación aumenta las categorías se delimitan de forma similar al mapa de precipitaciones (Figura 49).

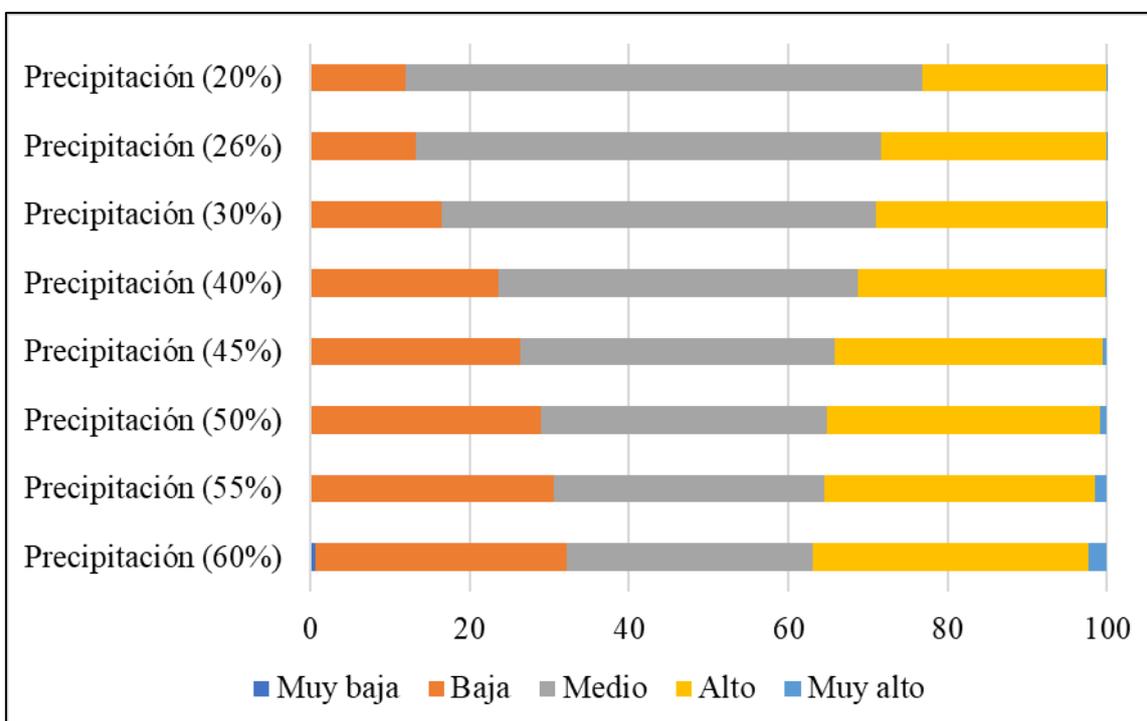


Figura 60: Variación de las categorías al variar la precipitación

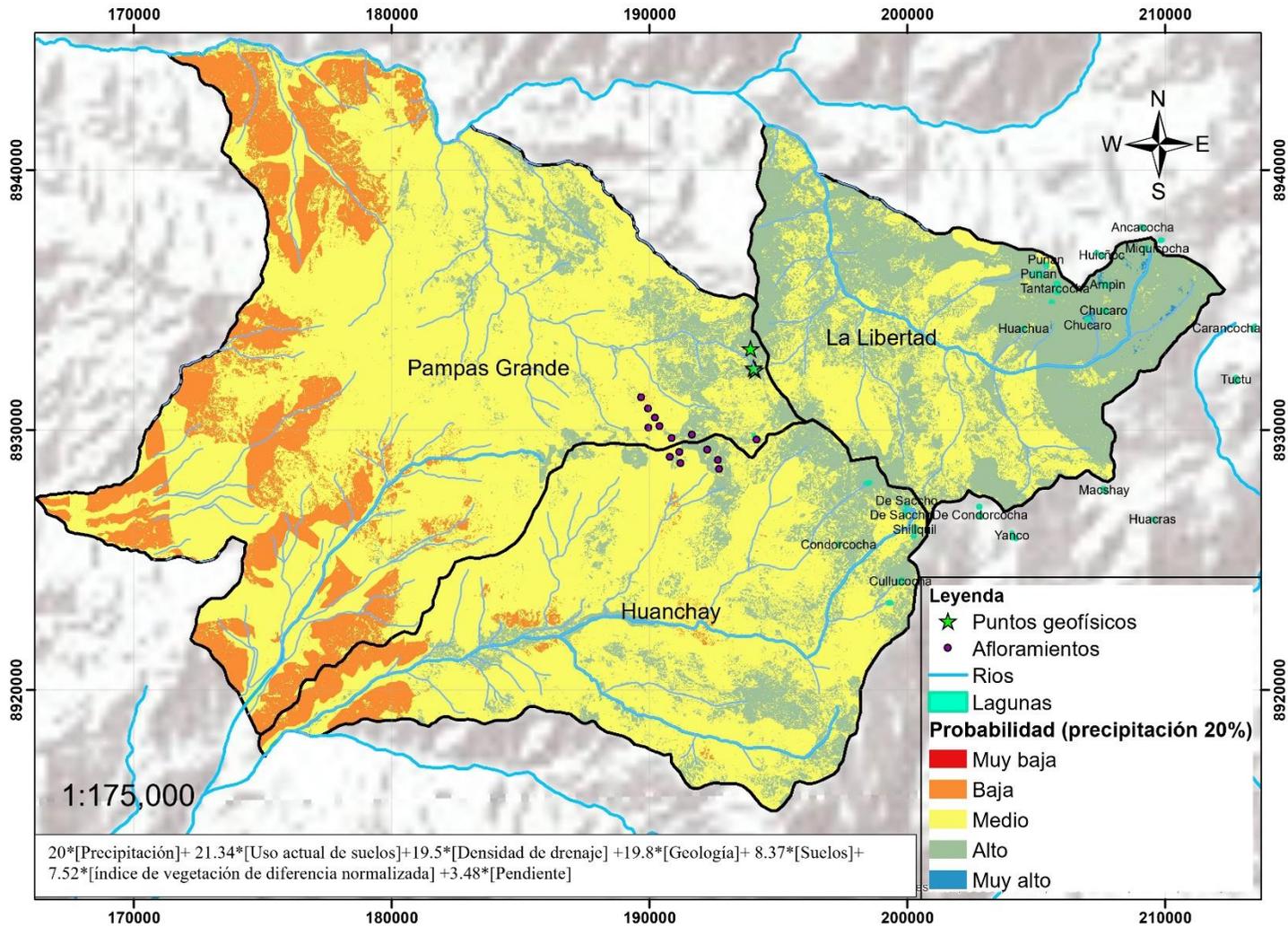


Figura 61: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 20%)

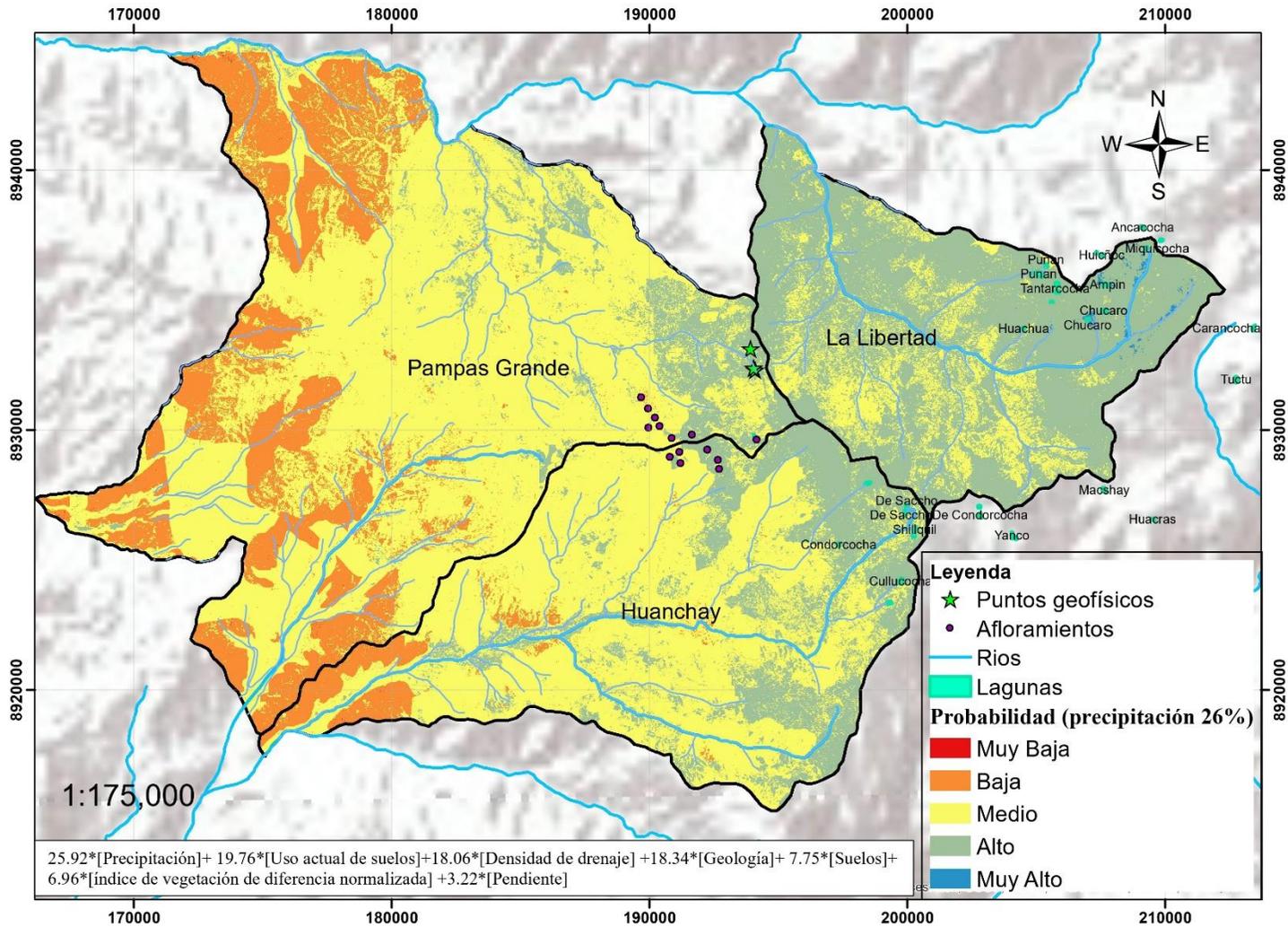


Figura 62: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 26%)

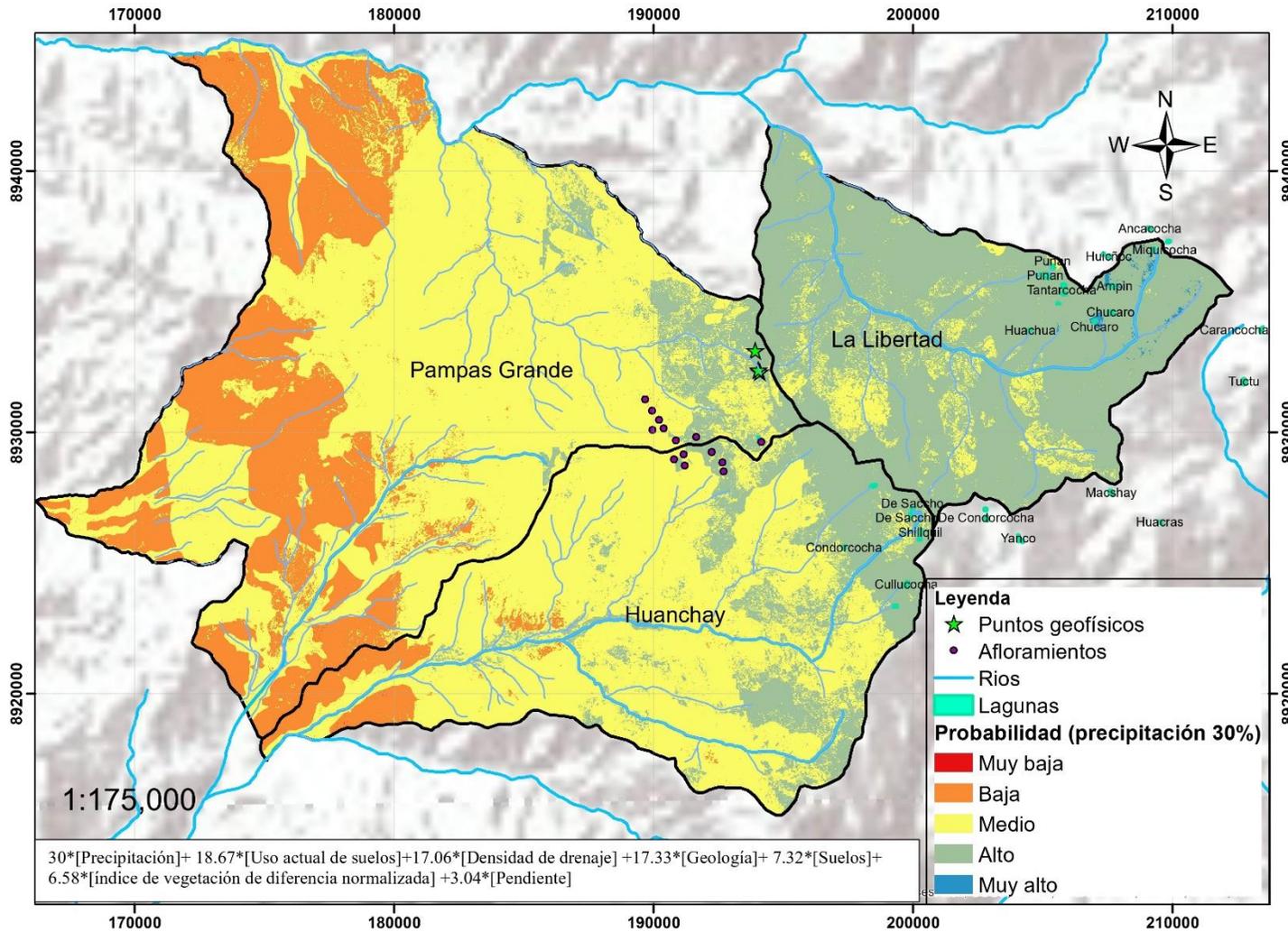


Figura 63: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 30%)

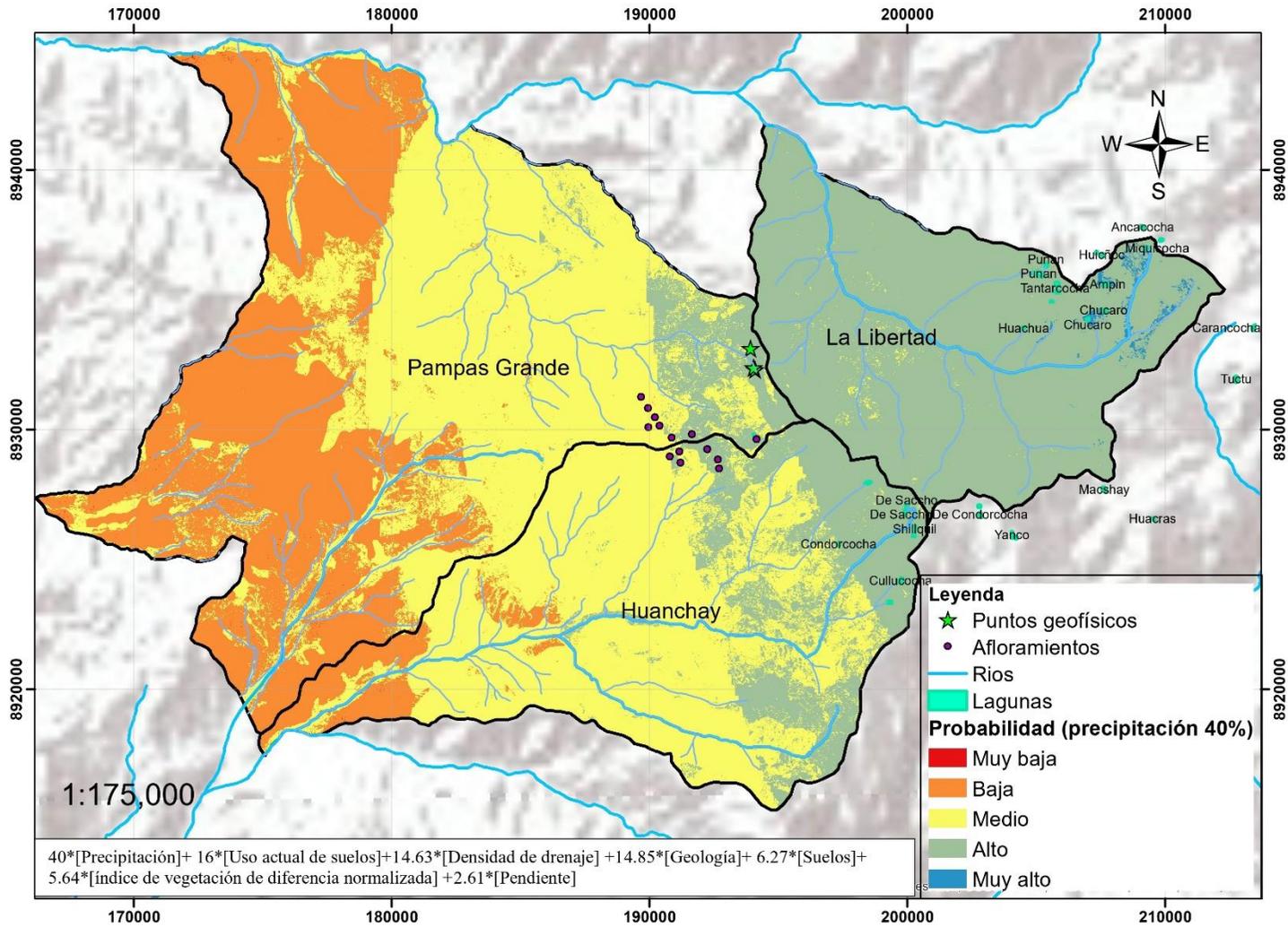


Figura 64: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 40%)

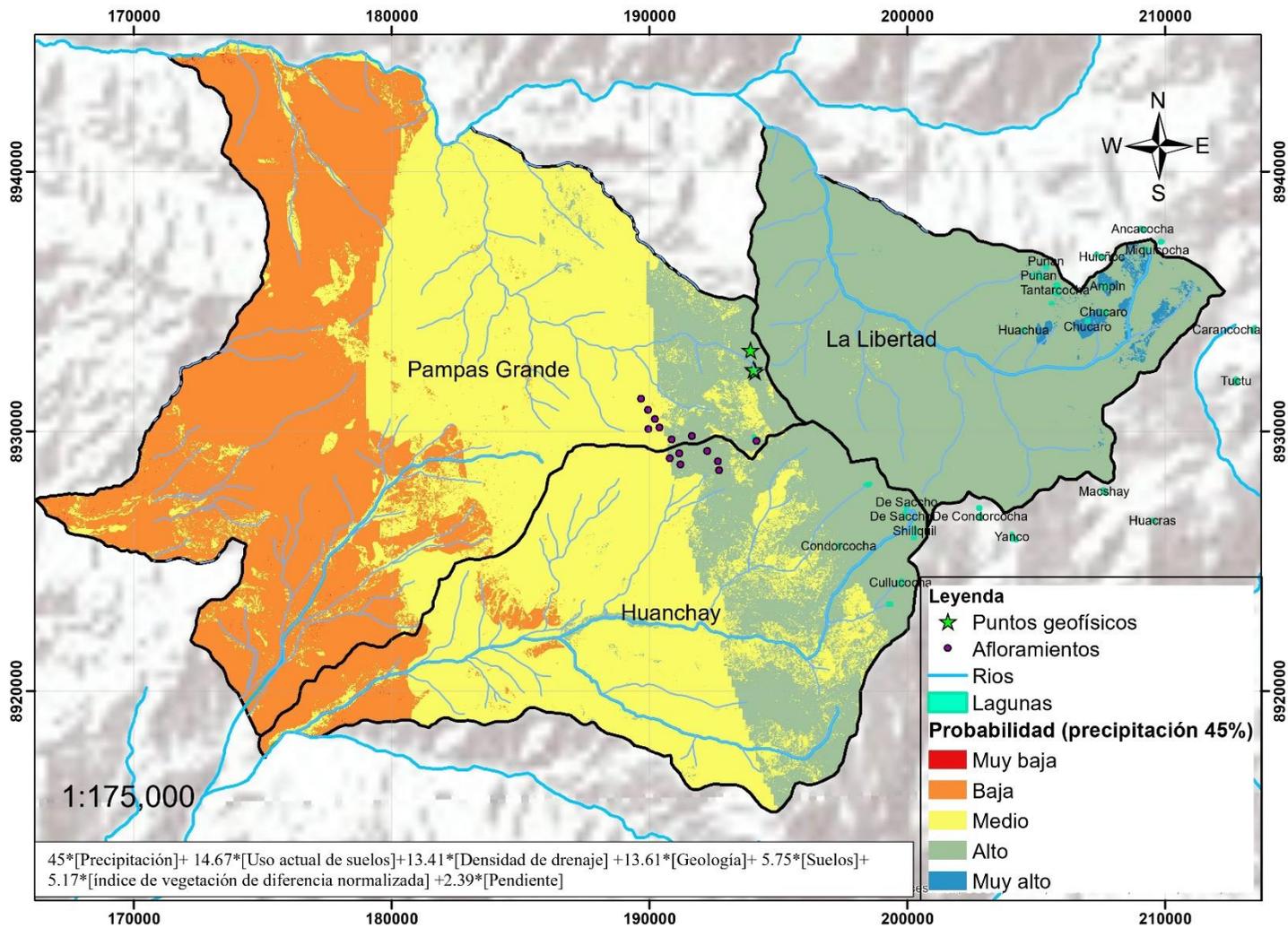


Figura 65: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 45%)

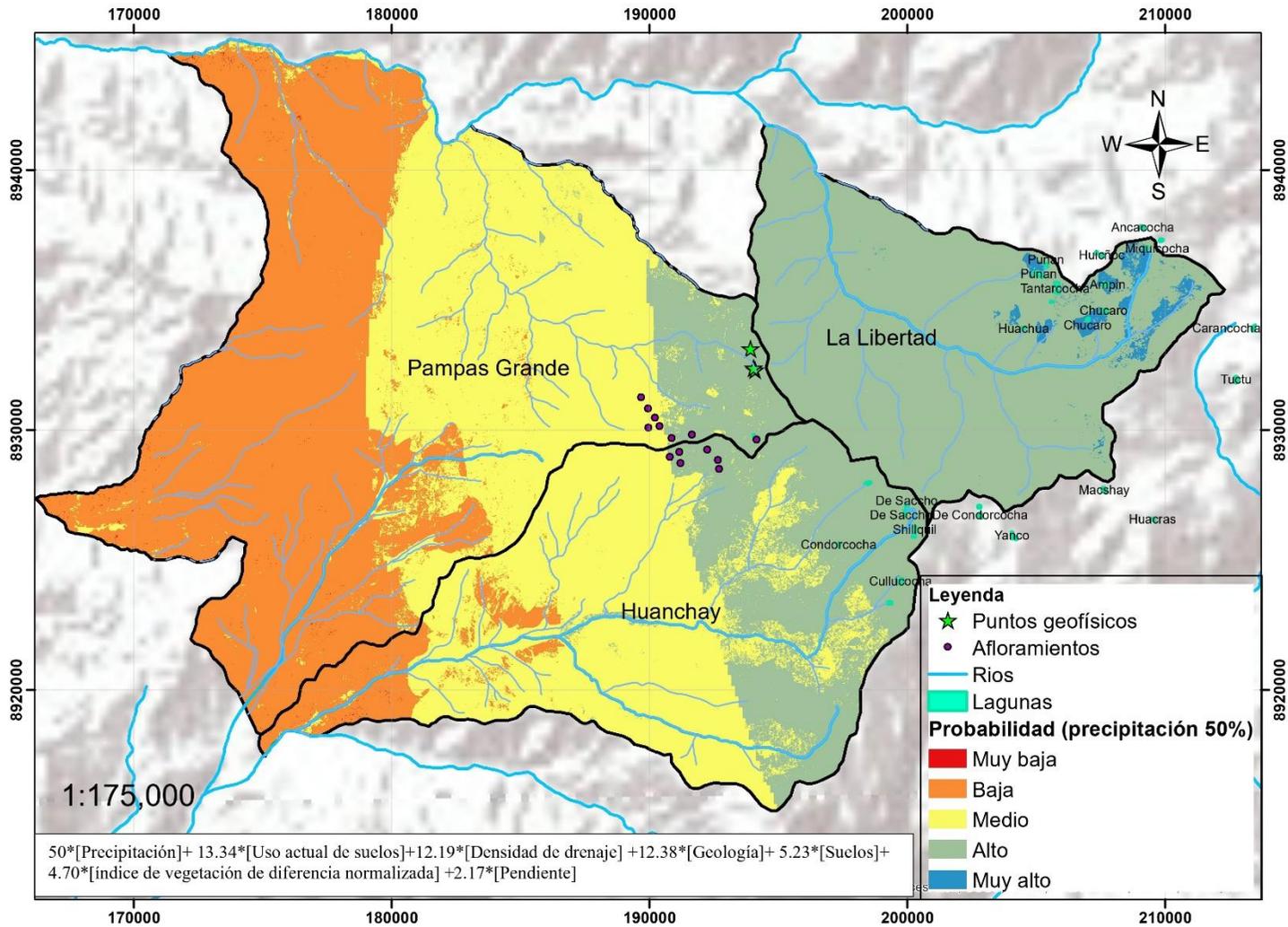


Figura 66: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 50%)

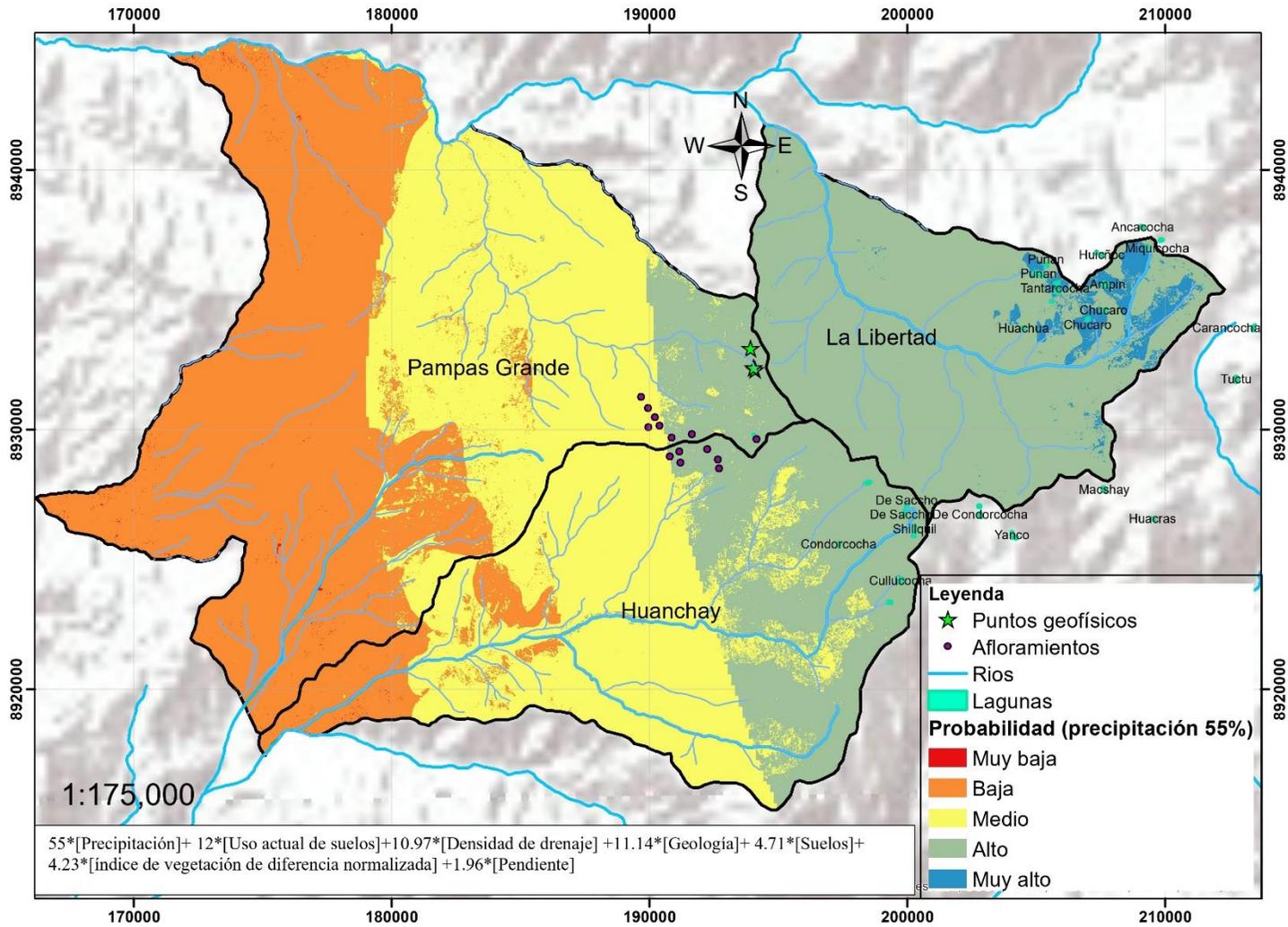


Figura 67: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 55%)

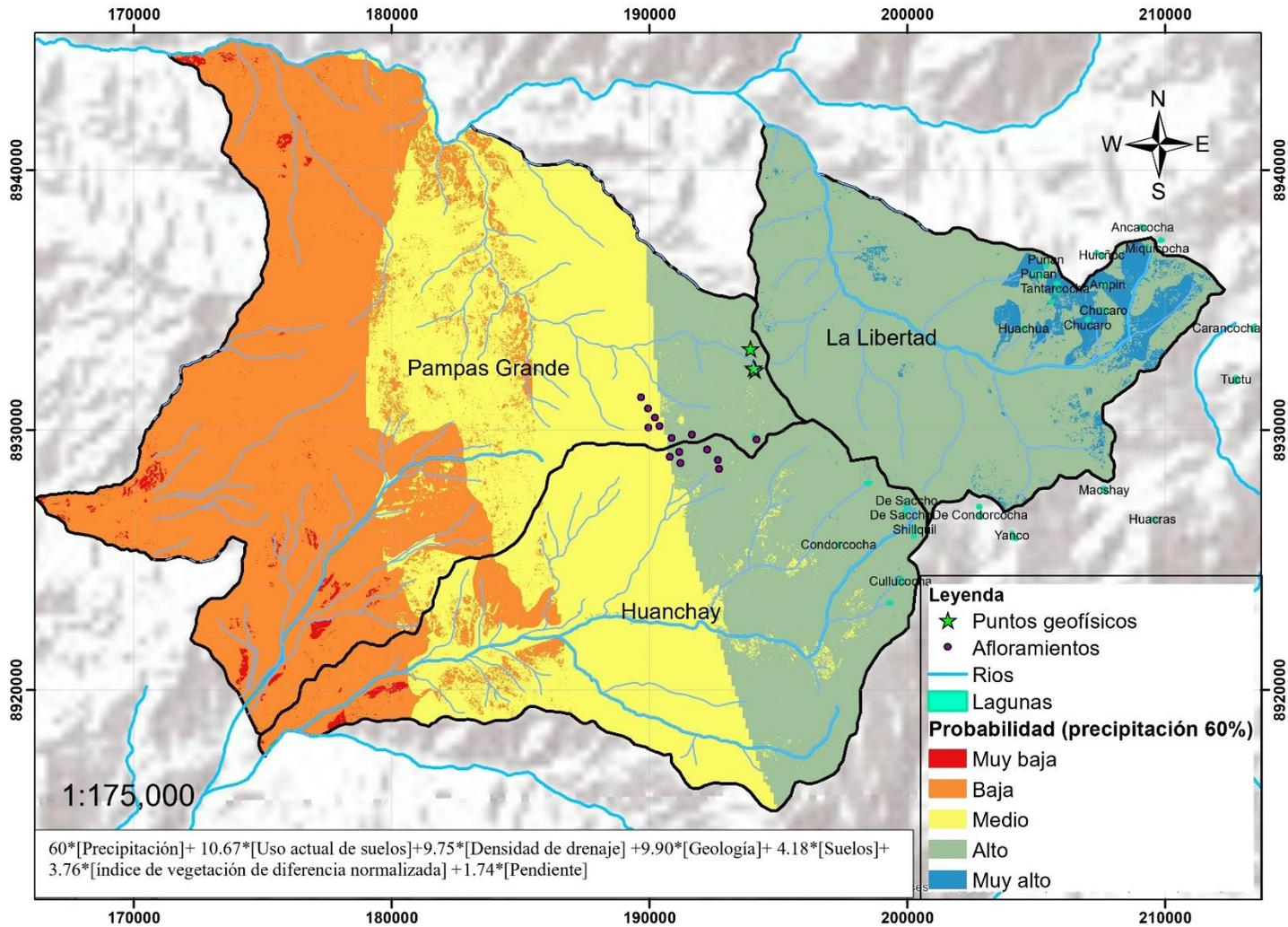


Figura 68: Zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas (precipitación 60%)

4.4. Validación

La validación se reconoce como un procedimiento esencial en la modelación, crucial para alcanzar la meta de obtener modelos precisos y confiables. En este contexto, se ha utilizado el análisis de la curva ROC (receiver operating characteristics) para validar la delimitación de zonas potenciales destinadas a la prospección de aguas subterráneas. La curva ROC es una herramienta que facilita la visualización, organización y selección de clasificadores en función de su rendimiento, considerando la clase verdadera y la clase hipotética. Este método es ampliamente empleado en la comunidad de aprendizaje automático (Fawcett, 2006). La curva ROC representa gráficamente la tasa de falsos positivos en el eje "X" y la tasa de verdaderos positivos en el eje "Y" de esta manera la curva de predicción ROC representa el resultado de dos índices (Kumar & Krishna, 2016).

En el área de estudio, no se dispuso de un inventario de pozos. En su lugar, se han considerado los puntos de agua, como manantiales, filtraciones y los puntos geofísicos evaluados en campo, detallados en la Tabla 43. Estos puntos de agua se han categorizado como "alto" y "muy alto" debido a que forman parte del inventario contemplado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en los Derechos de Usos de Agua (DUA), utilizados para fines agrarios, poblacionales y mineros y su distribución se encuentra en la Figura 69.

Tabla 42: Fuentes de agua identificados en el área de estudio comparada por la realidad

Tipo	Nombre	Resolución	Este (m)	Norte (m)	Distrito	Predicción	Realidad
Manantiales observados en la etapa de campo							
Manantiales	Uchcu Chacra	-	191197	8928728	Huanchay	Medio	Alto
Manantiales	Azul Puquio	-	190787	8928959	Huanchay	Alto	Alto
Manantiales	Cochacancha	-	191157	8929159	Huanchay	Alto	Alto
Manantiales	Asiac	-	191646	8929818	Pampas Grande	Alto	Alto
Manantiales	Ichic Allicho	-	190857	8929693	Pampas Grande	Medio	Alto
Manantiales	Puquial PC	-	189960	8930088	Pampas Grande	Medio	Alto
Manantiales	Puquial DL	-	190382	8930157	Pampas Grande	Medio	Alto
Manantiales	Puquial JG	-	190211	8930472	Pampas Grande	Alto	Alto
Manantiales	Puquial RD	-	189934	8930827	Pampas Grande	Medio	Alto
Manantiales	Chorro	-	189672	8931261	Pampas Grande	Medio	Alto
Manantiales	Urhuacocha	-	194155	8929634	Pampas Grande	Alto	Alto
Manantiales	Jatun Joro	-	192699	8928508	Huanchay	Alto	Alto
Manantiales	Inticancha	-	192652	8928841	Huanchay	Alto	Alto
Manantiales	Ichic Joro	-	192244	8929243	Huanchay	Alto	Alto

Continuación...

Tipo	Nombre	Resolución	Este (m)	Norte (m)	Distrito	Predicción	Realidad
Puntos geofísicos evaluados en campo							
Puntos geofísicos	SP6	-	192222	8929650	Huanchay	Medio	Muy bajo
Puntos geofísicos	SP8	-	192584	8930932	Pampas Grande	Medio	Bajo
Puntos geofísicos	SP1	-	194093	8932315	Pampas Grande	Alto	Alto
Puntos geofísicos	SP2	-	194030	8932394	Pampas Grande	Alto	Alto
Puntos geofísicos	SP3	-	193912	8933124	Pampas Grande	Alto	Alto
Puntos geofísicos	SP4	-	191949	8929641	Pampas Grande	Medio	Bajo
Puntos geofísicos	SP5	-	192007	8929586	Pampas Grande	Alto	Muy bajo
Puntos geofísicos	SP7	-	193078	8930141	Pampas Grande	Medio	Medio

Continuación...

Tipo	Nombre	Resolución	Este (m)	Norte (m)	Distrito	Predicción	Realidad
Derechos de uso agrario ⁽¹⁾							
Quebrada	Mishque, Pulluwayin	R.D. N° 0485-2023-ANA-AAA.H.CH	188010	8934741	Huanchay	Medio	Alto / muy alto
Filtración	Río grande	R.A. N° 0004-2017-ANA-AAA.HCH-ALACH	181467	8942673	Pampas Grande	Baja	Alto / muy alto
Quebrada	Huinchus	R.D. N° 0319-2018-ANA-AAA.H.CH	189375	8933424	Pampas Grande	Medio	Alto / muy alto
Filtración	Río grande	R.A. N° 0004-2017-ANA-AAA.HCH-ALACH	175007	8943454	Pampas Grande	Baja	Alto / muy alto
Quebrada	Rurin Quishuar	R.D. N° 1206-2016-ANA-AAA.H.CH	193822	8917344	Pampas Grande	Alto	Alto / muy alto
Quebrada	Huascas	R.D. N° 1404-2016-ANA-AAA.H.CH	195398	8917463	Pampas Grande	Alto	Alto / muy alto
Quebrada	Huayanquita	R.D. N° 0174-2016-ANA/AAA.H.CH	190165	8933463	Pampas Grande	Alto	Alto / muy alto
Derechos de uso poblacional ⁽¹⁾							
Puquio	Ullmuc	R.A. N° 151-2004-DR-AG-ANCASH/ATDRCH	185253	8922549	Huanchay	Baja	Alto / muy alto
Manantial	Nununca	R.A. N° 059-2020-ANA-AAA.HCH-ALACHUARMEY	199425	8934198	La Libertad	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Winchus	R.D. N° 205-2018-ANA-AAA.H.CH	191582	8933754	Pampas	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Ishcayquita 01	R.D. N° 205-2018-ANA-AAA.H.CH	191050	8933982	Pampas	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Ishcayquita 02	R.D. N° 205-2018-ANA-AAA.H.CH	191018	8934002	Pampas	Alto	Alto / muy alto

Continuación...

Tipo	Nombre	Resolución	Este (m)	Norte (m)	Distrito	Predicción	Realidad
Derechos de uso poblacional ⁽¹⁾							
Manantial	Ichichuanra	R.D. N° 0386-2017-ANA-AAA.H.CH	187540	8934961	Pampas	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Racrahuaz	R.D. N° 0386-2017-ANA-AAA.H.CH	187392	8934897	Pampas	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Chunchin	R.D. N° 0423-2017-ANA-AAA.H.CH	189384	8931269	Pampas	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Yacururi	R.D. N° 0423-2017-ANA-AAA.H.CH	188022	8931049	Pampas	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Ullmoc Ruri	R.A. N° 0066-2012-ANA-ALACH	186449	8924093	Huanchay	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Patipuquio	R.D. N° 687-2021-ANA-AAA.H.CH	183076	8940578	Pampas	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Limon Puquio	R.D. N° 227-2020-ANA-AAA.H.CH	185285	8939192	Pampas	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Huanroc	R.D. N° 227-2020-ANA-AAA.H.CH	187540	8940116	Pampas	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Contra	R.A. N° 111-2019-ANA-AAA.HCH-ALACHUARMEY	177024	8919032	Culebras	Medio	Alto / muy alto
Manantial	Huanlanco	R.D. N° 1246-2017-ANA-AAA.H.CH	198450	8936425	La Libertad	Alto	Alto / muy alto
Manantial	Acropuri	R.A. N° 184-2012-ANA-ALACH	187155	8922428	Huanchay	Medio	Alto / muy alto

Continuación...

Tipo	Nombre	Resolución	Este (m)	Norte (m)	Distrito	Predicción	Realidad
Derechos de uso minero							
Filtración	Quilque	R.A. N° 182-2005-DR-AG- ANCASH/ATDRCH	196195	8933756	La Libertad	Alto	Alto / muy alto
Lagunas inventariadas -ANA ⁽¹⁾							
Laguna	Condorcocha	-	197332. 3	8925593. 9	Huanchay	Alto/medio	Alto / muy alto
Laguna	Cullucocha	-	199726. 6	8924190. 1	Huanchay	Alto/medio	Alto / muy alto
Laguna	De Saccho	-	199903. 6	8926895. 8	Huanchay	Alto	Alto / muy alto
Laguna	Shillquil	-	200271. 7	8926177. 9	Huanchay	Alto / Muy alto/Medio	Alto / muy alto
Laguna	Huachua	-	204502. 0	8933912. 4	La Libertad	Alto / Muy alto	Alto / muy alto
Laguna	Punan	-	205095. 2	8936001. 4	La Libertad	Alto / Muy alto/Medio	Alto / muy alto
Laguna	Tantarcocha	-	205807. 5	8935610. 3	La Libertad	Alto / Muy alto	Alto / muy alto
Laguna	Chucaro	-	207000. 5	8934251. 0	La Libertad	Alto / Muy alto	Alto / muy alto
Laguna	Ampin	-	207761. 2	8935585. 8	La Libertad	Alto / Muy alto	Alto / muy alto
Laguna	Miquicocha	-	209296. 3	8936982. 3	La Libertad	Alto / Muy alto	Alto / muy alto

Nota: (1) Fuentes de uso de agua obtenida de los derechos de uso de agua inventariada por la ANA.

Fuente: etapa de exploración en campo y SNIRH (s.f.).

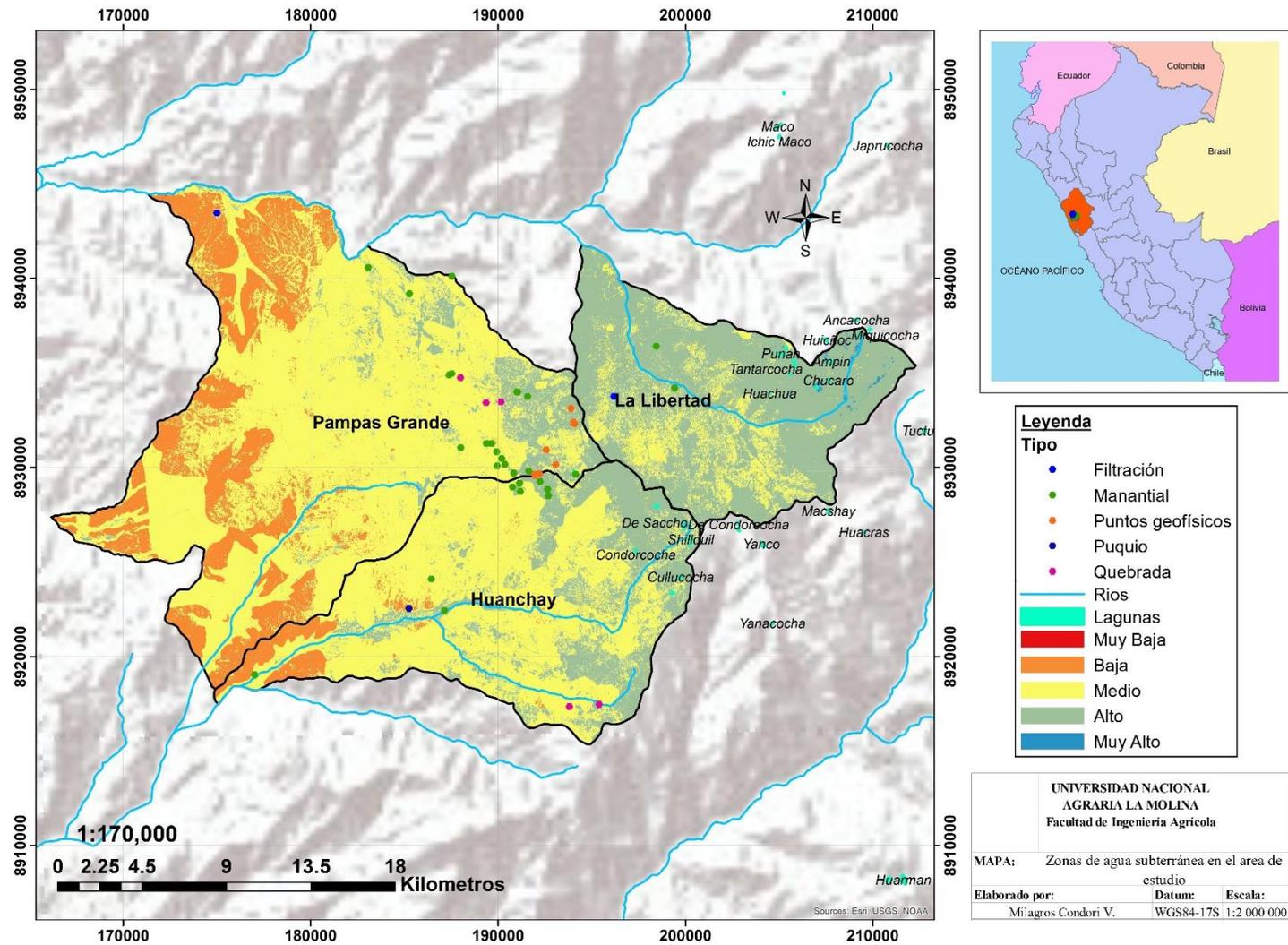


Figura 69: Mapa final de zonas probables para prospectar agua subterránea con fuentes superficiales usados para validar

Como se mencionó líneas arriba, para la validación cuantitativa se utilizó el análisis de curva ROC comparando las ubicaciones de las fuentes de agua mostradas en la Tabla 43 con el mapa delimitado para zonas potenciales para la prospección de agua subterránea obtenido mediante la matriz de Saaty. En la Figura 70, el valor del área bajo la curva (AUC) de la curva ROC para el método de la matriz de Saaty fue de 0.72, lo que corresponde a una predicción del 72.4%. Por lo tanto, el mapa delimitado para prospeccionar aguas subterráneas en la zona de estudio del presente estudio mostró resultados satisfactorios según la Tabla 44 el cual se considera como “útiles para algunos propósitos” y “considerablemente bueno” en comparación con otros estudios (Kumar & Krishna, 2016).

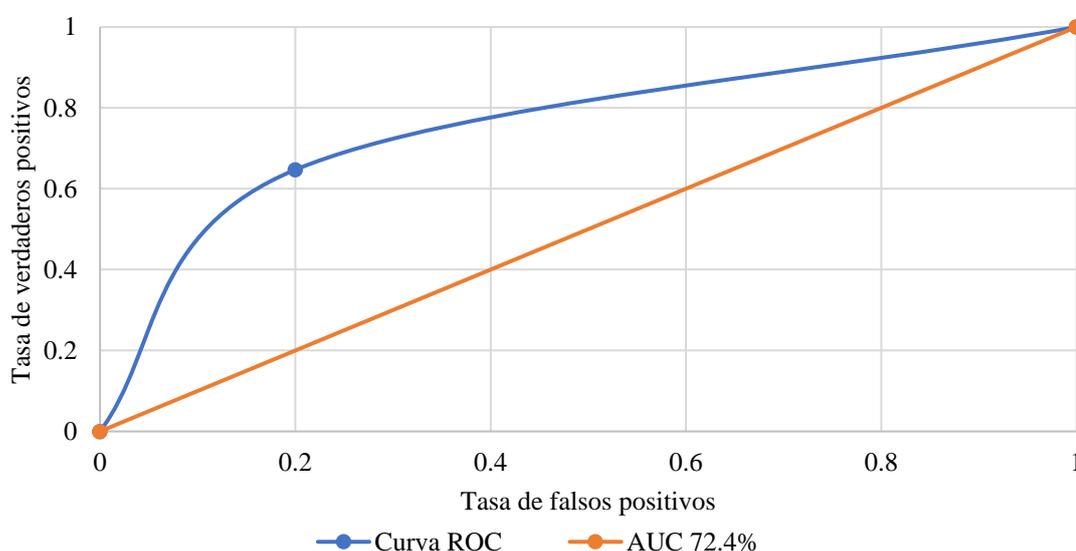


Figura 70: Curva ROC

Tabla 43: Nivel de exactitud bajo el criterio de Sweets

Nivel de exactitud	Predicción
Baja exactitud	0.5 - 0.7
Útiles para algunos propósitos	0.7 - 0.9
Exactitud Alta	0.9 - 1

4. 5. Discusiones

En comparación con estudios anteriores realizados en la misma región geográfica, nuestros resultados son consistentes con los hallazgos de Macas-Espinoza & López-Escobar (2018) y Magesh et al. (2012). Tanto nuestro estudio como los estudios anteriores han identificado

la precipitación como una variable clave que influye en la dinámica de las aguas subterráneas mediante la infiltración y los resultados respaldan esta relación. Por otro lado, la elección de utilizar precipitaciones observadas en lugar de precipitaciones derivadas de teledetección se basó en la necesidad de obtener datos más precisos y confiables y reducir la incertidumbre en la metodología para definir la precipitación en la zona de estudio.

Si bien la precipitación es un factor clave por la infiltración de agua, la litología y el uso del suelo desempeñan un papel igualmente importante en este proceso y en la delimitación de la presencia de agua subterránea.

Por lo que considerar la variable de geología, crucial para determinar la capacidad de un área en albergar un acuífero. Donde, las formaciones geológicas permeables, como las areniscas y las calizas, son más propensas a contener acuíferos debido a su capacidad para almacenar y transmitir agua. Por otro lado, las rocas impermeables, como las arcillas compactas, limitan entrada, salida y movimiento del agua subterránea.

Además, nuestros hallazgos son similares de los de Rahmati *et al.* (2014) y Macas-Espinoza & López-Escobar (2018) en cuanto a la importancia de la densidad de drenaje en la delimitación de zonas potenciales de aguas subterráneas. Mientras que Ramhati *et al.* (2014) enfatizaron la densidad de drenaje como un factor primordial, su peso relativo fue mayor debido a las altas pendientes presentes. Esto no solo influye en la recarga al acuífero, sino que también tiene un impacto significativo en la disponibilidad y distribución de las fuentes de agua subterránea.

También, nuestros resultados difieren de los de Selvam *et al.* (2015), Prasad *et al.* (2008) en cuanto al uso actual de suelo como factor determinante. Mientras que Prasad y colaboradores encontraron una fuerte correlación entre ciertos tipos de uso de suelo y la presencia de agua subterránea, nuestros hallazgos sugieren que el uso actual de suelo, si bien es importante, no es el único factor determinante y debe considerarse en conjunto con otras variables. De lo mencionado se considera:

4. 5. 1. Alcances y limitaciones:

En el presente estudio se logró delimitar las posibles zonas donde se puede prospectar aguas subterráneas para el área de estudio y de acuerdo con los diferentes estudios se identificó tres métodos (relación de frecuencias, proceso de jerarquía analítica y factor de certidumbre)

que fueron usados en estudios similares de los de Machiwal *et al.*, (2011), donde el método de relación de frecuencia es el más eficaz sin embargo no fue usado debido a la falta del inventariado de pozos por lo que el segundo método (Proceso de jerarquía analítica) se usó para integrar las siete variables clave: precipitación, densidad de drenaje, uso actual de suelos, litología, suelos, pendiente y NDVI. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones en la metodología debido a que depende en gran medida de la calidad y disponibilidad de datos de entrada como el uso actual de tierras a una escala menor, estudio de suelos y litología; respecto a la validación, aparte del presupuesto para realizar pruebas de prospección geofísica en el área de estudio; la falta de inventario de ojos de agua, bofedales, manantiales y pozos son los puntos más críticos para una validación precisa.

4. 5. 2. Mejoras en la metodología y variables adicionales:

En la sección 3.5 (Integración de mapas) se detalló las consideraciones que se tuvo en cuenta para asignar un valor de significancia comparando cada variable con valores propuestos por Toskano tomando en cuenta referencias bibliográficas (Macas-Espinoza & López-Escobar, 2018; Magesh *et al.*, 2012) junto con las observaciones realizadas en campo en función de la importancia percibida de cada variable en la absorción y escorrentía para precipitación, densidad de drenaje y pendiente. Por otro lado, para refinamiento, podría incorporarse modelos hidrológicos para cuantificar mejor la infiltración en la zona, así como modelos hidrogeológicos para integrar el tipo de rocas que presenta el área de estudio considerando la permeabilidad. Estos modelos, basados en principios físicos y datos climáticos, ofrecen una comprensión detallada de la recarga y descarga de las aguas subterráneas en las diferentes zonas del área de estudio. Integrar datos hidrológicos e hidrogeológicos permitiría ponderaciones más objetivas, aumentando precisión y confiabilidad.

Para futuras investigaciones, considerar variables como un mapa de isohipsa freática, isolíneas de conductividad hidráulica, podría proporcionar una visión más completa de la disponibilidad y movimiento de agua subterránea. Además, la inclusión del mapa de índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) Para resaltar el aspecto de masas de agua en la zona de estudio.

En la sección 4.3, se efectuó un estudio de sensibilidad con el propósito de analizar cómo afecta la modificación del valor de precipitación en la combinación de mapas. Los resultados enfatizaron un intervalo de importancia crucial, particularmente entre el 20% y 30%

(observado en la Figura 61 a Figura 63), donde se identificó un punto de equilibrio en la delimitación de las áreas con una alta posibilidad de exploración de fuentes de agua subterránea. Este hallazgo sugiere que el exceso de peso asignado a la precipitación, por encima del 30% (Figura 64 a Figura 68), tiende a generar una delimitación demasiado influenciada por este factor climático. Por lo que el rango de 20% a 30% se revela como el umbral óptimo para ajustar la influencia de la precipitación en la delimitación final. Mencionar que, dentro de este intervalo, se logra un equilibrio donde la precipitación sigue siendo un factor crucial, pero se le permite interactuar de manera más equitativa con otras variables como la densidad de drenaje, litología y uso de suelos.

En una etapa adicional de validación, se realizó una repetición del procedimiento de delimitación de áreas potenciales de aguas subterráneas, en esta ocasión prescindiendo del factor NDVI y empleando en su lugar el mapa de uso actual del suelo como alternativa. Al realizar este ajuste, se observa que el mapa delimitado sigue manteniendo un alto nivel de coherencia y congruencia con los resultados anteriores. La zona categorizada como "alta", que aumenta en la parte alta del distrito de La Libertad donde se encuentran las lagunas, se mantiene relativamente constante en su ubicación y extensión, como se ilustra en el Anexo 12. Esto sugiere que, aunque el NDVI aporta información valiosa sobre vegetación y humedad del suelo, su exclusión y la incorporación del mapa de uso actual de suelos no resultan en cambios significativos en la delimitación final.

Finalmente cabe mencionar que estos estudios previos se centraron en áreas específicas dentro la zona de estudio, lo que limita su aplicabilidad generalizada respecto a las ponderaciones asignadas a cada variable. El presente estudio amplía la comprensión de la delimitación de zonas de aguas subterráneas al considerar múltiples variables y su ponderación jerarquizada, lo cual brinda una perspectiva más completa en el contexto de nuestra área de estudio.

V. CONCLUSIONES

De la aplicación de la teledetección al ámbito geográfico de los distritos de La Libertad, Pampas Grande y Huanchay pertenecientes a la Cordillera Negra del Perú para localizar fuentes de agua subterránea se concluye lo siguiente:

- El distrito de La Libertad presenta la mayor probabilidad de encontrar agua subterránea, atribuida a las elevadas precipitaciones del área de estudio y la presencia de andesitas tobas e ignimbritas que favorecen la infiltración del agua. A pesar de tener altas pendientes en la parte media; sin embargo, es favorecida por la densidad de drenaje que presenta ("bueno a moderado") cerca de los cauces de los ríos y contribuye a la zonificación de áreas potenciales para almacenar aguas subterráneas.
- Huanchay se destaca como el segundo distrito con una alta probabilidad para la prospección de aguas subterráneas en las zonas altas. Esto se evidencia por la presencia de manantiales y lagunas, así como la predominancia de suelos arenoso-arcillosos. Además, la precipitación y densidad de drenaje significativas, clasificadas como "bueno a moderado", combinada junto con la geología de permeabilidad "moderada" y pendientes elevadas, influyen en la infiltración y velocidad del agua en el área de estudio.
- En el distrito de Pampas Grande, la viabilidad de la prospección de aguas subterráneas varía según las características geográficas. En las zonas bajas y medias, la presencia de suelos arcillosos-arenosos con litología de baja permeabilidad, combinada con precipitaciones bajas y vegetación escasa (matorrales y cardonales), limita la posibilidad de hallar agua subterránea, a pesar de contar con una pendiente y densidad de drenaje consideradas como "alto". No obstante, en la parte media-alta, donde las características son similares a las de Huanchay, se observa un aumento en la probabilidad de encontrar aguas subterráneas.
- Se logró determinar los pesos de las variables a través de la jerarquía analítica (Matriz de Saaty), en la delimitación de zonas propicias para la prospección de aguas

subterráneas en la zona de estudio. Donde la "precipitación", "geología", "densidad de drenaje" y "uso actual de suelos"; se identificaron como los factores más influyentes en la identificación de áreas críticas en términos de infiltración, escurrimiento, permeabilidad y capacidad de almacenamiento de agua subterránea. Otros factores como el tipo de "suelos", el "Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)" para indicar zonas con humedad en el suelo, y la "pendiente". De esta manera, la ecuación final quedó definida como: $25.92 * \text{precipitación} + 18.34 * \text{Geología} + 18.06 * \text{densidad de drenaje} + 3.22 * \text{pendiente} + 7.75 * \text{suelos} + 19.76 * \text{Uso actual de suelos} + 6.96 * \text{índice de vegetación de diferencia normalizada}$.

- Mediante el uso de la teledetección y la integración jerarquizada de mapas, se identificaron cinco categorías de probabilidad para la prospección de aguas subterráneas: "muy alto" con 0.1%, "alto" con 27.6%, se localizaron principalmente en distrito de La Libertad, partes Altas de Huanchay y Pampas Grande. Por otro lado, las categorías "medio" con 58.1%, "bajo" con 14.2% y "muy bajo" menor a 0.1% se encontraron en los distritos Huanchay y Pampas Grande en las zonas medias a bajas, siendo este último el distrito con área menos propicia para hallar aguas subterráneas.
- En la etapa de exploración en campo se verificó las zonas con alta probabilidad de encontrar aguas subterráneas mediante el método de self-potential (SP) en la exploración geofísica. Se evaluaron ocho puntos geoelectricos hasta 500 m de profundidad, de los cuales tres fueron considerados aptos para explorar agua subterránea. Donde en el primer punto (SP-1) el agua subterránea se localiza entre 75m y 230 m de profundidad, mientras que el segundo y tercer punto (SP-2, SP-3), el agua se encuentra entre 110 a 500 m de profundidad, favorecido por la presencia de una falla como conductora de agua y buenas condiciones de saturación. Por consiguiente, de los resultados de la exploración geofísica, afloramiento de agua subterránea y fuentes de derechos de uso de agua se validaron mediante el análisis de la curva ROC con el inventario de 55 puntos distribuido en el mapa jerarquizado, donde se obtuvo una eficiencia de 72.4% considerado como "considerablemente bueno" la delimitación de zonas potenciales para prospectar agua subterránea.

VI. RECOMENDACIONES

- Para garantizar la precisión de las categorías de probabilidad del mapa generado y prospectar aguas subterráneas, se recomienda realizar mediciones directas en campo como nivel freático del agua subterránea mediante el inventario de pozos y/o la prospección geofísica donde la validación con datos reales fortalecerá la confiabilidad de los resultados.
- Se sugiere la utilización de fotogrametría realizada mediante drones con el fin de lograr una delimitación más precisa y detallada de la cobertura vegetal y el uso del suelo. Este enfoque permitiría trabajar con resoluciones adecuadas para obtener información más completa y precisa en relación con estas variables.
- Respecto a la climatología es necesario tener más puntos de monitoreo de precipitación. De esta forma el mapa final puede ser mejorado si se tiene data de precipitación de los últimos años, así como inventariados de las lagunas, afloramientos de agua actualizados, por lo que la base de datos SNIRH -ANA, no cuenta con dicha información para el área de estudio realizado.
- Para estudios futuros se recomienda realizar análisis de sensibilidad para tener el umbral de cada variable, esto permite comprender el comportamiento de cada variable en el modelo.
- Se recomienda usar softwares de programación como RStudio y Python, para automatizar la generación de algunas variables como precipitación, densidad de drenaje, pendiente, NDVI, el cual nos agiliza el procesamiento de información. Asimismo, poder compartir dichos códigos a la comunidad estudiantil y otros.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137 – 145. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00255-2)
- Aquabook. (s.f.). Clasificación de los acuíferos. Recuperado de https://aquabook.irrigacion.gov.ar/407_0
- Autoridad Nacional del Agua. (2019). Ley de los Recursos Hídricos - Ley N° 29338. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/228>
- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Grabmaier, K., Hecker, C., Horn, J., Huurneman, G., Jansen, L., & Kerle, N. (2001). Principles of Remote Sensing. Recuperado de https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesremotesensing.pdf
- Camino, M. A.; Bó, M. J.; Cionchi, J. L.; López de Armentia, A.; Del Río, J. L. & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria De Geografía*, 27(1): 73–97. Recuperado a partir de <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4096>
- Carbajal, H., & Onofre, F. (2020). Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja. *Polo Del Conocimiento*, 5(1), 228–245. doi: <https://doi.org/10.23857/pc.v5i1.1893>
- Castaño, S.; Gómez-Alday, J. J. & Sanz, D. (2008). Teledetección y SIG en la gestión de aguas subterráneas. Madrid, España: Centro Superior de Investigaciones Científicas.

- Cesel ingenieros. (s.f.). Uso Actual de la Tierra. En Plan de manejo ambiental (PMA) del proyecto instalación central térmica Quillabamba y sistema de transmisión asociado Santa Ana, La Convención, Cusco (p. 1 – 13).
- Chuvienco, E. (2010). Fundamentos de la Teledetección Espacial (2° ed.). Recuperado de <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Cisneros Iturbe, H. L., Bouvier, C., & Domínguez Mora, R. (2015). Aplicación del método kriging en la construcción de campos de tormenta en la ciudad de México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 16(3): 5-14. Recuperado de <https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/865>
- Dugarte, M.; Ferrer, C. & Delgadillo A. (2015). Respuesta hidromorfológica de una cuenca altamente asimétrica. La tormenta del 11 de febrero del 2005 y su impacto en el río Mocotíes. Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(1): 11 – 40. Recuperado de <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/regeoven/article/view/11487>
- Environmental Systems Research Institute. (2021a). Kriging (3D Analyst)—ArcGIS Pro- Documentación. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/kriging.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2021b). Superposición ponderada. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-overlay.htm>
- European Space Agency. (2021). The Sentinel missions. European Space Agency. Recuperado de https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions
- European Space Agency. (2022). Copernicus Browser, Sentinel Playground. Recuperado de https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/?source=S2L2A&lat=-9.375360544675015&lng=-77.89045716170222&zoom=10&preset=1_TRUE_COLOR&layers=B01,B02,B03&

maxcc=20&gain=1.0&gamma=1.0&time=2021-11-01%7C2022-05-03&atmFilter=&showDates=false

Fawcet, T. (2006). Introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* 27(8):861 – 874. doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010

Felicísimo, A. M. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Recuperado de <https://www6.uniovi.es/usr/feli/pdf/libromdt.pdf>

Fonseca, S. E.; Flores, L. S.; Quispe, P. & Guitérrez, R. (2019). Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica chillón. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4628>

Food and Agriculture Organization. (1980a). Mapa Mundial de Suelos de FAO/UNESCO Portal de Suelos de la FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>

Food and Agriculture Organization. (1980b). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Eds.; Organización). Recuperado de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30905/Cartografica_Desertizacion_SP.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Fuentes Junco, J. J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/analisis-morfometrico-de-cuencas-caso-de-estudio-del-parque-nacional-pico-de-tancitaro/>

Fuentes Yagüe, J. L. (1993). Aguas subterráneas. España: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.

GeoSpatial. (2013). ALOS PALSAR. Recuperado de <https://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>

Gestión Hidrología Medioambiente. (2014). Cómo hacer un modelo de elevación digital en ArcGIS: Parte 1, descarga de información. Recuperado de <https://www.ghmconsultores.es/es/2014/07/modelo-de-elevacion-en-arctgis-parte-1/>

Google earth. (s.f.). Google earth. Recuperado de <https://earth.google.com/web>

- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1): 350 – 361. Ddoi: <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3): 275 – 370. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Hunan Puqi Geologic Exploration Equipment Institute. (2017). The Principle and Research of Natural Electric Geophysical Prospecting Instrument (Underground water detector). En *Water Detector Case Share* (p. 4). <http://www.pqwts.com/prodList.aspx?all=1&snt=210>
- Hydrologic Engineering Center. (1971). HEC-4 Monthly Streamflow Simulation User's Manual. Recuperado de [https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-4_UsersManual_\(CPD-4\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-4_UsersManual_(CPD-4).pdf)
- Ingeoexpert. (s.f.). Clasificaciones de imágenes de satélite. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/>
- Instituto Geofísico Nacional. (s.f.). Plan Nacional de Teledetección. Recuperado de <https://pnt.ign.es/que-es-pnt>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). Ancash, resultados definitivos. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1552/02TOMO_01.pdf
- International Geographical Union. (s.f.). World Land Use Survey. Recuperado de <https://gh.copernicus.org/articles/31/1/1976/gh-31-1-1976.pdf>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (1996). Repositorio Institucional INGEMMET: Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. Hojas: 20-h, 20-i, 20-j, 21-i, 21-j – [Boletín A 76]. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/199>

- International Groundwater Resources Assessment Centre. (2021). ¿Qué es el agua subterránea?. Recuperado de <https://www.un-igrac.org/es/es/que-es-agua-subterranea>
- International Soil Reference and Information Centre. (2024). World soil distribution. Recuperado de <https://www.isric.org/explore/world-soil-distribution> y <https://www.britannica.com/science/lithosol>
- Kumar, A., & Krishna, A. P. (2016). Assessment of groundwater potential zones in coal mining impacted hard-rock terrain of India by integrating geospatial and analytic hierarchy process (AHP) approach. *Geocarto International*, 33(2): 105–129. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1232314>
- Lezama, J. L.; López-Acosta, N. P. & Auvinet, G. (2012). Modelación de acuíferos semiconfinados y su aplicación a la evaluación del hundimiento inducido por bombeo de agua en la Ciudad de México. En Padilla, R. R. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica: Acapulco, México.
- Liang, S., Cheng, J., Zhang, J., Liang, S., Cheng, J., & Zhang, J. (2020). Maximum likelihood classification of soil remote sensing image based on deep learning. *Earth Sciences Research Journal*, 24(3): 357–365. doi: <https://doi.org/10.15446/ESRJ.V24N3.89750>
- Lobo Reyes, V. E. (2017). Estudio hidrológico e hidráulico para la identificación de la vulnerabilidad a desbordes de la cuenca baja del río Coata-Puno, Lima, Perú (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3366>.
- Longwood, U. (s.f.). La Importancia del Agua Subterránea. Recuperado de <http://www.longwood.edu/cleanva/images/Sec4.groundwaterchapter.pdf>
- López-Geta, J. A.; María, J.; Azcoiti, F.; Ramos, G.; Fermín, G. & Gil, V. (2009). Las aguas subterráneas Un recurso natural del subsuelo. Recuperado de http://observatoriaigua.uib.es/repositori/asoc_aguas_botin.pdf
- Macas-Espinosa, V. X. & López-Escobar, K. F. (2018). Potential areas for groundwater exploration in the Puyango Catamayo Hydrographic Demarcation, Ecuador, using a

analytic hierarchy process based on GIS and remote sensing. *Revista de Teledeteccion*, 51: 135–145. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>

Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. *Water Resources Management*, 25(5): 1359–1386. doi: <https://doi.org/10.1007/S11269-010-9749-Y>

Magesh, N. S.; Chandrasekar, N. & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 189–196. doi: <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2011.10.007>

Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S. B., Dhar, A., Panda, S. N., Kar, A., & Mishra, P. K. (2016). Delineation of Groundwater Potential Zones of Coastal Groundwater Basin Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Water Resources Management*, 30(12): 4293–4310. doi: <https://doi.org/10.1007/S11269-016-1421-8>

Markhan, B., Barsi, J., Kvaran, G., Ong, L., Kaita, E., Biggar, S., Czaplá-Myers, J., Mishra, N. & Helder, D. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability. *Remote sensing*, 6(12): 12275 – 12308. doi: 10.3390/rs61212275

Mejía Marcacuzco, J. A. (2012). *Hidrología aplicada*. La Molina, Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Monsalve Sáenz, G. (2009). *Hidrología en la Ingeniería* (2da. Ed.). Recuperado de <https://www.libreriaingeniero.com/2020/10/hidrologia-en-la-ingenieria-german-monsalve-saenz-2da-edicion.html>

Montgomery, D. R. & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153 – 1171. Recuperado de <http://duff.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/tmpmisc/Mont-Dietrich-1994.pdf>

- Muller – Wilm, U. (2016). Sentinel-2 MSI – Level-2A Prototype Processor Installation and User Manual. Recuperado de <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/S2PAD-VEGA-SUM-0001-2.2.pdf>
- Musa, K. A., Akhir, J. M., & Abdullah Ibrahim. (2017). Groundwater Prediction Potential Zone in Langat Basin using the Integration of Remote Sensing and GIS. Recpuerdo de <https://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS2000/Papers/PS300-18.htm>
- Naudet, B. & Binley, A. (2005). A review of the self-potential method applied to groundwater investigation. doi: <https://doi.org/10.4122/1.1000000553>
- Olivo Candelario, A. A. (2017). Clasificación de la vegetación del karst de Sierra de las Nieves utilizando imágenes Landsat (Trabajo fin de máster, Universidad politécnica de Madrid). Recuperado de https://oa.upm.es/48286/1/TFM_Angelica_Antonia_Olivo_Candelario.pdf.
- Ordoñez, J. J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Sociedad Geografica de Lima. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf
- PQWT. (s.f.). Pozo de agua subterránea del detector del agua de los 500M Industrial Fresh Result que perfora PQWT S500. Recuperado de <https://spanish.pqwt-detector.com/sale-26704525-500m-industrial-fresh-result-water-detector-underground-water-well-drilling-pqwt-s500.html>
- Prasad, R. K.; Mondal, N. C.; Banerjee, P.; Nandakumar, M. V. & Singh, V. S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55: 467–475. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>
- Rahmati, O.; Nazari Samani A.; Mahdavi, M.; Reza Pourghasemi, H. & Zeinivand H. (2014). Groundwater potential mapping at Kurdistan región of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9): 7059–7071. doi:10.1007/s12517-014-1668-4
- Rahmati, O.; Nazari Samani, A.; Mahdavi, M.; Pourghasemi, H. R. & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy

process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9): 7059–7071. doi: <https://doi.org/10.1007/S12517-014-1668-4>

Rosenqvist, A., Shimada, M., & Watanabe, M. (2004). ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. En 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications. Austria: Innsbruck.

Saaty, T. L. & Vargas, L. G. (1980). Hierarchical analysis of behavior in competition: Prediction in chess. *Behavioral Science*, 25(3), 180–191. doi: <https://doi.org/10.1002/BS.3830250303>

Sánchez, F. (2019). Hidrología, 2018-19. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10366/83384>

Sánchez San Román, J. F. (2019). Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Recuperado de <http://hidrologia.usal.xn--espg-7na.1>

Sanders, L. L. (1998). A manual of field hydrogeology. Michigan, Estados Unidos de América: Prentice Hall.

Selvam, S., Dar, F. A., Magesh, N. S., Singaraja, C., Venkatramanan, S., & Chung, S. Y. (2015). Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti Municipality, Tamil Nadu using IF technique. *Earth Science Informatic*, 9: 137–150. doi: <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0242-2>

Sener, E., Davraz, A., & Ozcelik, M. (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 13(5–6): 826–834. doi: <https://doi.org/10.1007/S10040-004-0378-5>.

Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado 3.0. (s.f.). SEACE 3.0 - Buscador Público - 2022. Recuperado de <http://procesos.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/buscadorPublico/buscadorPublico.xhtml>

Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. (s.f.). Visor por cuencas. Recuperado de <https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (s.f.). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

- Siebert, S.; Burke, J.; Faures, J. M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Döll, P. & Portmann, F. T. (2010). Hydrology and Earth System Sciences Groundwater use for irrigation-a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1863–1880. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Taoufikallah, A. (2018). Capítulo 4 El método AHP. En M. Pérez (Ed.), *Métodos de análisis multicriterio aplicados a la toma de decisiones* (p. 87 - 102). Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70496/fichero/Capitulo+4+El+m%C3%A9todo+AHP.pdf>.
- Toskano Hurtado, G. B. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la selección del proveedores: Aplicación en la selección del proveedor para la empresa gráfica comercial MYE S.R.L. Recuperado de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/contenido.htm.
- University of Alaska Fairbanks. (2014). ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction – ASF. Recuperado de https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/#DEM_Information
- University of Alaska Fairbanks. (2024). Data Search Vertex. Recuperado de <https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=7.792¢er=-76.469,-10.354>
- Victor, I.; Burgos, H.; Ana, L. & Salcedo, P. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. Recuperado de <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf>
- Villón Bejar, M. (2004). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-JjGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=precipitacion+definicion&ots=IiFDrVo8_1&sig=1w58sBohWPnegvB-_7EL-oswelw#v=onepage&q&f=false

VIII. ANEXOS

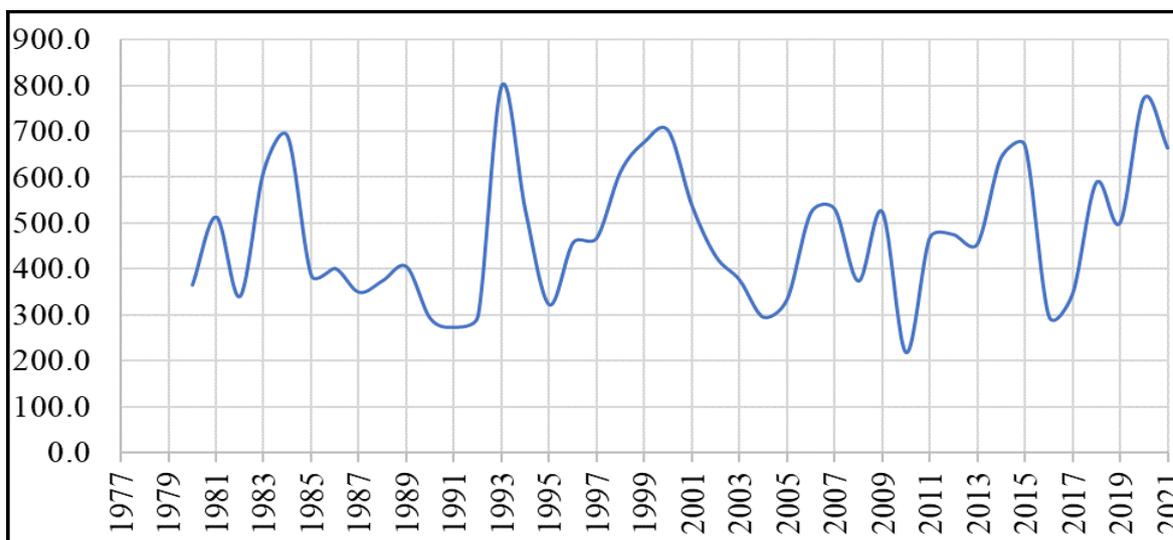
Anexo 1: Registro de precipitación mensual – estación Cajamarquilla (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1980	60.6	26.1	78.0	14.2	2.8	0.0	0.0	4.2	0.0	90.2	52.6	37.4	366.1
1981	119.9	160.9	108.1	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.7	28.1	58.1	514.2
1982	47.3	59.9	48.0	46.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.0	75.0	0.0	341.7
1983	120.9	79.1	180.5	62.8	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	14.0	27.0	120.2	615.1
1984	93.8	223.2	195.0	39.8	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	56.2	0.0	44.8	689.6
1985	28.1	148.0	35.6	44.3	0.0	0.0	0.0	3.5	43.7	0.0	13.6	70.2	387.0
1986	79.7	89.8	72.0	12.4	0.0	0.0	6.7	15.3	17.5	17.8	0.0	91.1	402.3
1987	77.6	63.5	51.2	40.4	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.6	76.0	350.5
1988	67.3	49.2	66.0	52.0	13.6	0.0	0.0	0.0	7.4	39.4	39.9	40.7	375.6
1989	73.7	158.5	82.1	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	25.0	57.6	5.1	0.0	406.1
1990	35.3	21.7	65.6	0.0	10.8	1.1	0.0	0.0	5.3	58.5	62.0	33.2	293.3
1991	30.9	26.4	66.2	35.6	4.8	0.0	0.0	0.0	1.0	59.6	29.7	20.5	274.6
1992	30.1	131.8	91.0	44.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	297.6
1993	0.0	226.9	240.1	49.6	23.9	0.0	0.0	0.0	6.3	32.3	88.5	132.0	799.6
1994	100.3	137.7	110.1	72.6	21.3	0.0	0.0	0.0	24.3	6.9	27.6	27.3	528.2
1995	59.9	47.1	39.1	49.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	29.6	38.7	57.4	323.5
1996	109.7	111.7	107.7	59.2	2.7	0.0	0.0	0.0	5.1	34.5	6.7	20.8	458.0
1997	70.4	106.3	20.6	53.3	2.2	0.0	0.0	0.0	8.3	31.2	68.5	108.1	468.7
1998	115.5	159.0	180.9	73.8	16.3	0.0	0.0	0.0	3.9	13.0	12.5	37.6	612.7
1999	100.2	65.9	94.8	106.0	38.1	0.0	0.0	0.0	20.4	59.0	60.8	132.3	677.4
2000	106.8	203.3	132.4	50.7	37.4	0.0	0.0	0.0	18.4	21.7	13.4	118.1	702.1
2001	143.2	70.6	165.9	38.0	3.2	1.1	0.3	0.3	12.9	20.8	65.8	17.1	539.2
2002	17.4	75.3	94.1	70.1	1.8	0.3	0.3	0.3	5.1	54.1	74.8	35.0	428.6
2003	77.3	46.6	49.9	22.6	5.3	0.3	0.3	0.3	0.3	10.9	3.8	159.6	377.2
2004	8.8	40.4	97.7	24.8	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	23.9	42.8	56.6	296.4
2005	55.3	19.1	131.8	61.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	65.2	334.9
2006	114.0	91.9	65.9	72.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	24.6	152.9	523.6
2007	123.8	0.8	215.8	91.4	24.8	0.3	0.3	0.3	0.3	40.5	33.2	0.3	531.7
2008	62.3	83.8	80.0	49.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	5.3	78.4	13.8	374.9
2009	56.9	142.3	178.5	36.9	0.3	0.3	1.1	0.7	0.3	88.4	4.5	15.3	525.4
2010	45.3	83.8	68.4	13.8	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	4.5	1.4	219.4
2011	72.3	69.2	58.4	85.4	18.4	0.3	0.3	0.3	1.4	0.3	28.4	134.6	469.2
2012	59.9	72.3	107.7	62.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1.1	9.1	80.7	81.5	475.7
2013	90.0	77.7	73.8	66.1	0.3	0.3	0.3	0.3	4.5	109.4	16.1	16.8	455.6
2014	50.7	172.3	161.3	61.5	0.3	0.3	0.3	0.3	20.4	32.9	80.3	63.5	643.9
2015	105.3	80.1	126.5	50.7	0.6	0.3	0.3	0.3	27.2	81.8	82.4	114.1	669.6

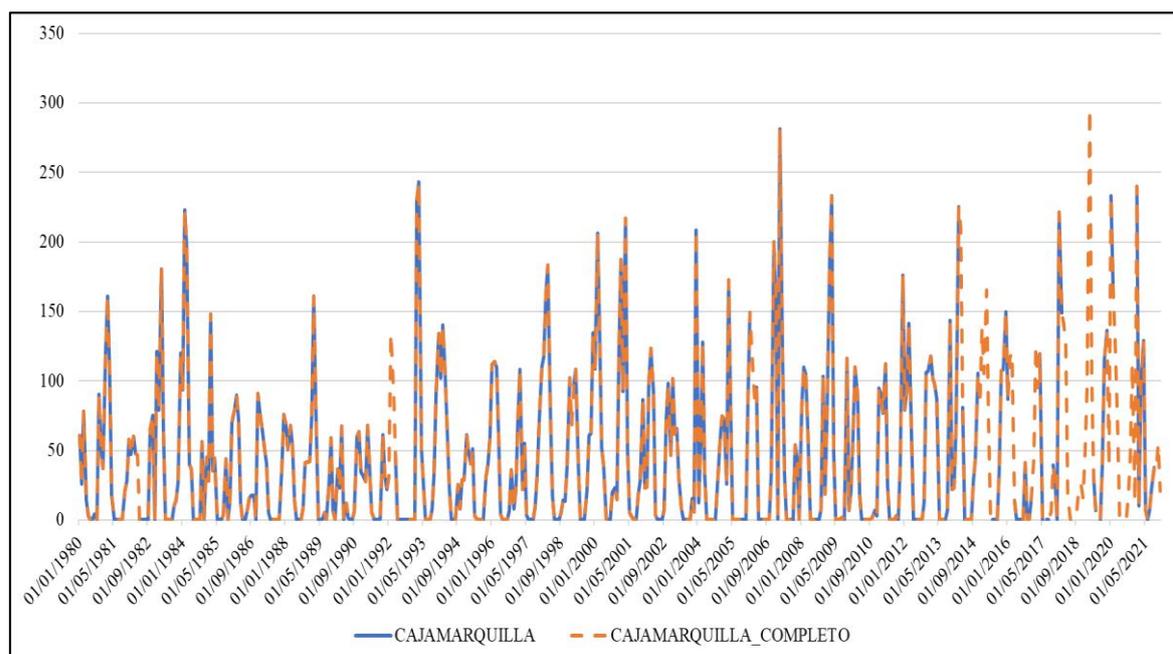
Continuación...

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2016	66.3	88.9	92.1	9.8	0.3	0.3	0.3	0.3	30.9	0.3	0.3	9.9	299.5
2017	33.0	95.8	72.5	90.9	0.3	0.3	0.3	0.3	3.6	29.5	20.2	0.3	346.8
2018	178.3	129.8	89.3	49.6	0.9	0.3	0.3	0.3	11.8	33.3	85.4	9.7	589.0
2019	183.9	7.0	75.8	98.2	4.7	0.3	4.7	16.5	28.1	26.5	41.1	15.4	502.1
2020	232.8	169.8	117.2	65.5	0.8	0.0	0.0	0.0	16.4	44.4	112.0	13.8	772.6
2021	240.0	10.2	99.6	128.7	7.2	0.0	7.2	22.6	37.6	35.5	54.5	21.1	664.2
PROM	84.39	93.42	102.07	51.82	6.87	0.18	0.68	1.61	9.53	32.27	38.59	52.94	474.37

Histograma de precipitación anual histórica – Estación Cajamarquilla



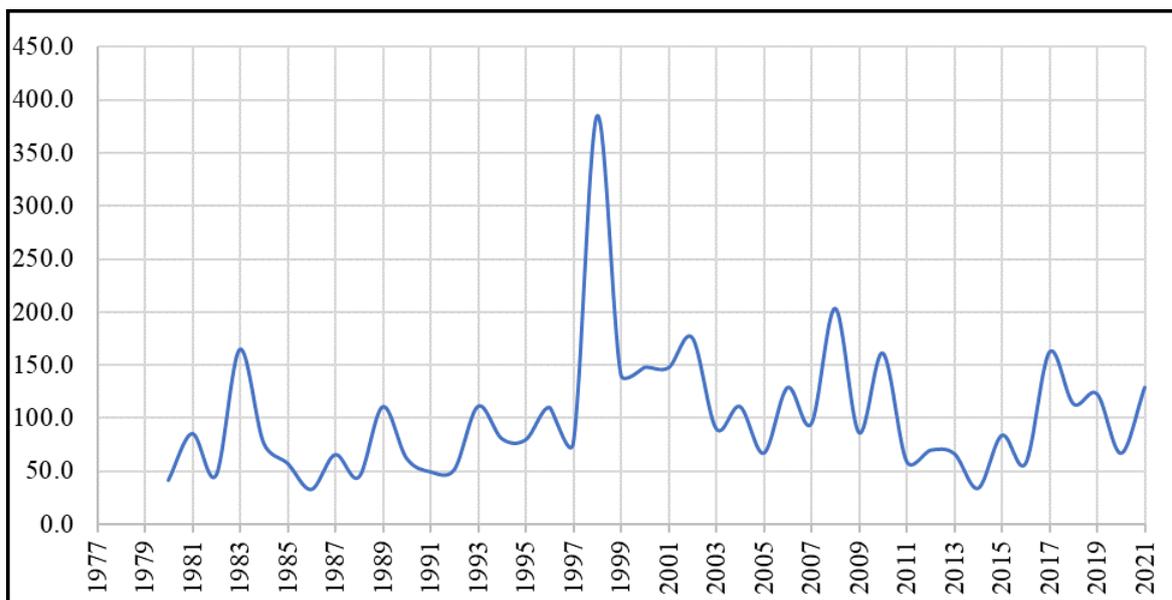
Histograma de precipitación mensual extendida – Estación Cajamarquilla



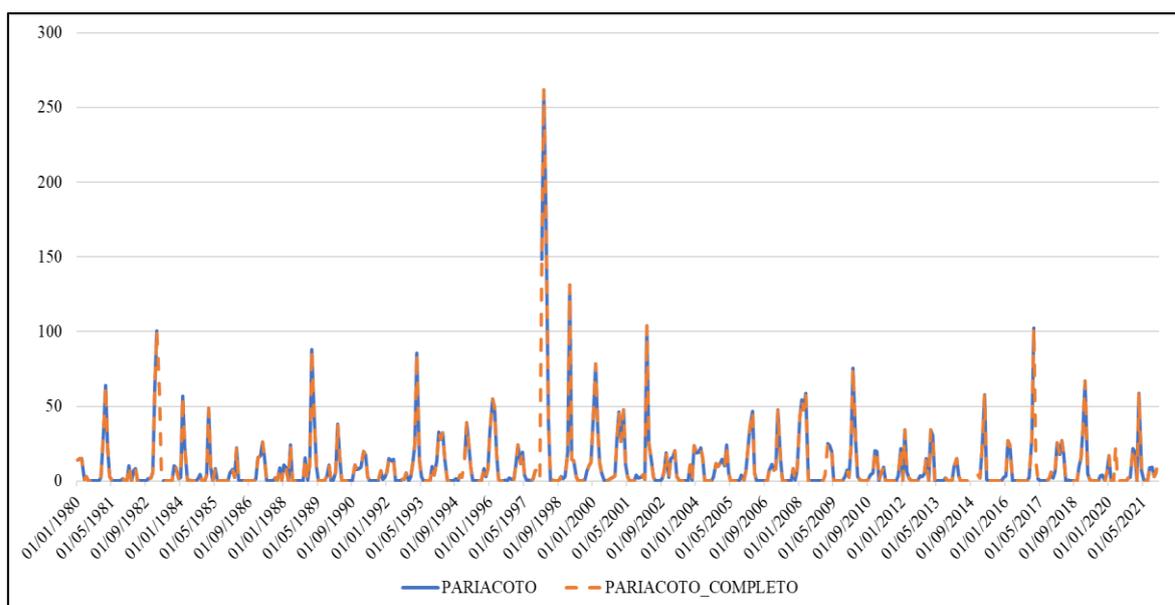
Anexo 2: Registro de precipitación mensual – Estación Pariacoto (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1980	10.0	10.6	10.6	2.8	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	41.6
1981	21.3	38.0	14.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	2.2	2.2	85.5
1982	8.0	2.2	6.0	6.8	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	3.0	3.4	5.7	46.2
1983	37.4	58.5	35.9	3.9	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	8.0	7.1	3.2	165.0
1984	3.8	34.0	14.9	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	3.0	4.8	2.2	2.2	76.5
1985	4.4	29.4	7.3	2.2	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	5.2	57.7
1986	6.7	3.7	14.8	2.5	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	32.9
1987	11.0	11.7	16.8	10.8	2.5	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	7.1	2.5	65.7
1988	8.2	7.3	0.0	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	2.5	44.6
1989	8.7	51.6	30.7	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	8.1	0.0	0.0	110.9
1990	5.5	23.6	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	6.5	6.9	62.4
1991	7.5	13.5	12.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	2.9	3.7	49.5
1992	5.6	10.7	9.9	10.4	0.0	0.0	0.0	2.8	2.9	5.2	0.0	3.8	51.4
1993	9.2	16.0	50.1	10.2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	4.5	9.5	111.2
1994	20.6	17.8	20.2	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	4.4	3.8	80.8
1995	10.8	24.2	16.4	7.8	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	4.0	7.0	79.8
1996	21.3	32.8	29.7	12.2	2.8	0.0	0.0	2.5	0.0	3.4	2.9	2.8	110.3
1997	8.5	15.8	8.6	13.1	4.6	2.5	2.5	2.2	3.1	6.1	6.5	3.1	76.6
1998	85.2	148.9	107.2	24.9	2.6	2.7	0.0	0.0	2.7	3.9	3.1	3.9	385.1
1999	13.4	75.6	10.4	9.8	3.5	0.0	0.0	2.4	3.0	6.0	7.9	9.4	141.4
2000	24.3	46.0	22.8	12.3	5.3	0.0	0.0	0.5	1.8	2.7	3.8	28.6	148.1
2001	46.2	26.8	47.7	11.2	2.9	0.0	0.0	0.0	3.9	2.3	2.6	4.1	147.7
2002	1.3	104.0	25.6	13.3	2.5	0.0	0.0	0.0	1.7	6.4	18.7	2.4	175.9
2003	15.1	16.2	20.4	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	10.7	0.8	23.6	90.3
2004	19.0	19.2	22.3	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	11.6	9.6	11.6	111.1
2005	14.8	10.4	24.2	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	4.2	0.7	7.0	67.1
2006	22.0	36.3	46.6	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	11.3	129.0
2007	7.3	8.3	47.6	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	0.8	7.3	95.0
2008	42.6	54.5	47.8	58.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	203.6
2009	4.2	25.0	23.8	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	7.6	2.5	86.5
2010	23.0	75.4	27.2	3.3	1.0	0.0	0.0	0.0	1.3	4.0	5.7	20.5	161.4
2011	19.7	0.0	5.0	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	21.9	59.4
2012	0.5	34.4	6.6	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	3.2	4.6	15.2	69.9
2013	0.0	34.1	30.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	66.6
2014	9.6	14.9	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	4.1	34.0
2015	2.0	20.5	57.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	84.0
2016	3.6	27.2	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	57.5
2017	28.4	102.5	13.8	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	6.0	2.0	6.4	162.5
2018	25.6	17.9	27.1	17.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	15.4	113.7
2019	36.1	67.0	4.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	4.1	0.0	6.1	122.9
2020	17.1	0.0	0.0	23.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	2.7	21.6	67.0
2021	19.4	0.0	58.9	6.8	1.1	0.0	0.0	9.0	9.5	2.9	6.1	15.5	129.2
PROM	16.4	32.5	24.2	9.2	1.3	0.3	0.2	0.6	1.5	3.6	3.9	7.5	101.4

Histograma de precipitación anual – Estación Pariacoto



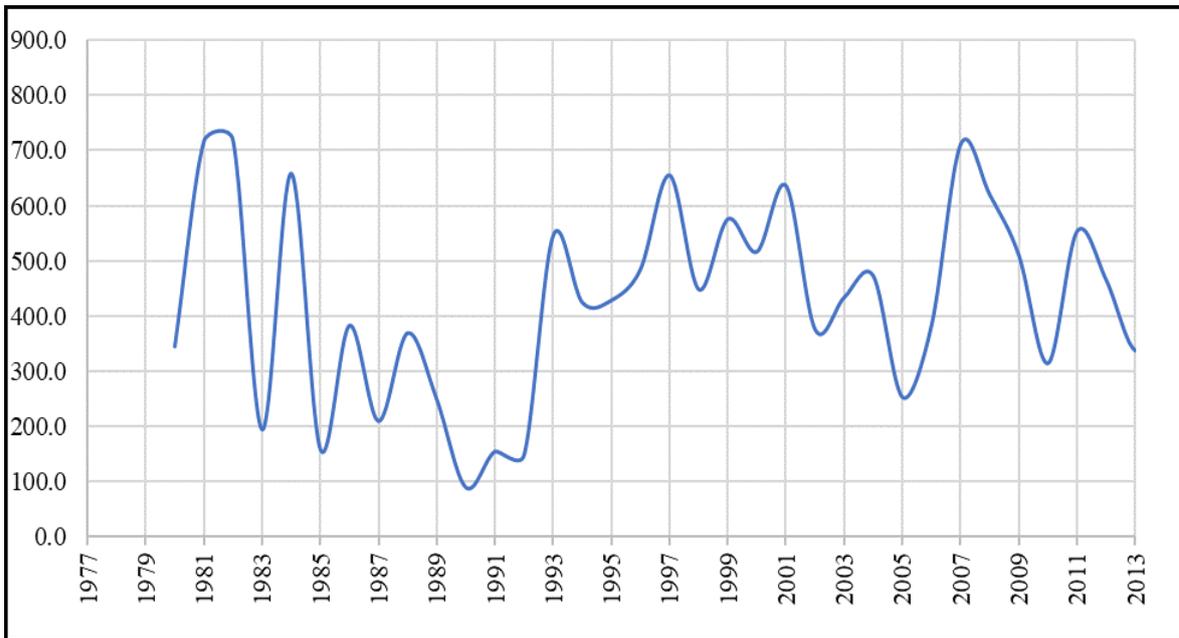
Histograma de precipitación mensual extendida – Estación Pariacoto



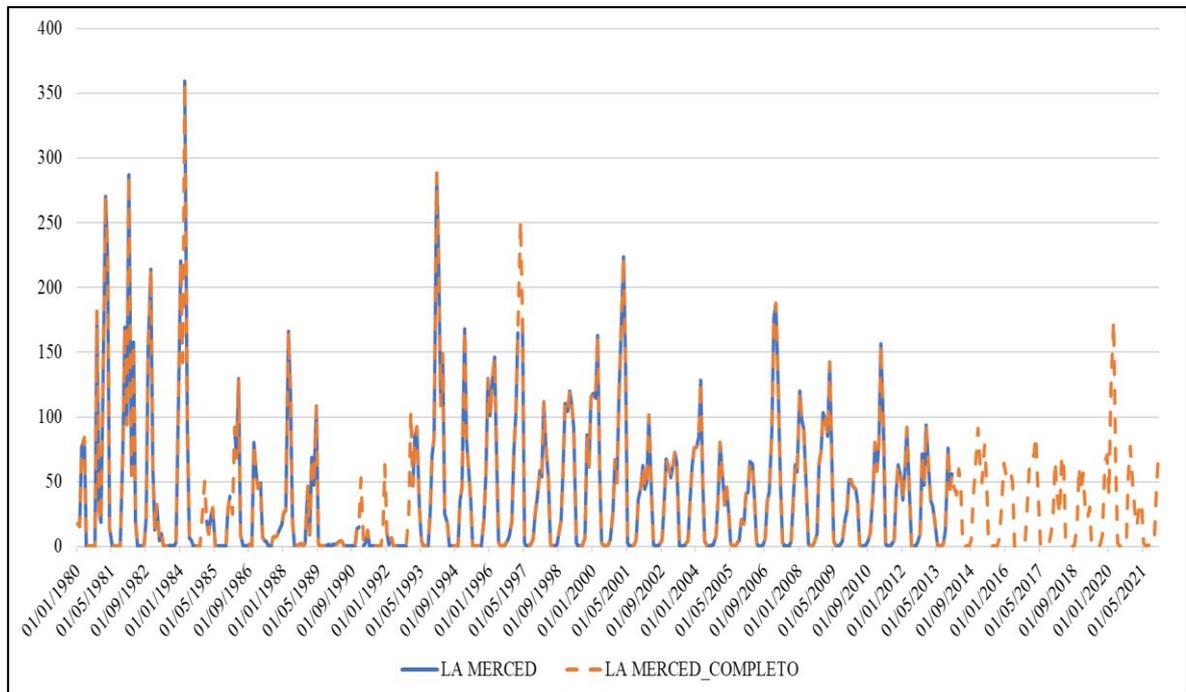
Anexo 3: Registro de precipitación mensual – Estación La Merced (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1980	21.9	20.4	59.7	64.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	126.8	28.4	22.8	344.4
1981	110.2	183.4	153.8	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.4	118.9	71.1	716.0
1982	194.2	45.9	111.3	23.4	0.0	0.0	0.0	11.6	24.8	108.9	147.6	50.2	718.0
1983	18.9	31.3	13.6	16.7	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	12.8	89.9	194.3
1984	151.4	101.4	240.4	69.1	14.7	13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	24.4	42.5	657.6
1985	22.9	16.7	25.0	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.2	35.3	158.7
1986	26.9	69.3	54.7	93.3	16.0	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	61.9	48.7	382.4
1987	39.4	41.7	15.2	13.4	12.7	0.0	0.0	15.3	15.1	16.0	19.5	21.4	209.7
1988	27.4	28.3	116.9	86.0	23.7	0.0	0.0	11.4	11.9	11.2	12.0	40.1	368.9
1989	16.4	54.7	41.0	79.8	11.9	0.0	0.0	10.9	11.2	11.5	0.0	11.4	248.6
1990	11.4	12.5	13.2	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	20.1	89.5
1991	44.4	11.2	12.5	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.2	50.7	154.7
1992	17.2	11.7	14.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	77.5	148.3
1993	40.5	64.8	69.8	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	26.5	55.2	64.3	194.8	545.2
1994	149.4	80.1	105.8	26.7	22.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.7	424.1
1995	118.0	62.4	48.6	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.4	47.2	93.5	428.0
1996	75.3	94.3	104.0	55.8	12.6	10.7	10.6	11.4	13.4	15.5	22.8	57.8	484.3
1997	76.4	116.1	171.6	121.2	12.3	10.7	10.7	11.8	14.4	27.2	34.2	48.1	654.6
1998	45.1	82.0	60.7	43.7	12.1	10.7	10.7	11.4	17.8	23.3	49.3	81.3	447.9
1999	77.5	87.3	80.8	69.3	12.4	10.7	10.6	11.1	15.0	65.7	50.2	84.6	575.1
2000	86.2	83.9	114.9	48.9	12.2	10.7	10.7	11.6	13.8	27.3	53.4	42.4	516.0
2001	84.0	113.8	153.6	100.6	12.4	10.7	10.6	11.4	14.0	33.7	40.0	50.5	635.2
2002	39.2	42.8	75.5	36.1	11.5	0.1	0.3	2.2	5.3	33.6	67.3	61.2	375.1
2003	53.4	61.8	72.5	65.1	1.2	0.1	0.2	1.3	4.5	35.8	61.5	76.0	433.4
2004	77.3	85.0	128.3	49.9	3.9	0.1	0.2	1.0	1.6	7.7	36.4	80.5	471.9
2005	60.0	32.3	45.5	26.8	1.9	0.1	0.4	2.6	4.5	21.0	17.4	40.3	252.8
2006	41.8	65.8	63.7	35.2	2.8	0.0	0.1	1.3	6.0	34.6	42.0	89.6	382.9
2007	176.1	187.7	133.9	48.6	3.6	0.3	0.1	0.4	4.1	35.1	62.9	57.8	710.6
2008	119.8	98.0	90.3	53.9	2.0	0.1	0.2	3.8	9.9	64.4	73.3	103.3	619.0
2009	98.7	85.5	142.1	72.4	4.4	0.2	0.1	1.8	4.1	20.6	28.1	51.5	509.5
2010	51.2	46.2	44.7	34.0	1.7	0.1	0.4	1.7	4.7	10.4	39.0	80.2	314.3
2011	58.8	79.4	156.6	87.3	2.5	0.1	0.2	2.4	5.6	43.4	63.1	53.6	553.0
2012	36.2	57.5	91.5	53.3	1.1	0.1	0.1	2.9	9.7	71.3	47.7	93.5	464.9
2013	58.4	35.5	30.7	19.3	1.6	0.2	0.2	2.3	12.8	76.0	44.3	55.9	337.2
2014	45.5	40.2	59.7	49.0	0.2	0.0	0.0	1.0	5.6	39.1	67.8	90.9	399.1
2015	65.8	49.4	78.1	49.5	0.9	0.0	0.0	0.0	1.1	6.3	27.1	64.0	342.1
2016	56.0	57.6	60.3	49.4	0.5	0.0	0.0	0.2	1.7	5.1	30.6	59.0	320.4
2017	70.5	69.9	85.2	46.9	0.6	0.0	0.0	1.1	2.1	10.4	23.7	66.1	376.3
2018	39.3	25.2	70.0	62.5	1.3	0.0	0.0	0.1	1.2	15.2	61.7	42.0	318.4
2019	56.4	32.4	21.9	30.1	0.5	0.0	0.0	0.1	1.5	8.6	65.4	70.4	287.2
2020	39.0	123.6	174.5	65.3	2.7	0.0	0.0	0.1	0.6	54.0	77.1	45.0	582.0
2021	26.9	15.4	28.9	34.1	2.8	0.0	0.0	1.4	0.9	3.2	39.2	68.2	220.8
PROM	64.9	64.4	81.8	48.2	5.3	1.9	1.6	3.7	6.6	28.6	44.2	62.5	413.6

Histograma de precipitación anual – Estación La Merced



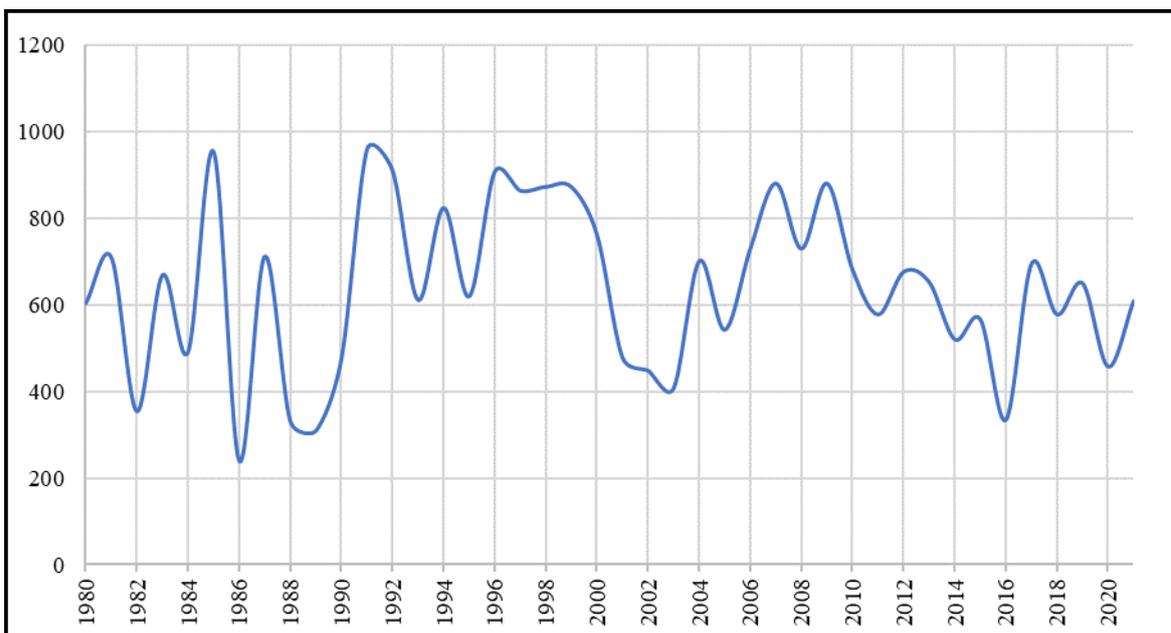
Histograma de precipitación mensual extendida – Estación La Merced



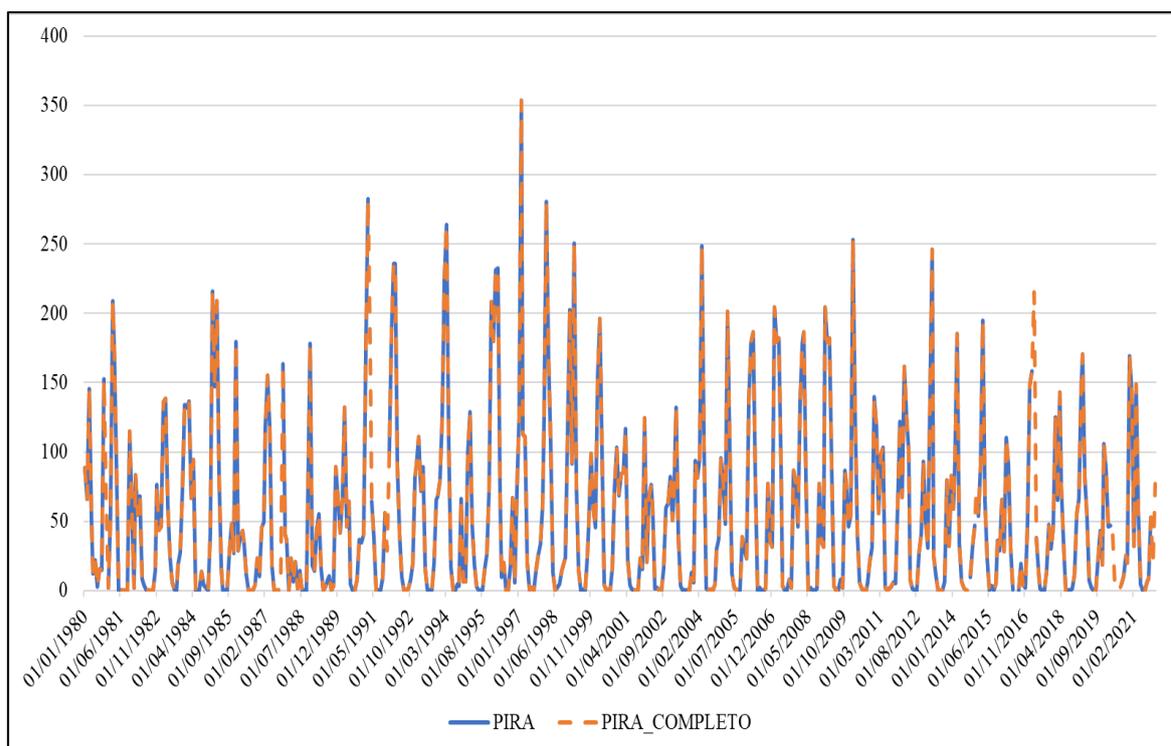
Anexo 4: Registro de precipitación mensual – Estación Pira(mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1980	88.6	66.3	145.7	52.3	12.4	22.0	2.7	15.5	15.3	152.5	67.0	2.5	642.8
1981	55.1	208.8	176.1	90.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	61.0	2.0	708.9
1982	83.7	54.6	68.4	8.9	3.6	0.0	0.0	0.3	0.0	14.9	76.7	44.0	355.1
1983	46.4	135.7	138.7	62.1	24.4	6.0	1.0	0.0	19.0	28.0	73.0	134.0	668.3
1984	132.3	136.5	66.7	94.5	0.0	0.0	0.0	13.5	4.2	2.5	0.0	41.1	491.3
1985	215.8	147.2	208.5	82.1	16.5	0.0	0.0	0.0	27.6	48.4	27.1	179.2	952.4
1986	29.3	39.4	43.4	34.2	11.5	0.0	0.0	0.0	3.9	23.0	10.6	46.0	241.3
1987	49.8	117.8	154.9	117.9	18.1	0.0	0.0	0.0	8.3	163.5	40.6	36.6	707.5
1988	0.0	23.3	7.0	20.9	1.7	14.6	0.0	0.0	0.0	67.9	178.2	18.5	332.1
1989	14.5	44.4	55.0	15.6	0.0	2.9	8.0	10.4	0.0	3.5	89.0	66.2	309.5
1990	41.9	66.3	131.8	46.3	64.2	5.0	0.0	0.0	7.9	36.9	34.6	40.4	475.3
1991	172.9	282.4	171.8	64.2	38.0	0.0	0.0	0.0	9.5	55.7	29.0	99.4	922.9
1992	186.7	235.4	235.4	90.0	40.9	10.0	0.0	0.0	1.7	7.7	19.7	81.7	909.2
1993	91.2	110.7	71.7	89.4	15.9	0.0	0.0	0.0	20.0	65.5	67.8	79.0	611.2
1994	123.2	223.8	264.0	107.3	17.0	0.0	0.0	4.5	3.7	66.2	6.6	6.9	823.2
1995	99.6	129.0	46.7	18.8	2.8	0.0	0.0	0.0	15.4	26.2	73.1	208.0	619.6
1996	179.8	231.3	232.4	69.3	9.9	19.8	0.0	0.0	17.3	67.0	6.3	73.1	906.2
1997	125.9	353.3	113.0	111.0	20.1	1.1	2.1	0.0	15.0	25.9	33.3	62.2	862.9
1998	125.6	280.4	167.7	105.5	13.2	0.0	2.3	5.0	14.6	20.1	23.8	113.6	871.8
1999	202.7	91.5	250.5	76.2	15.2	0.0	0.7	0.0	25.4	50.1	98.9	60.2	871.4
2000	45.6	153.9	195.7	99.5	4.1	0.0	1.0	0.0	16.4	73.7	103.0	68.5	761.4
2001	83.9	85.6	116.4	22.8	3.9	1.7	0.0	0.0	0.0	23.4	15.7	124.6	478.0
2002	20.5	68.0	76.3	59.4	1.4	2.2	0.0	0.0	16.1	59.6	62.8	82.2	448.5
2003	50.8	68.5	131.9	39.6	3.2	0.0	0.0	0.4	0.5	13.3	6.2	93.6	408.0
2004	81.3	95.7	248.4	104.5	1.5	0.0	1.0	0.6	5.0	29.7	37.6	95.3	700.6
2005	78.4	48.3	201.1	106.1	12.7	2.4	0.7	0.3	0.5	38.6	30.0	23.4	542.5
2006	136.5	178.6	186.4	78.8	0.2	2.5	0.0	0.0	1.4	77.3	35.6	31.9	729.2
2007	204.0	179.4	182.2	89.4	3.8	0.2	0.2	7.9	2.2	86.9	77.3	46.1	879.6
2008	136.5	178.6	186.4	78.8	0.2	2.5	0.0	0.0	1.4	77.3	35.6	31.9	729.2
2009	204.0	179.4	182.2	89.4	3.8	0.2	0.2	7.9	2.2	86.9	77.3	46.1	879.6
2010	53.7	253.0	125.5	41.6	6.1	1.5	0.0	0.5	6.1	21.7	31.3	139.6	680.6
2011	117.9	56.0	98.4	103.4	2.3	0.2	1.5	2.6	6.3	5.4	62.2	121.7	577.9
2012	67.2	161.6	125.5	100.8	7.8	1.8	0.0	0.0	27.3	40.9	93.3	49.8	676.0
2013	30.7	138.1	245.7	25.3	11.0	0.0	0.0	0.2	6.7	79.6	32.1	82.6	652.0
2014	59.1	92.7	184.9	34.0	7.0	2.0	0.3	0.1	9.7	31.5	46.8	72.6	540.7
2015	53.7	90.9	194.6	64.1	22.8	0.5	3.4	0.0	5.4	36.3	29.1	65.4	566.2
2016	28.3	110.5	90.4	30.4	0.8	0.5	0.3	0.0	19.2	4.3	2.0	48.8	335.5
2017	147.8	158.5	214.9	38.1	13.8	1.6	0.0	0.2	14.6	47.4	30.5	45.9	713.3
2018	124.7	65.8	142.9	75.0	35.0	0.0	0.0	0.0	1.6	11.6	55.0	66.2	577.8
2019	144.0	170.6	82.3	53.1	7.2	2.1	0.6	0.0	21.9	43.2	18.9	105.5	649.4
2020	87.2	46.3	46.9	40.6	3.1	0.3	0.0	5.0	10.7	25.2	20.2	169.0	454.5
2021	144.3	32.3	148.6	56.3	4.9	0.0	0.0	6.6	8.6	53.0	20.0	76.8	551.5
PROM	99.2	133.1	146.6	66.4	11.5	2.5	0.6	1.9	9.3	47.8	46.2	73.4	638.5

Histograma de precipitación anual – Estación Pira



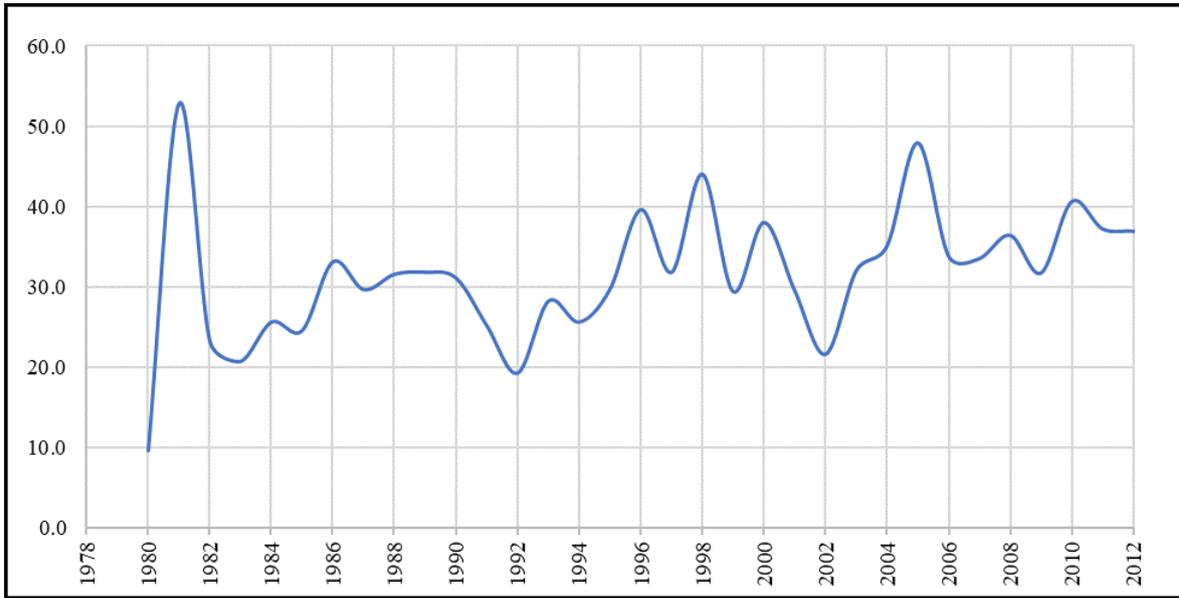
Histograma de precipitación mensual extendida – Estación Pira



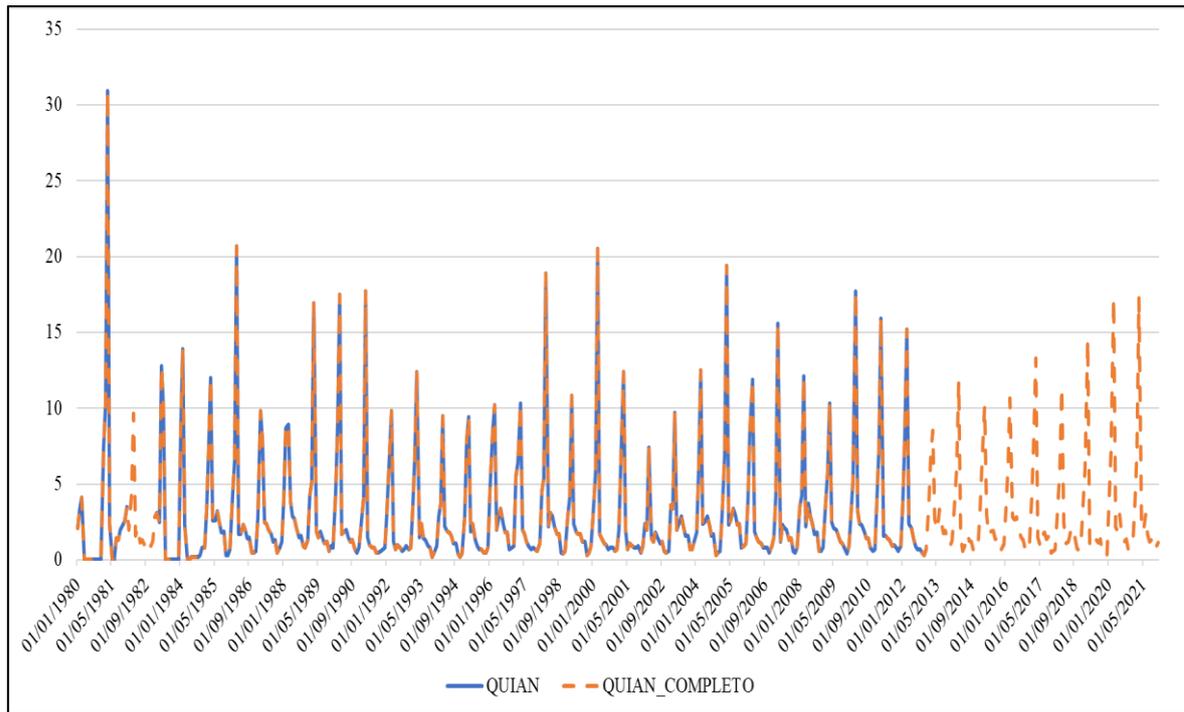
Anexo 5: Registro de precipitación mensual – Estación Quian(mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1980	2.2	3.2	3.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7
1981	6.6	9.1	26.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2.6	3.4	52.9
1982	2.1	4.1	8.5	1.8	0.0	0.0	0.0	1.3	1.7	1.2	1.2	1.5	23.3
1983	2.8	3.0	2.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.4	20.8
1984	7.6	12.1	2.4	0.4	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1	25.7
1985	3.2	6.6	10.5	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.0	24.6
1986	4.0	5.9	17.8	1.9	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	33.2
1987	2.8	8.6	7.0	2.5	2.4	0.0	0.0	1.4	1.5	0.9	1.1	1.4	29.7
1988	3.9	7.7	7.9	3.7	2.9	0.0	0.0	0.0	1.8	1.2	1.1	1.5	31.7
1989	4.0	4.8	14.6	2.0	1.7	0.0	0.0	1.4	1.4	0.9	0.0	1.1	31.9
1990	4.2	8.1	15.1	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.1	31.2
1991	2.3	3.9	15.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	25.2
1992	3.0	5.5	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	19.4
1993	3.4	6.2	10.8	1.7	2.4	0.0	0.0	0.0	1.1	0.6	0.9	1.2	28.3
1994	2.9	3.5	8.4	2.3	2.0	1.8	1.6	1.1	1.1	0.4	0.2	0.4	25.7
1995	2.8	7.9	9.4	1.9	2.4	1.3	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5	0.8	29.8
1996	4.6	8.4	10.2	2.0	2.7	3.4	2.4	1.8	1.8	0.7	0.8	0.9	39.7
1997	5.5	6.4	10.3	2.0	1.7	1.2	0.9	0.7	0.8	0.7	0.6	1.1	31.9
1998	4.5	5.4	18.9	2.2	3.1	2.9	2.2	1.7	1.7	0.5	0.4	0.6	44.1
1999	2.9	4.1	10.8	2.4	1.8	1.7	1.7	1.2	1.2	0.3	0.5	0.9	29.5
2000	2.9	5.9	20.5	1.7	1.4	1.1	1.0	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	38.1
2001	2.0	6.6	12.4	2.0	0.7	1.1	0.9	0.8	0.8	0.9	0.5	0.9	29.6
2002	2.4	2.0	7.4	1.4	1.2	1.8	1.5	1.1	1.2	0.6	0.5	0.6	21.7
2003	3.6	3.4	9.7	2.0	2.5	2.9	2.2	1.6	1.6	0.7	0.7	1.2	32.1
2004	1.8	6.1	12.5	2.4	2.5	2.9	2.3	1.6	1.7	0.3	0.5	0.6	35.2
2005	2.9	6.9	19.4	2.3	2.6	3.4	3.0	2.3	2.4	0.8	0.9	1.1	48.0
2006	3.9	8.6	11.9	1.9	1.5	1.2	1.1	0.8	0.8	0.8	0.5	0.9	33.9
2007	1.5	4.3	15.6	1.2	2.3	2.1	2.0	1.3	1.4	0.6	0.5	0.8	33.6
2008	3.5	4.2	12.1	2.2	3.7	2.9	2.4	1.7	1.8	0.6	0.6	0.8	36.5
2009	3.1	5.9	10.3	2.5	2.1	2.0	1.6	1.2	1.1	0.7	0.4	0.9	31.8
2010	3.0	5.3	17.7	3.2	2.4	2.3	1.9	1.4	1.4	0.8	0.6	0.7	40.7
2011	4.0	7.3	15.9	1.6	1.6	1.4	1.3	0.9	1.0	0.8	0.6	0.9	37.3
2012	3.9	8.2	15.2	2.4	2.1	1.4	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.7	37.0
2013	3.6	6.9	8.5	2.7	2.0	3.3	2.4	1.8	1.9	1.0	0.9	1.3	36.3
2014	3.2	6.1	11.8	1.6	0.6	1.0	1.7	1.3	1.2	0.6	0.6	0.9	30.4
2015	3.2	6.4	10.2	3.0	1.7	1.9	1.9	1.4	1.4	0.6	0.7	1.0	33.3
2016	3.3	5.9	10.6	2.9	2.6	2.8	2.0	1.5	1.3	0.7	0.6	0.7	34.9
2017	4.2	8.1	13.3	1.5	0.9	1.7	1.8	1.4	1.6	0.5	0.6	0.7	36.1
2018	2.8	5.9	11.4	2.5	1.1	1.2	1.8	1.3	1.6	0.8	0.6	1.2	32.1
2019	3.6	6.0	14.5	1.0	0.8	1.3	1.3	1.2	1.4	0.4	0.3	0.3	32.2
2020	3.8	7.1	17.3	2.1	1.9	3.0	1.7	1.2	1.4	0.7	0.8	1.1	42.1
2021	3.8	7.1	17.3	2.1	1.9	3.0	1.7	1.2	1.4	0.7	0.8	1.1	42.1
PROM	3.5	6.2	12.3	2.2	1.6	1.4	1.1	1.0	1.1	0.6	0.7	1.0	32.5

Histograma de precipitación anual – Estación Quian



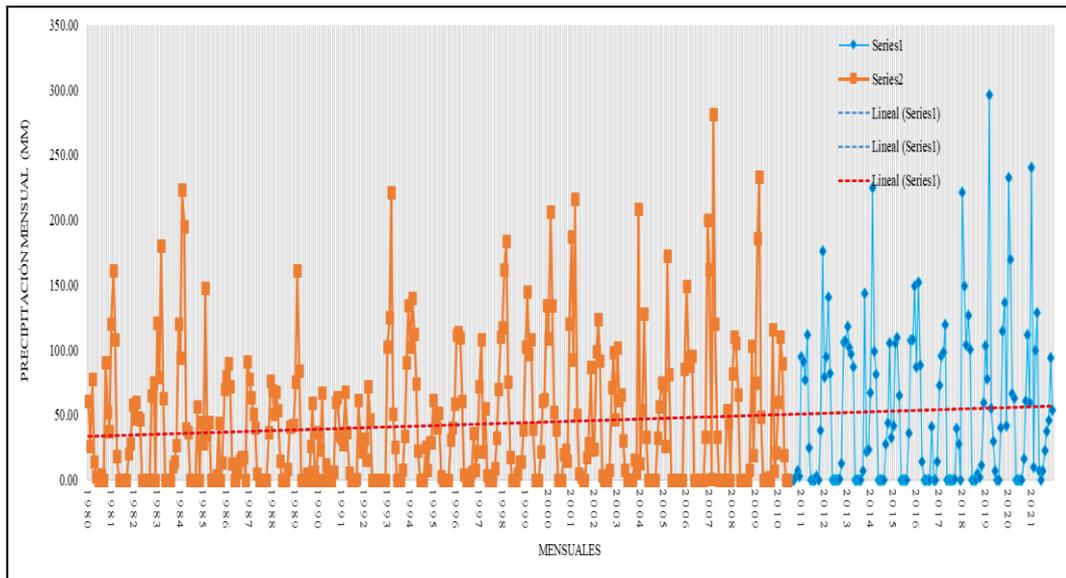
Histograma de precipitación mensual extendida – Estación Quian



Anexo 6: Análisis Estadístico de las pruebas de “T” de Student y “F” de Fisher – Estación Cajamarquilla

Para la estación Cajamarquilla el periodo dudoso esta entre la fecha 2011/06 – 2021/12.

Histograma de precipitación anual histórica completada - Estación Cajamarquilla

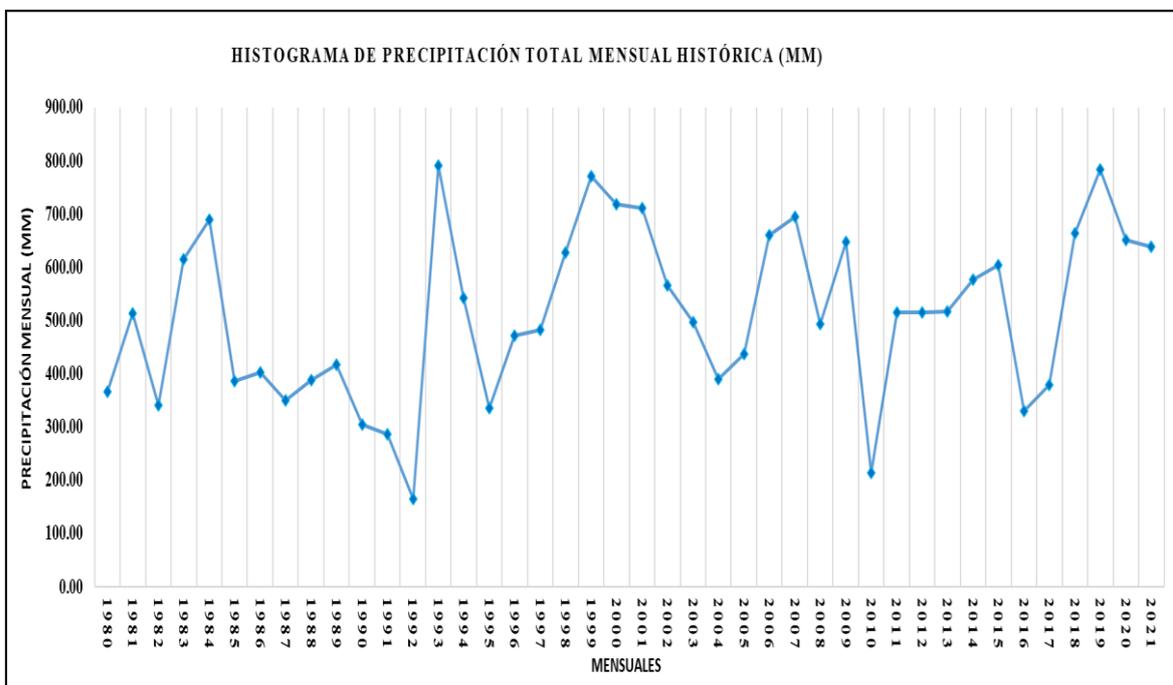


Al realizar la corrección con el análisis de T-student y F de Fisher:

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales ENTRE LOS AÑOS 1980 - 1992	DATOS CONFIABLE Periodos Muestrales ENTRE LOS AÑOS 1980 - 2011
Tamaño de la muestra(n1)= 156	Tamaño de la muestra (n2)= 348
Media de la muestra $\bar{X}_1 =$ 45.14	Media de la muestra $\bar{X}_2 =$ 41.45
Desviación Stand.(S1) = 52.33	Desviación Stand.(S2)= 51.74
Grados de libertad(GL1)= 155	Grados de libertad(GL2)= 347
RESULTADOS	
PRUEBA "T" DE STUDENT	
Desviación estándar ponderada	51.92
Desviación de las diferencias de los promedios	5.00
Cálculo del T, calculado (Tc) según:	0.74
Calculo del valor critico de t, tabular Tt:	1.96
Grados de libertad	502.00
Conclusión:	
$ t_c = 0.74$	$< T_t = 1.9647$
HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA "F" DE FISHER	
Cálculo de F calculado (Fc)según :	1.02
Calculo del F tabular(valor critico de Ft) Ft	1.2457
Conclusión:	
$F_C = 1.02$	$< F_t = 1.2457$
HOMOGENEIDAD OK	

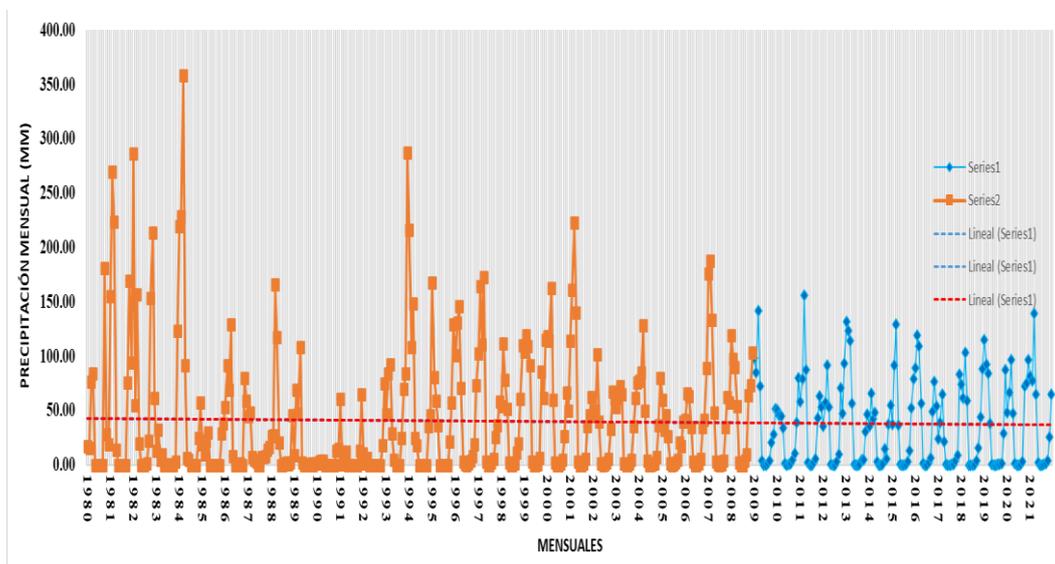
Finalmente, en siguiente gráfico se tiene el nuevo histograma para la precipitación con las correcciones estadísticas:

Histograma de precipitación mensual histórica (mm) – Estación Cajamarquilla



Anexo 7: Análisis Estadístico de las pruebas de “T” de Student y “F” de Fisher – Estación La Merced

Histograma de precipitación anual histórica completada - Estación La Merced

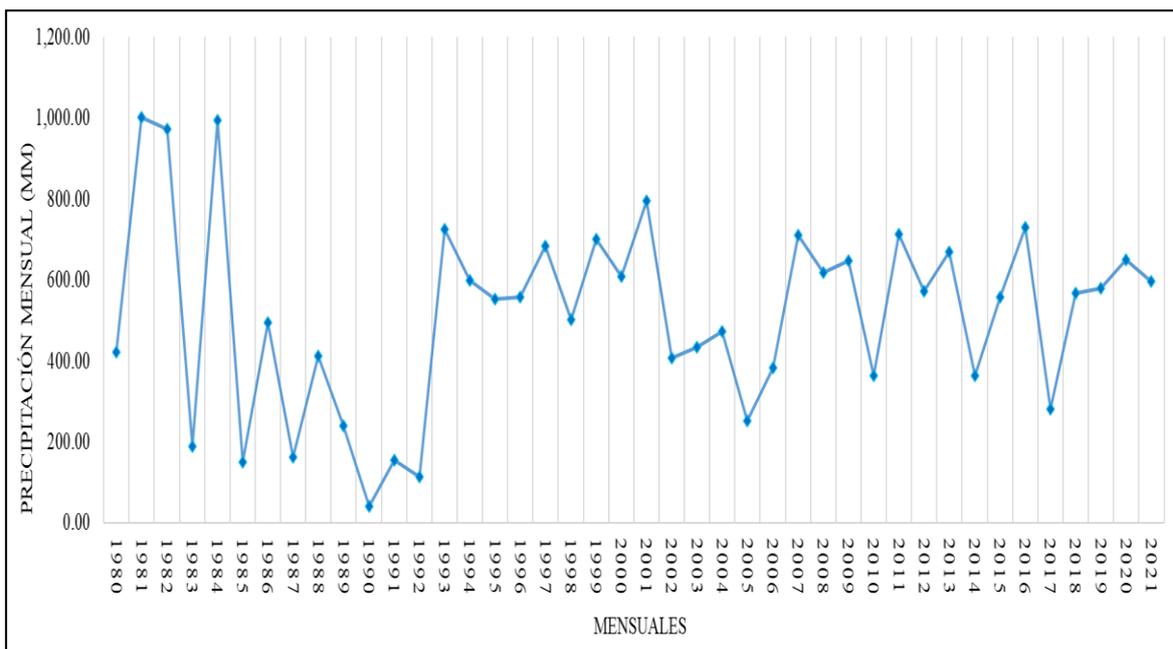


Al realizar la corrección con el análisis de Tstudent y F de Fisher:

DATOS DUDOSOS		DATOS CONFIABLE	
Periodos Muestrales		Periodos Muestrales	
ENTRE LOS AÑOS 2009 - 2021		ENTRE LOS AÑOS 1980 - 2009	
Tamaño de la muestra(n1)=	156	Tamaño de la muestra (n2)=	348
Media de la muestra $\bar{X}_1 =$	46.75	Media de la muestra $\bar{X}_2 =$	41.24
Desviación Stand.(S1) =	53.82	Desviación Stand(S2)=	58.64
Grados de libertad(GL1)=	155	Grados de libertad(GL2)=	347
RESULTADOS			
PRUEBA "T" DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada	57.20		
Desviación de las diferencias de los promedios	5.51		
Cálculo del T, calculado (Tc) según:	1.00		
Calculo del valor critico de t, tabular Tt:	1.96		
Grados de libertad	502.00		
Conclusión:			
$t_c = 1.00 < T_t = 1.9647$ HOMOGENEIDAD OK			
PRUEBA "F" DE FISHER			
Cálculo de F calculado (Fc)según :	1.19		
Calculo del F tabular(valor critico de Ft) Ft	1.2457		
Conclusión:			
$F_C = 1.19 < F_t = 1.2457$ HOMOGENEIDAD OK			

Finalmente, en el siguiente gráfico se tiene el nuevo histograma para la precipitación con las correcciones estadísticas:

Histograma de precipitación mensual histórica (mm) – Estación La Merced



Anexo 8: Valores de la distribución de F de Fisher

1 - $\alpha = 0.9$

1 - $\alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	61.815	61.883	61.945	62.002	62.055	62.103	62.148	62.189	62.229	62.265	62.529	62.688	62.794	62.871	62.927	62.972	63.007	63.167	63.264	63.296
2	9.444	9.446	9.448	9.450	9.451	9.453	9.454	9.456	9.457	9.458	9.466	9.471	9.475	9.477	9.479	9.480	9.481	9.486	9.489	9.490
3	5.182	5.180	5.178	5.176	5.175	5.173	5.172	5.170	5.169	5.168	5.160	5.155	5.151	5.149	5.147	5.145	5.144	5.139	5.136	5.135
4	3.841	3.837	3.834	3.831	3.828	3.826	3.823	3.821	3.819	3.817	3.804	3.795	3.790	3.786	3.782	3.780	3.778	3.769	3.764	3.762
5	3.202	3.198	3.194	3.191	3.187	3.184	3.181	3.179	3.176	3.174	3.157	3.147	3.140	3.135	3.132	3.129	3.126	3.116	3.109	3.107
6	2.831	2.827	2.822	2.818	2.815	2.811	2.808	2.805	2.803	2.800	2.781	2.770	2.762	2.756	2.752	2.749	2.746	2.734	2.727	2.725
7	2.589	2.584	2.580	2.575	2.571	2.568	2.564	2.561	2.558	2.555	2.535	2.523	2.514	2.508	2.504	2.500	2.497	2.484	2.476	2.473
8	2.419	2.414	2.409	2.404	2.400	2.396	2.392	2.389	2.386	2.383	2.361	2.348	2.339	2.333	2.328	2.324	2.321	2.307	2.298	2.295
9	2.292	2.287	2.282	2.277	2.272	2.268	2.265	2.261	2.258	2.255	2.232	2.218	2.208	2.202	2.196	2.192	2.189	2.174	2.165	2.162
10	2.194	2.189	2.183	2.178	2.174	2.170	2.166	2.162	2.159	2.155	2.132	2.117	2.107	2.100	2.095	2.090	2.087	2.071	2.062	2.059
11	2.117	2.111	2.105	2.100	2.095	2.091	2.087	2.083	2.080	2.076	2.052	2.036	2.026	2.019	2.013	2.009	2.005	1.989	1.979	1.975
12	2.053	2.047	2.041	2.036	2.031	2.027	2.022	2.019	2.015	2.011	1.986	1.970	1.960	1.952	1.946	1.942	1.938	1.921	1.911	1.907
13	2.000	1.994	1.988	1.983	1.978	1.973	1.969	1.965	1.961	1.958	1.931	1.915	1.904	1.896	1.890	1.886	1.882	1.864	1.853	1.850
14	1.955	1.949	1.943	1.938	1.933	1.928	1.923	1.919	1.916	1.912	1.885	1.869	1.857	1.849	1.843	1.838	1.834	1.816	1.805	1.801
15	1.917	1.911	1.905	1.899	1.894	1.889	1.885	1.880	1.876	1.873	1.845	1.828	1.817	1.808	1.802	1.797	1.793	1.774	1.763	1.759
16	1.884	1.877	1.871	1.866	1.860	1.855	1.851	1.847	1.843	1.839	1.811	1.793	1.782	1.773	1.766	1.761	1.757	1.738	1.726	1.722
17	1.855	1.848	1.842	1.836	1.831	1.826	1.821	1.817	1.813	1.809	1.781	1.763	1.751	1.742	1.735	1.730	1.726	1.706	1.694	1.690
18	1.829	1.823	1.816	1.810	1.805	1.800	1.795	1.791	1.787	1.783	1.754	1.736	1.723	1.714	1.707	1.702	1.698	1.678	1.665	1.661
19	1.807	1.800	1.793	1.787	1.782	1.777	1.772	1.767	1.763	1.759	1.730	1.711	1.699	1.690	1.683	1.677	1.673	1.652	1.639	1.635
20	1.786	1.779	1.773	1.767	1.761	1.756	1.751	1.746	1.742	1.738	1.708	1.690	1.677	1.667	1.660	1.655	1.650	1.629	1.616	1.612
21	1.768	1.761	1.754	1.748	1.742	1.737	1.732	1.728	1.723	1.719	1.689	1.670	1.657	1.647	1.640	1.634	1.630	1.608	1.595	1.591
22	1.751	1.744	1.737	1.731	1.726	1.720	1.715	1.711	1.706	1.702	1.671	1.652	1.639	1.629	1.622	1.616	1.611	1.590	1.576	1.571
23	1.736	1.729	1.722	1.716	1.710	1.705	1.700	1.695	1.691	1.686	1.655	1.636	1.622	1.613	1.605	1.599	1.594	1.572	1.558	1.554
24	1.722	1.715	1.708	1.702	1.696	1.691	1.686	1.681	1.676	1.672	1.641	1.621	1.607	1.597	1.590	1.584	1.579	1.556	1.542	1.538
25	1.710	1.702	1.695	1.689	1.683	1.678	1.672	1.668	1.663	1.659	1.627	1.607	1.593	1.583	1.576	1.569	1.565	1.542	1.527	1.523
26	1.698	1.690	1.683	1.677	1.671	1.666	1.660	1.656	1.651	1.647	1.615	1.594	1.581	1.570	1.562	1.556	1.551	1.528	1.514	1.509
27	1.687	1.680	1.673	1.666	1.660	1.655	1.649	1.645	1.640	1.636	1.603	1.583	1.569	1.558	1.550	1.544	1.539	1.515	1.501	1.496
28	1.677	1.669	1.662	1.656	1.650	1.644	1.639	1.634	1.630	1.625	1.592	1.572	1.558	1.547	1.539	1.533	1.528	1.504	1.489	1.484
29	1.668	1.660	1.653	1.647	1.640	1.635	1.630	1.625	1.620	1.616	1.583	1.562	1.547	1.537	1.529	1.522	1.517	1.493	1.478	1.472
30	1.659	1.651	1.644	1.638	1.632	1.626	1.621	1.616	1.611	1.606	1.573	1.552	1.538	1.527	1.519	1.512	1.507	1.482	1.467	1.462
40	1.596	1.588	1.581	1.574	1.568	1.562	1.556	1.551	1.546	1.541	1.506	1.483	1.467	1.455	1.447	1.439	1.434	1.408	1.389	1.383
50	1.559	1.551	1.543	1.536	1.529	1.523	1.517	1.512	1.507	1.502	1.465	1.441	1.424	1.412	1.404	1.395	1.388	1.359	1.340	1.333
60	1.534	1.526	1.518	1.511	1.504	1.498	1.492	1.486	1.481	1.476	1.437	1.413	1.395	1.382	1.372	1.364	1.358	1.326	1.306	1.299
70	1.517	1.508	1.500	1.493	1.486	1.479	1.473	1.467	1.462	1.457	1.418	1.392	1.374	1.361	1.350	1.342	1.335	1.302	1.281	1.273
80	1.503	1.495	1.487	1.479	1.472	1.465	1.459	1.453	1.448	1.443	1.403	1.377	1.358	1.344	1.334	1.325	1.318	1.284	1.261	1.253
90	1.493	1.484	1.476	1.468	1.461	1.455	1.448	1.442	1.437	1.432	1.391	1.365	1.346	1.332	1.321	1.312	1.304	1.269	1.245	1.237
100	1.485	1.476	1.468	1.460	1.453	1.446	1.440	1.434	1.428	1.423	1.382	1.355	1.336	1.321	1.310	1.301	1.293	1.257	1.232	1.223
200	1.448	1.438	1.430	1.422	1.414	1.407	1.400	1.394	1.388	1.383	1.339	1.310	1.289	1.273	1.261	1.250	1.242	1.199	1.168	1.157
500	1.425	1.416	1.407	1.399	1.391	1.384	1.377	1.370	1.364	1.358	1.313	1.282	1.260	1.243	1.229	1.218	1.209	1.160	1.122	1.106
1000	1.418	1.408	1.399	1.391	1.383	1.376	1.369	1.362	1.356	1.350	1.304	1.273	1.250	1.232	1.219	1.207	1.197	1.145	1.103	1.084

Elaborada por Irene Patricia Valdez y Alfaro.

1 - $\alpha = 0.95$

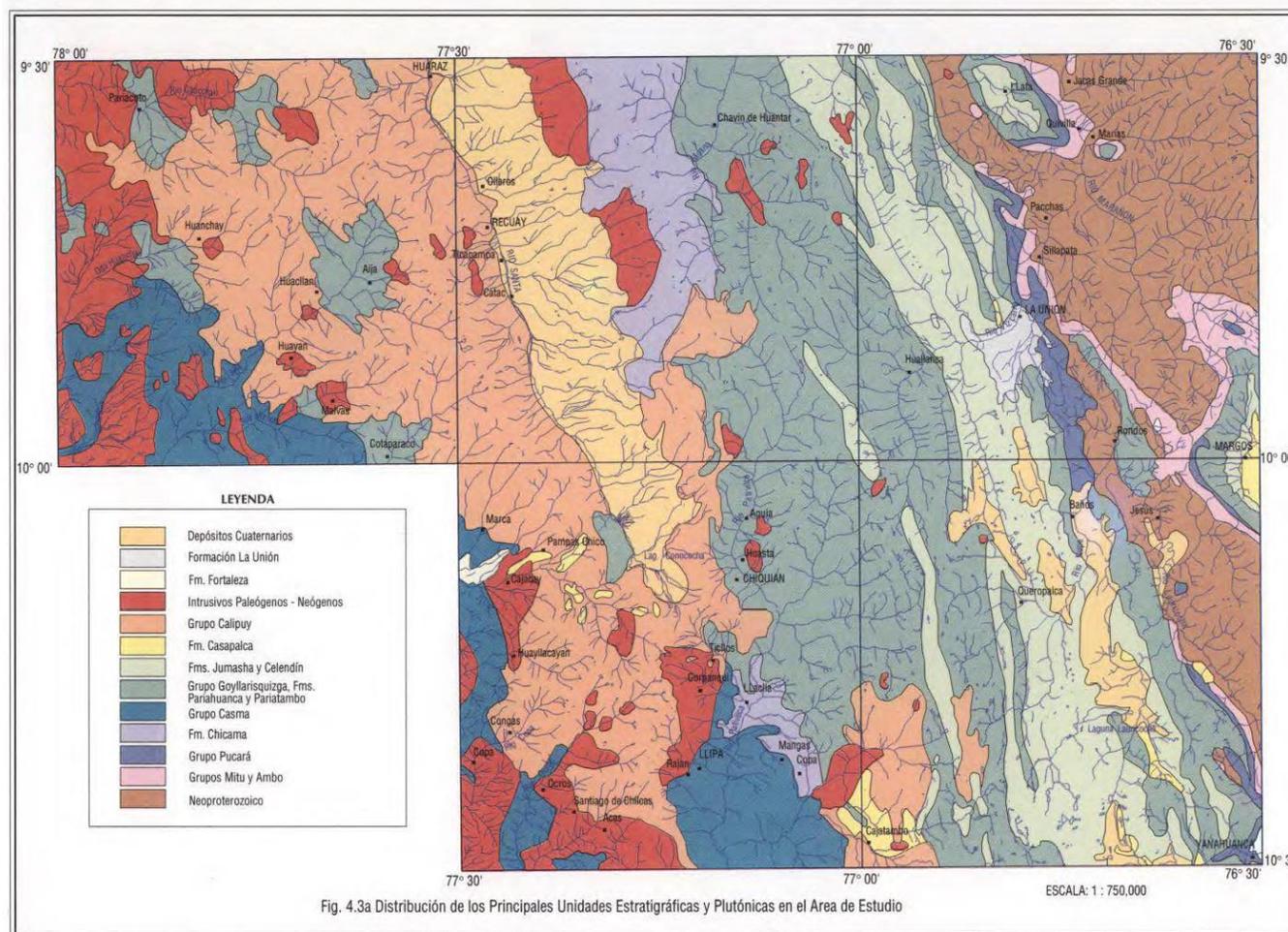
v_1 = grados de libertad del numerador

1 - $\alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882	242.981	243.905	244.690	245.363	245.949	246.466	246.917	247.324	247.688	248.016
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.433	19.437	19.440	19.443	19.446
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.590	4.579	4.568	4.558
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.150
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948	2.936
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428</			

Anexo 9: Características de litología y descripción de las unidades según el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [INGEMMET] (1996)



- **Depósitos aluviales:** Acumulaciones de grava, limo y arcillas con clastos subangulosos de diferente composición. Acumulaciones de arenas, limos y clastos redondeados, que conforman terrazas recientes. Su espesor varía de 1 a 3 m. Estos depósitos están constituidos por materiales acarreados por los ríos emplazados en las depresiones de los valles formando terrazas y conos fluviales defectivos, se puede observar a lo largo de los principales ríos de la zona y el río Santa, formando extensas terrazas fluviales, con presencia de arcillas y arenas finas con gravas arenosas bien clasificadas, con una profundidad de mezclas con cantos rodados y arenas que en parte son usados para la agricultura.
Asimismo, están constituidas por gravas mal clasificadas mezclada con limos y arenas en forma caótica, en lugares de cursos amplio se han desarrollado las capas de arcilla y arcilla gravosa que se usa para la agricultura.
- **Tonalita:** Roca leucocrata de grano medio a grueso inequigranular. Presenta cristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y anfíboles, además presenta xenolitos melanocratos.
- **Granodiorita:** Roca leucocrata de grano medio a grueso inequigranular. Presenta cristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y anfíboles, además presenta xenolitos melanocratos. Cuerpos intrusivos de composición granodiorítica que se distribuyen ampliamente en todo el departamento conformando cuerpos irregulares de diferente dimensión. Los afloramientos de este macizo son conspicuos por su color y por las formas redondeadas de su superficie producidas por el intemperismo. La roca fresca es de color gris claro a blanco grisáceo, de textura granular, grano grueso, holocristalino. Está compuesto principalmente de plagioclasas, cuarzo y moscovita (mica blanca). Además, se observan escasos granos de biotita. Las plagioclasas y el cuarzo constituyen la masa principal de la roca. La mica se presenta en masas irregularmente agrupadas. Es probable que esta granodiorita esté relacionada a la masa batolito granodiorítico de la Cordillera Occidental cuya edad se considera entre el Cretácico Superior y el Terciario Inferior.
- **Areniscas:** Areniscas cuarzozas blanquecinas de grano medio intercaladas con lutitas pardo amarillentas y ocasionales mantos de carbón. Espesor aproximado de 200 m. Intercalación de areniscas grises claras de grano medio, calizas color belga y lutitas parduzcas con depósitos de flujos piroclásticos re TRABAJADOS con clastos redondeados, con un promedio de 400 m.

- **Bloques:** Acumulaciones de cantos y bloques subangulosos a angulosos consolidados en una matriz limosa. Conforman espesores de 25 a 50 m.
- **Calizas:** calizas color belga y lutitas parduzcas con depósitos de flujos piroclásticos retrabajados con clastos redondeados, con un promedio de 400 m. Calizas color azul gris a verde, capas de yeso, limoarcillitas rojizas.
- **Andesita:** Depósitos de flujos de lava andesítica, color gris oscuro, textura porfírica con cristales de plagioclasa bien cristalizados. Conforman un espesor aproximado de 300 a 400 m.
- **Lutita Limo arcillita:** Lutitas grises a negras, laminadas a veces pizarrosas intercaladas con limo arcillitas pardo-amarillentas y calizas grises oscura (0.1 - 0.3 m)
- **Tonalita:** Rocas ígneas de textura granular hipidiomórficas, siendo los minerales esenciales las plagioclasas que en composición varían de andesina a oligoclasa y sus formas son euhedrales a anhedrales, ocasionalmente como granoblastos; se tiene además hornblenda y cuarzo de forma anhedral. Entre los minerales accesorios se consideran la sericita, epidota-zoicita, arcillas, feldespatos potásicos, piroxenos, cloritas, opacos en trazas, así también carbonatos, albita, esfena, apatito y zircón. Se distribuyen en forma paralela a la unidad anterior y se asume que dichas intrusiones han ocurrido durante el cretáceo inferior.
- **Tonalita granodiorita:** Cuerpo intrusivo de composición granodiarítica y tonalítica que se distribuye ampliamente a lo largo de la cordillera blanca y negra. La roca fresca es de color gris claro a blanco grisáceo, de textura granular, grano grueso, holocristalino. Está compuesto principalmente de plagioclasas, cuarzo y moscovita (mica blanca). Además, se observan escasos granos de biotita. La tonalita es de textura granular hipidiomórficas, siendo los minerales esenciales la plagioclasa, hornblenda y cuarzo. Entre los minerales accesorios se considera la sericita, epidotazoicita, arcillas, feldespato potásico, piroxenos, cloritas y opacos en trazas.
- **Granitos y Monzogranitos:** Son rocas intrusivas compactas de color gris claro a blanquecino con tonalidades verdosas, de textura fanerítica, de grano grueso, con densidad media y magnetismo muy débil; está compuesta mayormente por cuarzo y plagioclasas y feldespatos potásicos. Está usualmente en afloramientos de topografía moderada a fuerte.

- **Depósitos morrénicos:** Son característicos de la sedimentación glacia que se producen por la acumulación de roca y arcilla (tillitas), transportados y depositados por un glaciar. Las morrenas forman crestas y lomas alargadas, se ubican en la zona del frente glacial.

Anexo 10: Características de suelos según FAO

Fueron obtenidos de la página del International Soil Reference and Information Centre [ISRIC] (2024).

— *Cambisoles*

Los cambisoles se encuentran principalmente en las regiones templadas y boreales del mundo, donde el material original del suelo aún es joven o donde las bajas temperaturas ralentizan los procesos de formación del suelo.

Características

Suelos que tienen un horizonte cámbico (un horizonte que muestra evidencia de alteración con respecto al material subyacente) o un horizonte mólico que recubre un subsuelo, que tiene una saturación de bases de menos del 50 por ciento en alguna parte dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo, o uno de los siguientes horizontes de diagnóstico dentro de la profundidad especificada:

- Un horizonte ándico, vértico o vítrico que comienza entre 25 y 100 cm;
- Un horizonte (petro-)plíntico o sálico que comienza entre 50 y 100 cm, en ausencia de arena arcillosa o texturas más gruesas por encima de estos horizontes.

Mostrar imagen más grande

Marga limosa marrón rojiza derivada de material de lavado de taludes, a 65 cm de profundidad sobre un suelo truncado en depósitos de loess, China

(Cambisol Silticrómico (Eutric); suelo de referencia ISRIC CN 034

— *Chernozems*

Los chernozems se encuentran típicamente en las regiones esteparias de pasto largo del mundo, particularmente en Europa del Este y América del Norte (Canadá y EE. UU.).

Características

Suelos que tienen un horizonte mólico muy oscuro (horizonte superficial espeso, pardo o negruzco con una acumulación significativa de materia orgánica y alta saturación de bases) y carbonatos secundarios dentro de los 50 cm del límite inferior del horizonte Ah, pero dentro de los 200 cm desde la superficie del suelo. No tienen horizonte petrocálcico entre 25 y 100 cm desde la superficie del suelo, no tienen yeso secundario y no tienen granos de arena y limo sin recubrir en las superficies de apoyo estructurales.

— *Andosols*

Los andosoles ocurren en grandes áreas en el Lejano Oriente, donde el cultivo de arroz con cáscara se lleva a cabo durante siglos, en el Medio Oriente, donde se ha practicado el riego prolongado, y en áreas pequeñas en Europa occidental y otras partes del mundo donde la fertilización prolongada y la tierra. -los abonos han modificado profundamente los suelos existentes.

Características

Suelos que tienen un horizonte hórtico, irrágico, plágico o térrico de 50 cm o más de espesor, o un horizonte antráquico y un horizonte hidrágico subyacente con un espesor combinado de 50 cm o má

— *Kastanozems*

Kastanozems ocurren principalmente en las partes secas de las regiones esteparias del mundo. Vastas áreas se encuentran en Asia central y EE.UU. central. Se informan ocurrencias más pequeñas en la región del Mediterráneo.

Características

Suelos que tienen un horizonte mólico (horizonte superficial profundo de color oscuro con una acumulación significativa de materia orgánica y alta saturación de bases) y acumulación de carbonato de calcio secundario dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo. No tienen horizontes de diagnóstico más que un horizonte árgico, cálcico, cámbico, gípsico o vértico.

— *Lithosols*

las laderas suelen ser empinadas y abundan los litosoles (suelos poco profundos que consisten en fragmentos de roca erosionados de manera imperfecta), que representan otro 10 por ciento de la superficie del continente. suelos poco profundos que consisten en fragmentos de roca imperfectamente meteorizado.

Anexo 11: Código en RStudio para NDVI

```
##Para calcular NDVI a partir de imágenes Sentinel
install.packages("raster")
library(raster)
setwd("E:/TESIS/15. NDVI/20201010T152639/R10m")
RED <- raster("RED.tif")
NIR <- raster("NIR.tif")
plot(RED)
plot(NIR)
NDVI <- (NIR - RED)/(NIR + RED)
plot(NDVI)
writeRaster(NDVI,"NDVI202010.tif",format="GTiff", overwrite=TRUE)
##para recortar en rectangulo
install.packages("sf")
library(sf)
DEM <- raster('NDVI202010.tif')
RECTANGULO <- shapefile('RECTANGULO17.shp')
plot(DEM)
plot(RECTANGULO, AD=TRUE)
```

Anexo 12: Ponderación y mapa sin considerar NDVI

A continuación, se detalla los pesos finales de la matriz de Saaty sin considerar la variable de NDVI:

Matriz de Saaty:

	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendiente	Geología	Suelos	Uso actual de suelos
Precipitación	1	2	6	2	3	2
Densidad de drenaje	1/2	1	7	1/2	5	1/3
Pendiente	1/6	1/7	1	1/4	1/3	1/4
Geología	1/2	2	4	1	2	2
Suelos	1/3	1/5	3	1/2	1	1/4
Uso actual de suelos	1/2	3	4	1/2	4	1
Suma	3.00	8.34	25.00	4.75	15.33	5.83
1/suma	0.33	0.12	0.04	0.21	0.07	0.17

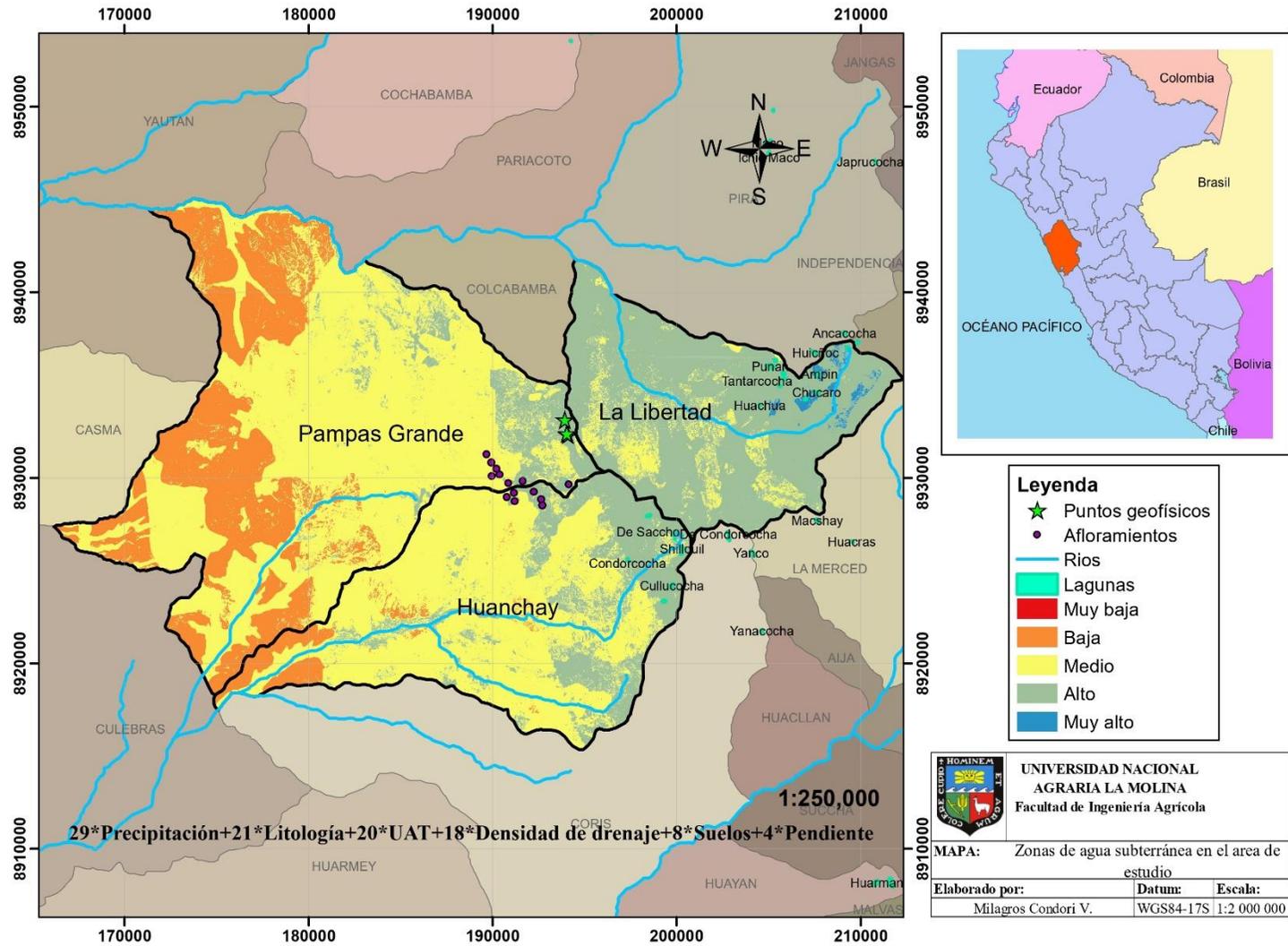
Matriz de normalización:

	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendiente	Geología	Suelos	Uso actual de suelos
Precipitación	0.33	0.24	0.24	0.42	0.20	0.34
Densidad de drenaje	0.17	0.12	0.28	0.11	0.33	0.06
Pendiente	0.06	0.02	0.04	0.05	0.02	0.04
Geología	0.17	0.24	0.16	0.21	0.13	0.34
Suelos	0.11	0.02	0.12	0.11	0.07	0.04
Uso actual de suelos	0.17	0.36	0.16	0.11	0.26	0.17

Vector de priorización (Ponderación):

	Vector de priorización	Vector de priorización (%)
Precipitación	0.295	29.54%
Densidad de drenaje	0.176	17.58%
Pendiente	0.038	3.83%
Geología	0.208	20.84%
Suelos	0.078	7.81%
Uso actual de suelos	0.204	20.40%

Anexo 13: Mapa para prospectar aguas subterráneas en la zona de estudio



Anexo 14: Índice aleatorio de la Matriz de Saaty

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595