

## Fuentes de agua subterránea en zonas áridas de la cordillera negra mediante teledetección

**Guillermo Clemente Aguilar Giraldo<sup>1</sup>**  
[aggc@lamolina.edu.pe](mailto:aggc@lamolina.edu.pe)  
<https://orcid.org/0000-0001-5543-2618>  
Universidad Nacional Agraria La  
Molina, Lima, Perú.

**Milagros Condori Ventura**  
[20151295@lamolina.edu.pe](mailto:20151295@lamolina.edu.pe)  
<https://orcid.org/0000-0002-3263-2104>  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad Nacional Agraria La Molina,  
Lima, Perú.

### RESUMEN.

El presente trabajo está orientado a localizar posibles zonas para la exploración de agua subterránea en la cordillera negra en la jurisdicción de los distritos Huanchay, Pampas Grande y La Libertad, provincia de Huaraz, departamento de Ancash – Perú, mediante la aplicación de la teledetección e integración de las siete variables como la precipitación, densidad de drenaje, pendiente, litología, uso de suelos, tipo de suelo e índice de vegetación de diferencia normalizada. Así mismo, se ha empleado la matriz de Saaty (Proceso Analítico Jerarquizado) para determinar los pesos de cada variable considerando la Relación de Consistencia (RC) e integrarlos acorde con su respectiva ponderación. Las zonas para prospectar agua subterránea, han sido clasificadas como “muy bueno”, “bueno”, “medio”, “alto” y “muy alto”, haciendo uso de la siguiente expresión:  $25.92 * \text{precipitación} + 18.06 * \text{densidad de drenaje} + 3.22 * \text{pendiente} + 18.34 * \text{Geología} + 7.75 * \text{suelos} + 19.76 * \text{Uso actual de suelos} + 6.96 * \text{índice de vegetación de diferencia normalizada}$ . En ámbito de estudio,  $0.69 \text{ km}^2$  de área corresponde a zonas caracterizadas con potencial de agua subterránea “muy alta”,  $196.35 \text{ km}^2$  como “alta” y  $412.85 \text{ km}^2$  como “media”, siendo la Libertad con mayores potenciales de agua subterránea, seguido por Huanchay finalmente Pampas Grande. Los resultados de la metodología fueron validados con ocho (08) puntos de exploración geoelectrica y el inventario de catorce (14) afloramientos de agua subterránea.

**Palabras clave:** *Potencial de agua subterránea, sensores remotos, escases de agua, sequías y GIS.*

---

<sup>1</sup> Autor Principal

## **Groundwater sources in arid areas of the Cordillera Negra using remote sensing**

### **ABSTRACT.**

The present work is oriented to locate possible zones for the exploration of groundwater in the high land mountain in the jurisdiction of the districts Huanchay, Pampas Grande, and La Libertad, province of Huaraz, department of Ancash - Peru, through the application of remote sensing and integration of the seven variables such as precipitation, drainage density, slope, lithology, land use, soil type, and normalized difference vegetation index. Likewise, the Saaty matrix (Hierarchical Analytical Process) has been used to determine the weights of each variable considering the Consistency Ratio (CR) and integrate them according to their respective weighting. The areas for prospecting for groundwater have been classified as "very good", "good", "medium", "high" and "very high", using the following expression:  $25.92 * \text{precipitation} + 18.06 * \text{drainage density} + 3.22 * \text{slope} + 18.34 * \text{Geology} + 7.75 * \text{soils} + 19.76 * \text{Current use of soils} + 6.96 * \text{normalized difference vegetation index}$ . In the scope of the study, 0.69 km<sup>2</sup> of the area corresponds to zones characterized with "very high" groundwater potential, 196.35 km<sup>2</sup> as "high" and 412.85 km<sup>2</sup> as "medium", with Libertad having the highest groundwater potential, followed by Huanchay finally Pampas Grande. The results of the methodology were validated with eight (08) geoelectric exploration points and the inventory of fourteen (14) groundwater outcrops.

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

*Artículo recibido 02 mayo 2023*

*Aceptado para publicación: 20 mayo 2023*

## **INTRODUCCIÓN**

La escasez del recurso hídrico es un problema que se viene acelerando en estos últimos tiempos tanto para consumo humano y riego especialmente 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. 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 la teledetección y exploración indirecta mediante la geofísica.

El trabajo propone aplicar técnicas y métodos accesibles de bajo costo para la evaluación y localizar aguas subterráneas y posteriormente verificar mediante la exploración indirecta a fin de ubicar puntos para la exploración directa mediante la perforación de pozos tubulares.

### **Descripción del área de estudio**

La zona de estudio comprende los distritos de Pampas Grande, La Libertad y Huanchay de la provincia de Huaraz y departamento de Ancash con 710.45 km<sup>2</sup> 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. El periodo de estiaje esta comprendido entre abril a noviembre y periodo húmedo de diciembre a marzo.

Corresponde a la región natural de la Sierra del Perú y a la Cordillera Negra entre las quebradas del rio culebras y Casma en la parte alta, geográficamente el distrito de Pampas Grande se ubica en las coordenadas UTM 180572.5 y 8932395.03, Huanchay en UTM 190644.12 y 8923035.09 y La Libertad en UTM 201700.37 y 8933561.82; zona 17S, sobre 546 msnm y el más alto a 4883 msnm (Ver Figura 1).

Según la clasificación climática del Perú, la quebrada Del Diablo, corresponde a una zona de clima árido, semicálido y húmedo [16]. De acuerdo con el mapa de zonas de vida del Perú elaborado por Senamhi [4], en la parte media del área de estudio hay tierras de protección forestal y de pastos (56.4%), en la parte baja tierras de protección (24.4) y en la parte alta tierras de protección de pastos y aptas para cultivo en limpio (19.2%). La temperatura media anual máxima y mínima es 23°C y 13°C, respectivamente,

## **Materiales y métodos**

### **Materiales**

**Mapas temáticos del área de estudio:** La información geológica ha sido obtenida de la base de datos GEOCATMIN a escala 1/100000 y la información temática geológica del Instituto geológico, minero y metalúrgico (INGEMMET), asimismo, se usó el catálogo nacional de metadatos para obtener información geológica del área de estudio.

**Precipitación:** Data diaria de precipitación (mm) obtenido de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y de SENAMHI datos meteorológicos para el periodo 1980 a 2021 de cinco estaciones (Pira, Cajamarquilla, La Merced, Quian y Pariacoto).

**Imágenes de sensores Remotos:** un mosaico de imágenes de satélite Alos Palsar Alaska (con resolución espacial de 12.5 m, usadas en MDT, para obtener mapas de densidad de drenaje y pendiente de la superficie [2]. Además, se usó la imagen satelital sentinel 2A,

para obtener el mapa de uso actual de suelos y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

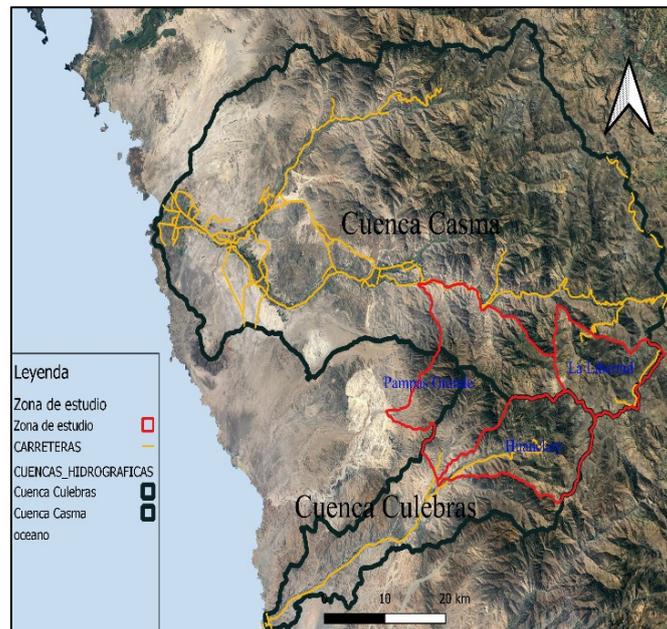


Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio

### Metodología

Se elaboraron los mapas principales que influyen en la exploración del agua subterránea mediante la teledetección. En la Figura 2, se muestra el flujograma para delimitar las zonas con probable presencia de agua subterránea, basado en los mapas de precipitación, infiltración del agua hacia el subsuelo, densidad de drenaje, litología, pendiente, NDVI, uso actual de suelos y el tipo de suelos

### Precipitación (P)

Los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas fueron regionalizados mediante la técnica del Kriging, donde el promedio corresponde a 32 años de longitud de registro (1980 -2021). Teniendo en cuenta lo mencionado por Musa [12], la precipitación es una variable importante como fuente de recarga de acuíferos (citado [8]).

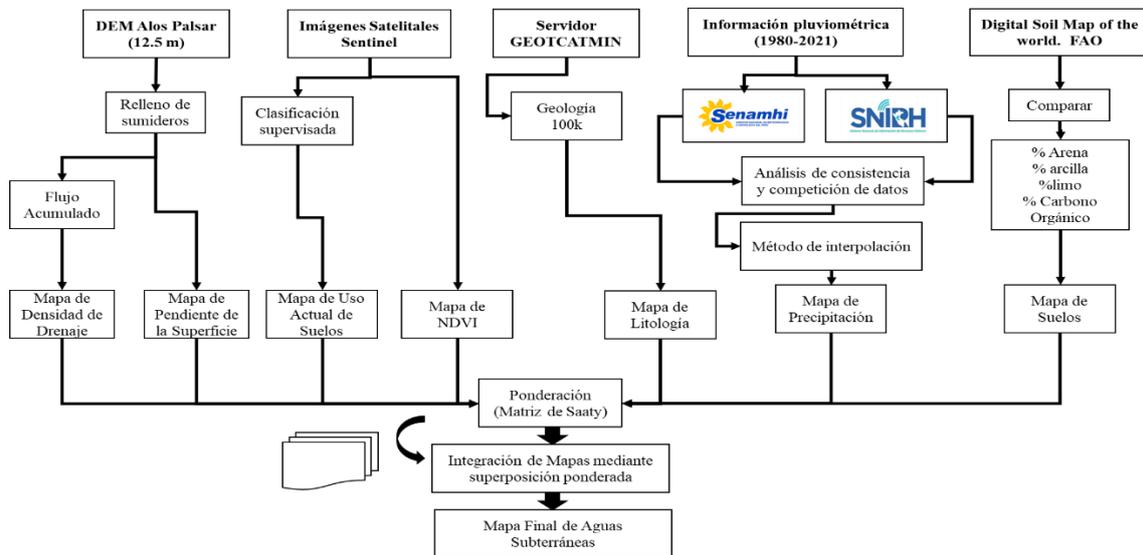
Acorde con Ramahati y Machiwal (2011), la precipitación tiene cinco escalas de valor tal como se muestra en la Tabla 1, con láminas comprendidas entre 15.21mm a 613.36 mm

e intervalos de 100 mm, con predominancia de los rangos 15.21 a 100 mm y 100 a 200 mm, que cubre el 46.16 % del área total (Ver Tabla 1: Clasificación y ponderación de las precipitaciones [7])

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

Tabla 2)[13]. En la Figura 3, se muestra el mapa de precipitación clasificada.

Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología



**Tabla 1: Clasificación y ponderación de las precipitaciones [7]**

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

**Tabla 2: Clasificación de la precipitación en el área de estudio**

Nº	Precipitación (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	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	

**Densidad de drenaje (Dd)**

El sistema de drenaje indica la velocidad con la que el agua deja la cuenca [11], por lo que las densidades altas de drenaje denotan que una gran proporción de precipitación escurre. Por otro lado, las bajas densidades de drenaje indican una alta infiltración de la precipitación por consiguiente estas bajas densidades muestran las zonas con ponderamiento alto para localizar fuentes de agua subterránea [18].

El 47% de área (1.77 – 2.54 km/km<sup>2</sup>) con alta densidad de drenaje se localizan en las partes altas tal como se observa en la Figura 4 y Tabla 3. Seguido por una densidad media

con 36.96% del área total del área que corresponde a los cauces de ríos y quebradas (Tabla 4).

**Tabla 3: Clasificación de la red de drenaje de las cuencas respecto a la escorrentía [22] y[21]**

<b>Rangos (km/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Clases</b>	<b>Rangos (km/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Clases</b>
Fuentes Junco (2004)		Delgadillo y Páez (2008)	
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

**Tabla 4: Clasificación de densidad de drenaje**

<b>Densidad drenaje</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Clasificación</b>
1.124 – 1.77	65.84	9.27	Alto
1.77 – 2.54	333.75	47	Alto a bueno
2.54 – 3.31	262.41	36.96	Bueno a moderado
3.31 – 4.08	42.25	5.95	Moderado a bajo
4.08 – 4.87	5.80	0.82	Bajo
710.05	100.00		

## Pendiente (S)

La pendiente es uno de los factores que influyen directamente en la infiltración de las precipitaciones, a pendientes más pronunciadas generan menos recarga debido a que el agua fluye rápidamente sobre la superficie en consecuencia no permite infiltrarse [6].

Según diversos estudios las pendientes repercuten en la intensidad de recarga de acuíferos, a altas pendientes ocurre menos infiltración respecto a las bajas, en este contexto se ha clasificado en cinco grupos de acuerdo con los diversos estudios realizados [8]. En la

Tabla 5, se observa el resumen y ponderación de las pendientes con clases que van desde muy buena, buena, moderada, pobre y muy pobre [8] y [10].

En la Tabla 6 y Figura 5 se muestra los resultados para la zona de estudio.

**Tabla 5: Clasificación de pendiente [8] y [10].**

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

**Tabla 6: Resultados de la clasificación de la pendiente**

Pendiente (°)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Clasificación
0 - 3	6.27	0.88	Muy Buena
3 - 5	10.32	1.45	Muy Buena
5 - 10	46.82	6.59	Buena
10 - 15	64.43	9.07	Moderada
15 - 35	432.13	60.86	Moderada a pobre
35 - 83.85	150.09	21.14	Muy pobre

## **Geología (G)**

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 las fallas y el 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 [8]. Por otro lado, se ha considerado la litología para la delimitación de las zonas con potencial de aguas subterráneas, siendo uno de los factores el tipo de roca que predomina en la zona de estudio, esta variable indica el nivel de permeabilidad y conductividad hidráulica que poseen las rocas por lo que la porosidad y permeabilidad de las diferentes formaciones geológicas intervienen en la cantidad y velocidad de recarga de agua subterránea [19].

En las zonas altas de la zona de estudio, la formación Calipuy ocupa 50% de área y en las partes bajas se encuentran los batolitos de la costa como las unidades geológicas de Santa Rosa, Paccho, Pativilca, Pira Humaya, además, se observa la presencia de los depósitos aluviales en las cercanías de los ríos Casma y Culebras.

Además, se observa un porcentaje alto de rocas andesitas, tobas e ignimbritas que cubre el 49.37% con permeabilidad baja, así como las rocas granodioritas y tonalitas que cubre el 15.41% del área y cuya permeabilidad es 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), ver Tabla 7.

**Tabla 7: Clasificación y ponderación de la litología**

<b>Geología</b>	<b>Conductividad (k)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso</b>
laguna	media	0.41	4
Depósito Aluvial	alta	43.37	5
Areniscas, lutitas	media	0.65	5
Lavas y aglomerados	baja a media	1.13	1
Andesitas, dacitas y riolitas	bajas	9.51	2
Andesitas, rocas piroclásticas	bajas	39.16	3
Andesitas, tobas e ignimbritas	bajas	350.55	3
Calizas y limo arcillitas		74.3	4
Chert y tufis, lutitas y lodotitas		28.18	3
Bloques morreneicos		13.16	3
Granodiorita y tonalita	Nula impermeable	109.45	1
Diorita y Tonalita	Nula impermeable	26.7	1
Granodiorita	Nula impermeable	0.58	1
Monzogranito	Nula impermeable	12.9	1

**Uso actual de suelos (US)**

El uso actual de suelos es importante en la ubicación de zonas con potencial de agua subterránea, debido a que controla el movimiento o la infiltración del agua hacia el perfil del suelo o roca. Según Kumar, la Hydro geomorfología es un factor importante al igual que la litología [7]. Se consideró peso alto terrenos con vegetación, depósitos aluviales, bosques y matorrales debido a que retardan la escorrentía superficial y aumentan el tiempo de contacto del agua con el suelo por lo que favorecen mayor infiltración; mientras que, a las zonas urbanas, ríos y lagunas no propician recarga del medio acuífero y/o retardan la infiltración de las precipitaciones, en consecuencia, dichas áreas tienen peso bajo.

El 48.56% del área total cubierta con bosques y matorrales tienen peso de 4 y 22.11% cubierta con pajonal andino ambas en las partes altas de la zona de estudio con 3 de peso

áreas con cardonales que representa a los terrenos con pradera natural con 15.17% de área con 3 de peso, tal como se muestra en la Tabla 8 y Figura 7.

**Tabla 8: Ponderación del uso actual de suelo**

Uso actual de suelos	Descripción de las categorías	Área km <sup>2</sup> y (%)	Peso
Zona Urbana	Terrenos urbanos y/o instalaciones gubernamentales y privadas.	6.11(0.86)	1
Terrenos con vegetación cultivada	Terrenos con vegetación cultivada.	63.56(8.95)	5
Cardonales	Terrenos con praderas naturales	107.8(15.17)	3
Depósitos aluviales	Terrenos con drenados	24.1(3.39)	4
Desierto costero	Terrenos sin uso y/o improductivos	3.05(0.43)	3
Lagos, lagunas y cochas	Zona de agua	3.75(0.53)	2
Matorrales y bosques	Terrenos con bosques, húmedos y matorrales	345.01(48.56)	4
Pajonal andino	Terrenos con praderas naturales	157.12(22.11)	3

### Suelos (S)

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. En consecuencia, suelos con alta permeabilidad permiten tasas de infiltración alta por lo que gran parte del agua de lluvia percola a mayor velocidad hacia la napa freática [10]. El mapa de suelos del área fue obtenido de FAO/UNESCO, que considera una capa superior entre 0-30 cm y la inferior entre 30-100 cm para la caracterización física – química [5].

### Índice de vegetación normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se usó determinar la superficie con vegetación [3]. El análisis del NDVI considera una estimación aproximada

de la cantidad de vegetación presente y de la presencia de las aguas subterráneas en el espacio[10].

Las ponderaciones más elevadas para el NDVI están asociadas a áreas que presentan una densidad de vegetación elevada, lo que a su vez propicia a una mayor acumulación de humedad en el suelo [8].

La Figura 9, muestra el mapa y valores de NDVI que se clasificaron en cinco rangos de -0.97 a 0.8. Los valores de NDVI de 0 a 0.2 corresponde a vegetación escasa más suelo localizadas en las partes altas con 57.69% del total del área y el 34.57% corresponden a suelos desnudos que se encuentran en las partes bajas (ver Tabla 9 y Tabla 10).

**Tabla 9: Clasificación del NDVI**

<b>Rangos de NDVI</b>		<b>Peso</b>
< 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

**Tabla 10: Clasificación y ponderación del NDVI**

<b>Rango</b>	<b>Área (km2)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Clasificación</b>
-0.97 – 0	1.01	0.14	Muy baja
0 – 0.2	245.48	34.57	Baja
0.2 – 0.4	409.62	57.69	Moderada
0.4 – 0.6	46.97	6.62	Buena
0.6 – 0.98	6.97	0.98	Muy buena

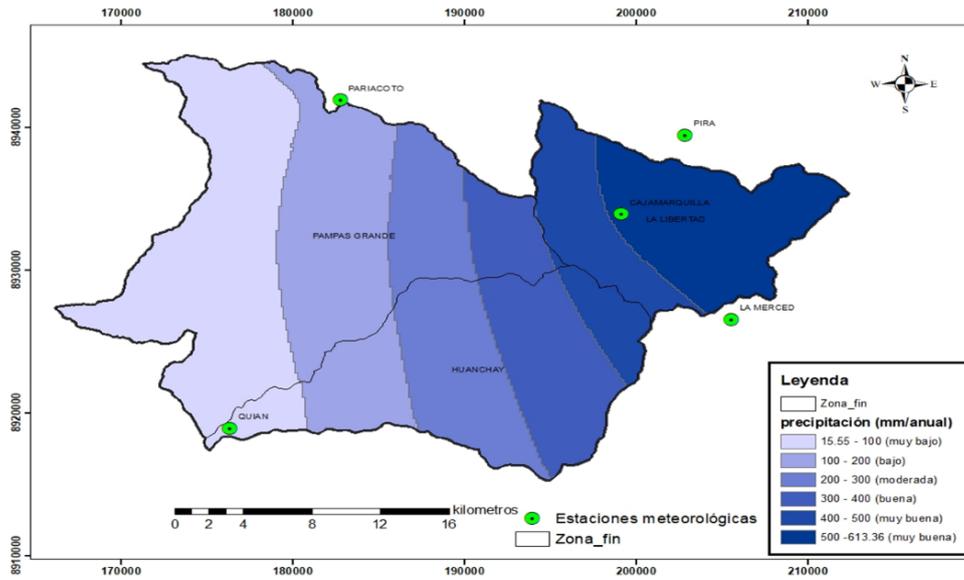


Figura 3. Precipitación clasificada

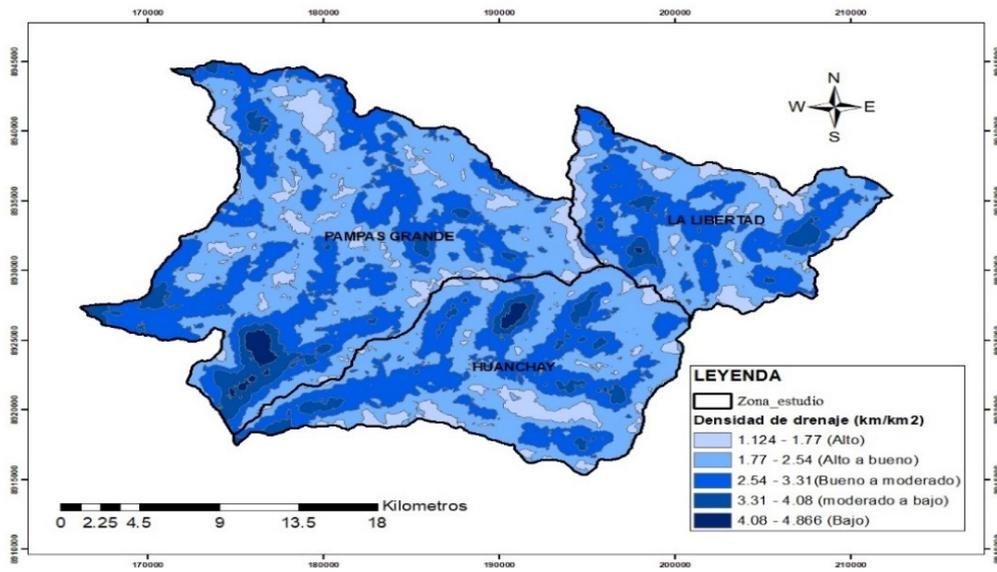


Figura 4: Mapa de densidad de drenaje

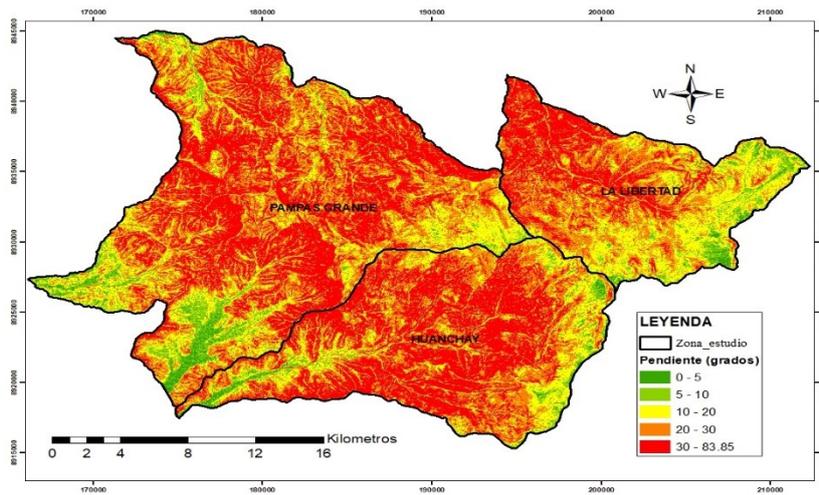


Figura 5: mapa de pendientes

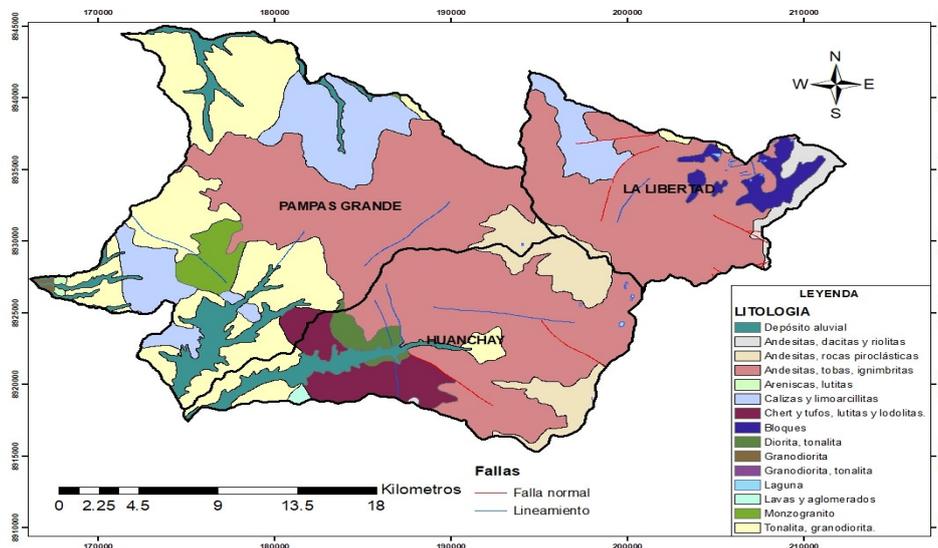


Figura 6: mapa de litología

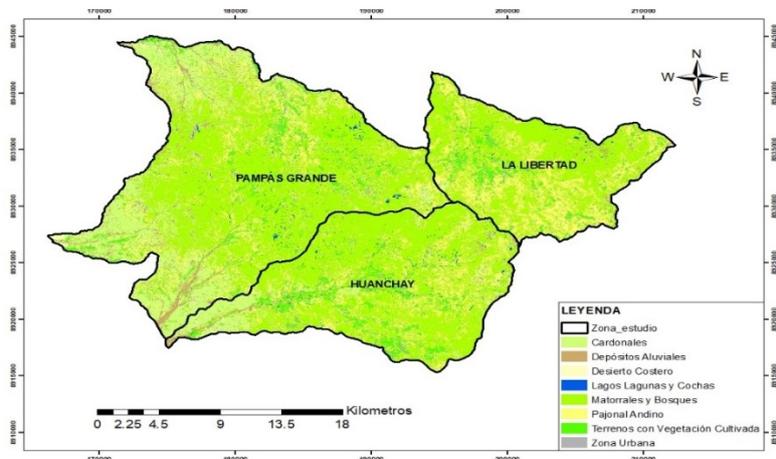


Figura 7: mapa de uso actual de suelos



Figura 8: Mapa de suelos según FAO

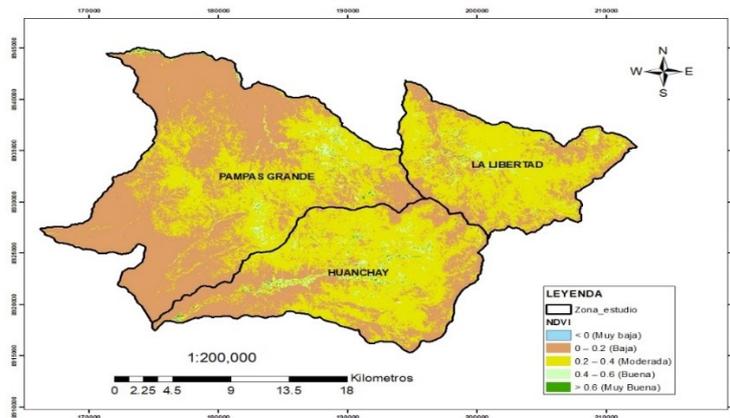


Figura 9: Mapa de NDVI

## Integración de mapas

### Ponderación con matriz de Saaty

Para la integración de los mapas temáticos se decidió usar el método de proceso de análisis jerárquico o matriz de Saaty [14], por lo que este método está fundamentado en la evaluación de diferentes criterios basados en las experiencias en campo, sin embargo, para reducir el sesgo de las ponderaciones se toma en cuenta la normalización [7] y [20]. 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 sólida de decisiones [17].

En aguas subterráneas se usa para evaluar la importancia relativa de diferentes factores que afectan la gestión y la conservación de los recursos hídricos. Por lo que las prioridades

de las variables (mapas temáticos) dentro de cada sección de la jerarquía se logra evaluando en forma pareada entre ellos con el fin de delimitar zonas con potencial de agua subterránea [7].

En la

**Tabla 11** se compara los criterios en pares y se asigna una escala de valores que van desde 1 hasta 9 para indicar la importancia relativa de cada elemento de las siete variables que se tomaron en cuenta para la delimitación de las zonas con potenciales de agua subterránea en los distritos de Pampas Grande, Huanchay y La Libertad.

**Tabla 11:** Matriz de comparación de variables

	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendiente	Geología	Suelos	Uso Actual de Tierras	NDVI
<b>Precipitación</b>	1	2	6	2	3	2	3
<b>Densidad de drenaje</b>	1/2	1	7	1/2	5	1/3	5
<b>Pendiente</b>	1/6	1/7	1	1/4	1/3	1/4	1/4
<b>Geología</b>	1/2	2	4	1	2	2	2
<b>Suelos</b>	1/3	1/5	3	1/2	1	1/4	2
<b>Uso Actual de tierras</b>	1/2	3	4	1/2	4	1	4
<b>NDVI</b>	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

**Tabla 12: Método de integración de mapas**

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

Mediante el ajuste de la relación de consistencia (RC), medida que se utilizó para verificar las comparaciones de importancia relativa de las siete variables sean consistentes y lógicas, donde la relación de consistencia debe ser menor al 10% ( $RC < 0.1$ ). La relación de consistencia se calculó mediante el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatoria (IA), para lo cual se utilizó valores de la Ecuación 1 [1]

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

$$IC = \frac{7.69 - 7}{7 - 1} \rightarrow IC = 0.096$$

**Tabla 13: Valores para el índice de consistencia [1]**

<b>n</b>	3	4	5	6	7	8
<b>IA</b>	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404

$$RC = \frac{0.11}{1.341} = 0.086$$

## **Generación del mapa para la prospección de agua subterránea**

La delimitación de las áreas con probables potenciales de aguas subterráneas fue realizada mediante la combinación de las siete variables representadas por sus respectivos mapas temáticos, así como sus respectivos factores expresados numéricamente. El propósito del estudio fue identificar áreas que pudieran mostrar potencial para la exploración de aguas subterráneas.

Se seleccionaron siete factores condicionantes de la presencia de aguas subterráneas basados en trabajos similares. En la Tabla 14, se muestra los rangos asignados y los pesos normalizados, así mismo los factores individuales varían de 1 a 5, donde 1 es muy bajo y 5 muy alto.[8],[13],[9] y [15].

Tabla 14, detalla la ponderación de cada variable orientada a delimitar zonas para prospectar aguas subterráneas.

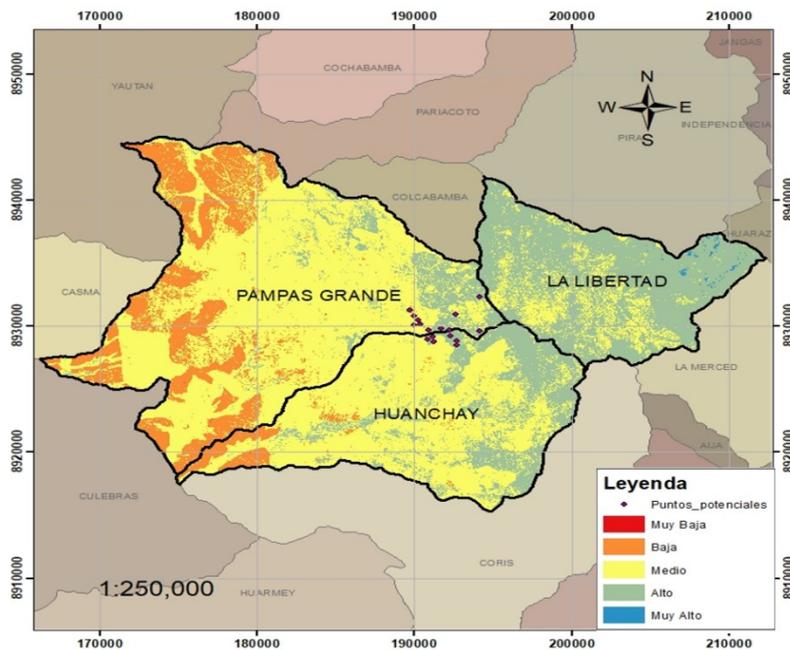
Para la superposición de los mapas temáticos se usó la herramienta “Weighted Overlay” del ArcGis, que superpone varios rásteres con una escala de medición, factores y orden de importancia.

Tabla 14: Pesos asignados y normalizados para la prospección de aguas subterráneas

<b>Variable</b>	<b>Rango Asignado (%)</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Perspectiva de agua subterránea</b>	<b>Peso</b>
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

<b>Variable</b>	<b>Rango Asignado (%)</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Perspectiva de agua subterránea</b>	<b>Peso</b>
		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
		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

**Figura 10:** Mapa de zonas con alta probabilidad para prospectar aguas subterráneas en la zona de estudio



## Resultados y discusión

### Mapa con potencial de agua subterránea

El mapa resultante de la delimitación de zonas con alta probabilidad de encontrar aguas subterráneas se muestra en la Figura 10, en cual fue definido mediante el proceso de análisis jerárquico. Las zonas con alto potencial de agua subterránea se localizan en las partes altas donde predominan las andesitas, tobas e ignimbritas, así como piroclásticos, areniscas y lutitas con presencia fracturas y fallas. Además, demarca zonas en las que hay presencia de matorrales, bosques y terrenos con vegetación cultivada los que favorecen la recarga del acuífero. Por otro lado, se evidencian pendientes altas de 15° a 35° que favorecen al escurrimiento por ende restringen la recarga; sin embargo, en el tipo de suelo *lithosols* y *chernozems*, 60% arena en la superficie y 40% limo que favorecen la infiltración y consecuentemente la recarga.

Las zonas con potencial muy alto de localizar acuíferos tienen 0.68 km<sup>2</sup> de superficie, se localizan en las partes altas de La Libertad y Huanchay. Mientras que las zonas con

potencial alto de ubicar acuíferos tienen 196.35 km<sup>2</sup> de superficie localizadas también en las zonas altas de los tres distritos. Y las zonas con potencial medio de ubicar acuíferos es de 412.86 km<sup>2</sup> de superficie, de este total Pampas Grande tiene 239.53 km<sup>2</sup>, seguido por Huanchay con 148.56 km<sup>2</sup> y finalmente La Libertad con 24.77 km<sup>2</sup>. Consideramos que las zonas con potencial muy alto y alto son las que se deben ser priorizadas para trabajos de exploración indirecta y directa.

En realidad, las zonas con los potenciales de agua subterráneas descritos, corresponden a acuíferos fracturados debido a su relación directa con la presencia afloramientos en forma dispersa, así como la presencia de afloramientos de rocas fracturadas y fallas geológicas locales. En la Figura 10, se ilustra el mapa potencial de agua subterránea y en la Tabla 15 los resultados por cada distrito.

**Tabla 15 clasificación de la zona potencial de agua subterránea por distritos**

<b>Distrito</b>	<b>Descripción</b>	<b>área (km2)</b>	<b>Área (%)</b>
La Libertad	medio	24.77	16.66
	Alto	123.28	82.89
	Muy Alto	0.68	0.46
	<b>Total</b>	<b>148.73</b>	<b>100</b>
Pampas Grandes	Muy Baja	0.011	0.003
	baja	89.54	25.41
	Medio	239.53	67.97
	Alto	23.31	6.61
	<b>Total</b>	<b>352.39</b>	<b>100</b>
Huanchay	Muy Baja	0.001	0.001
	baja	10.99	5.254
	Medio	148.56	70.97
	Alto	49.76	23.77
	Muy Alto	0.002	0.001
<b>Total</b>	<b>209.32</b>	<b>100</b>	

### **Verificación de resultados**

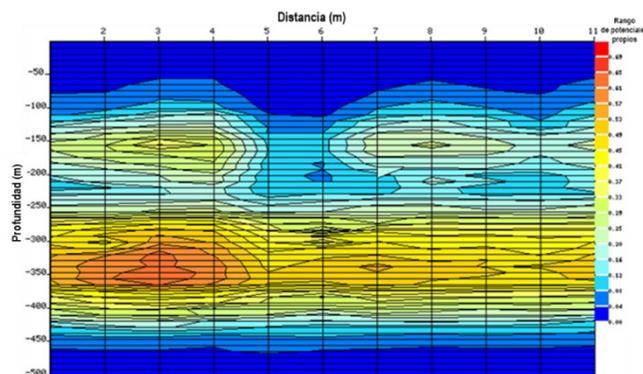
Con fines de verificación de resultados, se efectuaron ensayos geoeléctricos para la exploración indirecta de aguas subterráneas, para ello se utilizó en equipo S500 (detector

de agua subterránea PQWT-S500M). Los resultados que proporciona son la variación de los potenciales propios (mV) con la profundidad (m).

### Sección geoelectrica - Sondaje 1

En la Figura 11, 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 se muestra potenciales propios entre 0.08 hasta 0.16 mV, hasta 230 m 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 roca competente prácticamente secos.

**Figura 11:** Sección geoelectrica – sondaje 1

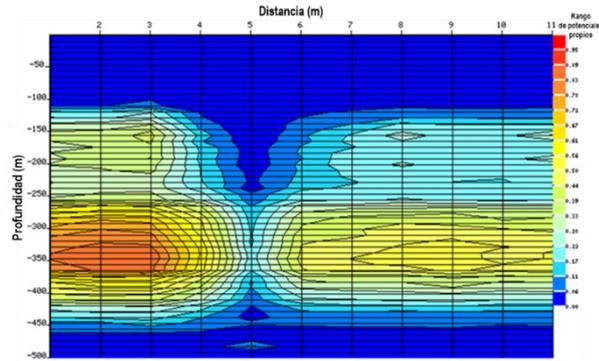


### Sección geoelectrica - Sondaje 2

En la sección geoelectrica de la Figura 12, 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 fluvioglacial, 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.

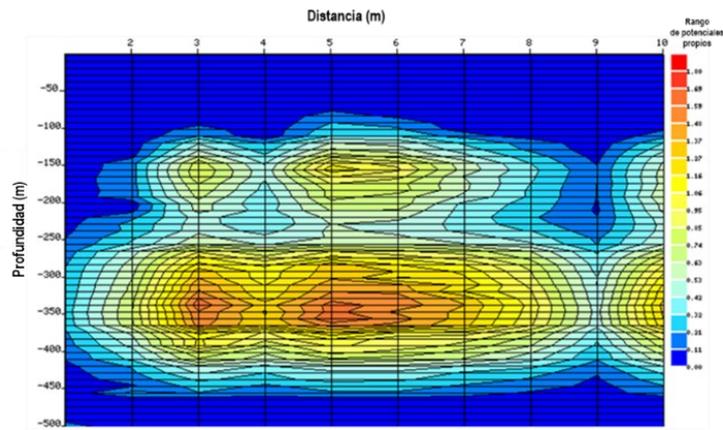
**Figura 12:** Sección geoelectrica – sondaje 2



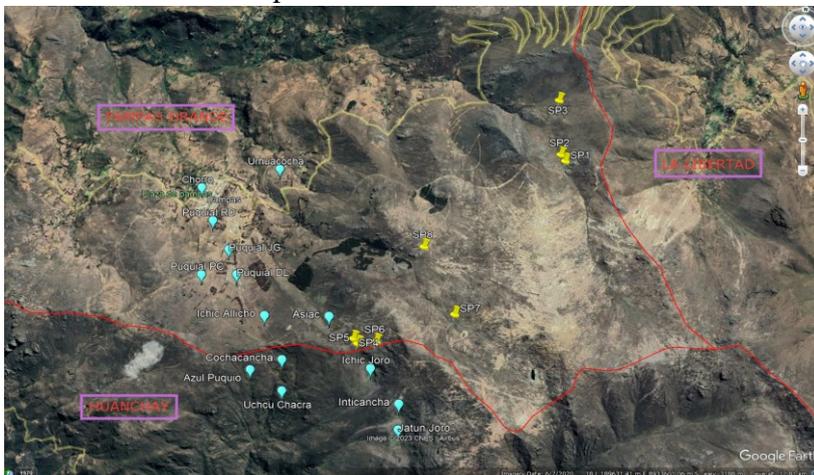
### Sección geoelectrica - Sondaje 3

En la sección de la Figura 13, 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

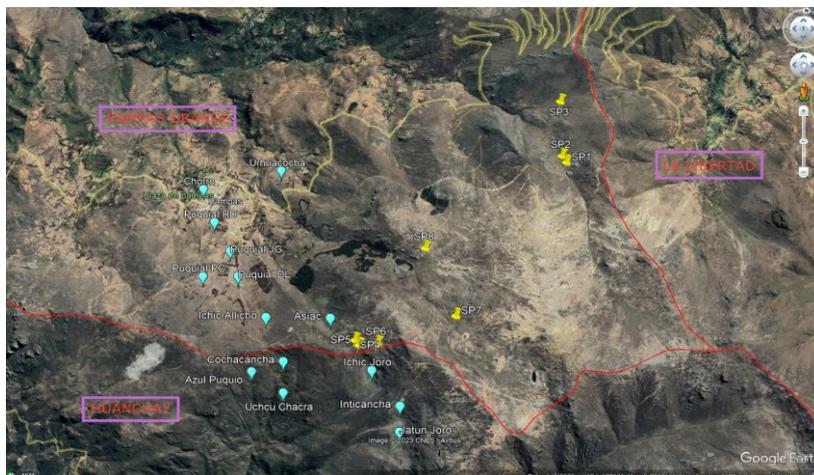
**Figura 13:** Sección geoelectrónica – sondaje 3



Por otro lado, en la etapa de campo se logró identificar algunos afloramientos los mismos que se muestran en la



**Figura 14.** Donde los sondajes y los afloramientos hallados nos permitirán corroborar con cierto grado de certeza las probables zonas para explorar agua subterránea.



**Figura 14:** Puntos de afloramiento y ubicación de exploración geofísica

## 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 proceso de jerarquización analítica ha sido utilizado para analizar problemas complejos de decisión espacial, es así que para determinar el peso de cada capa se han considerado las variables que tuvieron mayor incidencia en la recarga de acuíferos y/o infiltración del agua al subsuelo como la “precipitación” con 26% de incidencia por lo que contribuye a la recarga de los acuíferos, uso actual de suelos con 20% para identificar el tipo de uso que tiene la zona, “densidad de drenaje” con 18% para identificar las área de infiltración y escurrimiento, “geología” con 18% que indica el nivel de permeabilidad; fueron considerados como principales influyentes en la infiltración del agua. Por otro lado, fue necesario considerar a tipo de “suelos” con 8% para considerar la recarga de la infiltración del agua, el “Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)” con 7% para indicar las zonas de vegetación que acumulan la humedad en el suelo y la “pendiente” con 3% debido a que repercute en la intensidad de recarga, puesto que a pendientes altas se tiene menos infiltración de agua. Finalmente, la ecuación queda definida como:  
$$25.92 * \text{precipitación} + 18.06 * \text{densidad de drenaje} + 3.22 * \text{pendiente} + 18.34 * \text{Geología} + 7.75 * \text{suelos} + 19.76 * \text{Uso actual de suelos} + 6.96 * \text{índice de vegetación de diferencia normalizada}.$$
- Mediante la técnica de la teledetección jerarquizada se han identificado cinco categorías con probabilidades de localizar fuentes de agua subterráneas para su exploración considerando como: “muy alto”, “alto”, “medio”, “bajo” y “muy bajo”. De esta manera, el distrito Pampas Grande tiene como zona “muy baja” 0.003% (0.01 km<sup>2</sup>) y “baja” con 25.41% (89.54 km<sup>2</sup>) en las partes más bajas del distrito; “media” con 67.97% (239.52 km<sup>2</sup>) y “alta” con 6.61% (23.31 km<sup>2</sup>) en las partes más altas. Huanchay tiene como zona

“muy baja” 0.001% (0.001 km<sup>2</sup>), “baja” con 5.25% (10.99 km<sup>2</sup>) en las partes más bajas del distrito, con zona “media” con 70.97% (148.56 km<sup>2</sup>), “alta” con 23.77% (49.76 km<sup>2</sup>) y “muy alta” con 0.001% (0.01 km<sup>2</sup>), estas categorías se ubican en las partes medias a altas de este distrito. Finalmente, el distrito de La Libertad posee como zona “media” un 16.66% (24.77 km<sup>2</sup>), cerca al cauce de los ríos y la zona “alta” con 82.89% (123.28 Km<sup>2</sup>), “muy alta” con 0.46% (0.68 km<sup>2</sup>) en las partes de recarga al cauce del río. m<sup>2</sup>). Asimismo, la zona clasificada como “media” que cubre 412.85 Km<sup>2</sup> que representa el 58.1% del total del área de estudio y “alto” cubre el 27.6% (196.35 km<sup>2</sup>) son las áreas predominantes del área de estudio según la clasificación otorgada los cuales fueron validados con la exploración indirecta en campo y la identificación de puntos de agua como lagunas, manantiales y afloramientos.

- La etapa de exploración en campo permitió validar la ubicación de zonas con alta probabilidad de prospectar aguas subterráneas mediante la exploración geofísica en ocho puntos hasta 500 m de profundidad. De ocho puntos geoelectrónicos evaluados, tres han sido considerados como puntos aptos para explorar agua subterránea. El agua subterránea en el SP-1 se localiza entre 75m a 230m de profundidad con potencial propio que varía entre (0-0.16 mV), en el SP-2, la profundidad del agua se halla entre 110 a 500 m, es favorable debido a la presencia de falla que conduce agua hacia el medio fracturado. Finalmente, el punto SP-3 es similar a los expuesto para SP-2. Los trabajos de exploración geofísica han sido complementados con el inventario de 14 afloramientos de agua subterránea, lo que muestran un buen ajuste con los resultados de la teledetección jerarquizada.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00255-2).
- [2] Alaska, ASF. (2014). ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction – ASF. [https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/#DEM\\_Information](https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/#DEM_Information)
- [3] 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. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i1.1893>
- [4] Casimiro, W. S. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú, Guia explicativa. [https://idsep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/api/records/8266683e-dc79-413e-bbd2-aca640b1f1e8/attachments/Atlas-zonas-vida-Per%C3%BA-gu%C3%ADa-explicativa\\_2017.pdf](https://idsep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/api/records/8266683e-dc79-413e-bbd2-aca640b1f1e8/attachments/Atlas-zonas-vida-Per%C3%BA-gu%C3%ADa-explicativa_2017.pdf)
- [5] FAO. (1980). Mapa Mundial de Suelos de FAO/UNESCO | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faounesco/es/>
- [6] Fonseca, M. Sc. S. (2019). Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica chillón. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Autoridad Nacional Del Agua, 445. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4628>
- [7] 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. *https://Doi.Org/10.1080/10106049.2016.1232314*, 33(2), 105–129. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1232314>
- [8] 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*, 2018(51), 135–145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- [9] 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. <https://doi.org/10.1007/S11269-010-9749-Y>
- [10] 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* 2016 30:12, 30(12), 4293–4310. <https://doi.org/10.1007/S11269-016-1421-8>
- [11] Mejía Marcacuzco, J. A. (2012). *Hidrología aplicada*.
- [12] Musa, K. A., Akhir, J. M., & Abdullah Ibrahim. (2017). Groundwater Prediction Potential Zone in Langat Basin using the Integration of Remote Sensing and GIS. <https://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS2000/Papers/PS300-18.htm>
- [13] 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. <https://doi.org/10.1007/S12517-014-1668-4>
- [14] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1980). Hierarchical analysis of behavior in competition: Prediction in chess. *Behavioral Science*, 25(3), 180–191. <https://doi.org/10.1002/BS.3830250303>
- [15] 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 Informatics* 2015 9:2, 9(2), 137–150. <https://doi.org/10.1007/S12145-015-0242-2>
- [16] SENAMHI. (2020). Mapa Climático del Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-climatico-v2/#>

- [17] 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. <https://doi.org/10.1007/S10040-004-0378-5>
- [18] Shabani, M., Masoumi, Z., & Rezaei, A. (2022). Assessment of groundwater potential using multi-criteria decision analysis and geoelectrical surveying. <Http://Www.Tandfonline.Com/Action/JournalInformation?Show=aimsScope&journalCode=tgsi20#.VsXpLiCLRhE>, 25(4), 600–618. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2069052>
- [19] Sherrill, M. G. (n.d.). *Geology and Ground Water in Door County, Wisconsin, with Emphasis on Contamination Potential in the Silurian Dolomite Prepared in cooperation with the Wisconsin Department of Natural Resources UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, WASHINGTON. 1978.*
- [20] Taoufikallah, A. (2018). ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SEVILLA UNIVERSIDAD DE SEVILLA CAPÍTULO 4: El método AHP 4.1 Introducción.
- [21] Delgadillo, A. & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008). *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties. Mérida: FUNDAPRIS.*
- [22] Fuentes Junco, J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. México: Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE)*