



**UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Agua

Carrera Geociencias

**Zonas con potencial de exploración de aguas  
subterráneas, utilizando técnicas de análisis  
jerárquico, SIG y Teledetección en la Demarcación  
Hidrográfica Manabí, Ecuador.**

Luis Adrian Roman Piedra

Tena, Marzo 2022.

Napo, Ecuador.

## **Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad**

Tena 14, de diciembre de 2021

Yo, Luis Adrian Roman Piedra con documento de identidad N°1104778277, declaró que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,  
Atentamente,

Firma:



---

Luis Adrian Roman Piedra

## **Certificado de dirección de trabajo de integración curricular**

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas, utilizando técnicas de análisis jerárquico, SIG y Teledetección en la Demarcación Hidrográfica Manabí, Ecuador”, en la modalidad de: proyecto de investigación en formato artículo original, fue realizado por: *Luis Adrian Roman Piedra*, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 14 de Diciembre de 2021

Firma:



.....  
Bryan Guido Valencia Castillo  
C.I.:1760101632  
Pasaporte: 6726087

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a Dios por brindarme salud, para culminar con esta maravillosa etapa. Seguido agradezco a mi familia, con especial mención a mis padres y hermanos, que representan un pilar fundamental de fortaleza, respaldo y apoyo incondicional, en mi vida.

También agradecer a mi alma mater, Ikiam, por haberme formado profesionalmente con una visión crítica y ligada a la investigación en pro de servir a la sociedad.

A todos los docentes que fueron parte de mi proceso de formación como profesional, gracias totales. De manera especial, un cordial agradecimiento a mi tutor el PhD. Bryan Guido Valencia, quien fue mi guía y supo compartirme los conocimientos necesarios para poder culminar el presente trabajo de integración curricular.

Por la disponibilidad de datos, se agradece al Sistema Nacional de Información (SNI), Instituto Geológico Militar (IGM), Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), por la disponibilidad de datos.

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi madre Hypatia Elizabeth quien me enseñó a nunca darme por vencido, quien jamás dejo de creer en mí, y a quien le debo todo en la vida. A mis hermanos Etzequiel y Nicolas por ser mi motivación para seguir adelante. A mi abuelito Gonzalo, aunque ya no estas terrenalmente con nosotros, vives dentro de mi corazón, este logro va para ti.

## INDICE GENERAL

PORTADA.....	i
DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD....	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA .....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN: .....	ix
ABSTRACT .....	x
Artículo desarrollado de acuerdo a las directrices editoriales de publicación de revista indexada. (Revista de Teledetección Española) .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Área de Estudio .....	3
2. Datos y métodos .....	5
2.1 Generación de capas temáticas.....	6
2.1.1. Permeabilidad.....	6
2.1.2. Precipitación.....	7
2.1.3. Densidad de Drenaje.....	8
2.1.4. Pendiente de Terreno.....	9
2.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizado.....	10
2.2 Asignación de pesos normalizados.....	12
2.3 Pesos Normalizados para las capas temáticas .....	14
2.4 Índice de Potencialidad de agua subterránea.....	15
2.5 Mapa de zonas potenciales para la exploración de agua subterránea.....	15
3. Resultados.....	16
3.1 Zonas potenciales para la exploración de aguas subterráneas.....	16
3.2 Validación del Mapa Resultante.....	17
4. Discusión.....	18
5. Conclusiones .....	19
6. Referencias .....	21

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de la información geográfica a utilizar. Tipo, fuente, escala de información, año y escala de impresión de las capas utilizar...	5
Tabla 2. Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP.....	13
Tabla 3. Pesos normalizados para cada capa temática. ....	13
Tabla 4. Pesos normalizados y rankings para cada capa temática.....	14
Tabla 5. Número y porcentaje de puntos de agua por GWPI.....	18

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de Estudio - Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	3
Figura 2. Metodología para determinar las zonas potenciales de agua subterránea en Demarcación Hidrográfica Manabí.....	6
Figura 3. Mapa de permeabilidad de la roca de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	7
Figura 4. Mapa de precipitación de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	8
Figura 5. Mapa de densidad de drenaje de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	9
Figura 6. Pendiente del terreno de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	10
Figura 7. Mapa del NDVI de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM).....	12
Figura 8. Mapa de potencial para la exploración de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica Manabí.....	16
Figura 9. Mapa de Validación del potencial para la exploración de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica Manabí.....	17

## **Resumen**

Se cartografió la Demarcación Hidrográfica Manabí para encontrar las áreas potenciales para la exploración de aguas subterráneas, a partir de imágenes satelitales, un modelo digital de elevaciones, distribución espacial de la precipitación y las características geológicas de la zona. La metodología se basó en un proceso de Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) aplicado a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Como resultado se obtuvo el índice de potencial de aguas subterráneas (GWPI), que posteriormente fue utilizado como base del mapa de potencial de exploración de aguas subterráneas. Luego, utilizando los datos del inventario de puntos de agua del Ecuador, se validó el mapa resultante, realizando un análisis de superposición. A partir del cual se obtuvo una efectividad del 77.4% puesto que el mismo porcentaje de puntos de agua se encuentran en zonas con potencial favorable dentro del área de estudio.

**Palabras clave:** Hidrogeología, SIG, AHP, GWPI, Manabí, agua subterránea

## **Abstract**

The Manabí Hydrographic Demarcation was mapped to find potential areas for groundwater exploration, based on satellite images, a digital elevation model, spatial distribution of precipitation and geological characteristics of the area. The methodology was based on a process of Hierarchical Weighted Analysis (AHP) applied to Geographic Information Systems (GIS). As a result, the groundwater potential index (GWPI) was obtained, which was subsequently used as the basis for the groundwater exploration potential map. Then, using data from the inventory of water points in Ecuador, the resulting map was validated by performing an overlap analysis. From which an effectiveness of 77.4% was obtained since the same percentage of water points are located in zones with favorable potential within the study area.

**Keywords:** Hydrogeology, SIG, AHP, GWPI, Manabí, groundwater

## **1 Introducción:**

El agua subterránea es un recurso treinta veces más abundante que el agua superficial (Burbano et al., 2015). Además, es de mucha importancia en las poblaciones que viven en zonas con climas secos y áridos, llegando a representar la única fuente de abastecimiento ((Vasanthavigar et al., 2012) En Ecuador el estudio del agua subterránea ha sido poco desarrollado. Se presume que una de las posibles causas de su limitado uso, es la gran cantidad de cuerpos de agua superficiales en la región Andina los que son de fácil acceso para abastecer a las poblaciones (Burbano et al., 2015).

Por otra parte, la región costanera de Ecuador es una de las más afectadas por la falta de agua (Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2014). Posee zonas con un déficit hídrico dependiendo de su ubicación geográfica, este es el caso de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM). Esta demarcación tiene algunos factores que acentúan su constante déficit hídrico, una de ellas es su ubicación geográfica que la hace propensa a cambios radicales en sus indicadores climáticos, al ser afectados directamente por corrientes marinas como: la Corriente Fría del Humboldt y la Corriente Cálida del Niño (Campos & Mendoza, 2018). Otro factor es que la DHM no recibe aguas provenientes de la Cordillera de los Andes, y, presenta una precipitación anual baja (300 - 1800 mm), temperatura anual entre (23 - 26°C) y clima que varía entre templado (subtropical, seco subtropical y tropical húmedo) (Zambrano, 2020).

En el 2011 el Programa Mundial de Alimentos, publicó que Ecuador perdió alrededor de 4 mil millones de dólares por causa de las sequías en las últimas décadas. Siendo la provincia de Manabí la principal afectada. El sector agrícola de la provincia registro perdidas de alrededor de 262 millones de dólares en 2009, omitiendo la perdida en el sector ganadero debido a la falta de datos (Carvajal & Rodriguez, 2010). Actualmente el uso del suelo de la DHM es utilizado para actividades agropecuarias, alcanzando alrededor de un 67% (Zambrano, 2020). Actividades que se ven constantemente amenazadas, por la falta de información hidrológica validada, que permita explorar fuentes de agua alternas como el agua subterránea.

Saaty, (1980) propuso un método de análisis jerárquico ponderado el cual posteriormente serviría para resolver problemas multicriterio complejos. Con los avances tecnológicos en sistemas de información geográfica y teledetección se han desarrollado herramientas para facilitar el área investigativa, y reducir costos exploratorios de acuíferos permitiendo organizar la información de manera gráfica y georreferenciada (Hernández, 2010). Castaño, (1999) combinó las técnicas de Teledetección y los SIG para desarrollar una metodología operativa para ubicar y cuantificar, con un coste relativamente bajo, las extracciones de agua subterránea en busca de mitigar las crecientes demandas agrícolas logrando una buena aproximación a los valores reales. Hernández, (2010) generó una metodología para la construcción de mapas temáticos de prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos de forma tradicional, permitiendo un primer acercamiento para la ubicación de acuíferos en un territorio de estudio.

Por otra parte, en Ecuador, (Macas & López, 2018) cartografiaron la Demarcación Hidrográfica Puyango-Catamayo. Investigación donde se implementó una metodología aplicada a los SIG (Nampak et al., 2014 ; Hernández, 2010) utilizando el análisis jerárquico ponderado, para dar solución a un problema de prospección complejo como la prospección de agua subterránea. Como resultado se obtuvo el mapa del Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas (GWPI) en una determinada área (DHPC). Años más tarde Chonlong & Pacheco, (2021) estimaron el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Portoviejo mediante AHP basado en SIG y Teledetección.

Ante la problemática expuesta sobre el constante déficit hídrico y como esto influye en pérdidas económicas en el agro de la DHM, se propone generar información hidrográfica validada utilizando datos gratuitos, que sometidos a una metodología (Nampak et al., 2014 ;Hernández, 2010; Macas & López, 2018; Chonlong & Pacheco, 2021) permitirán conocer las zonas con potencial para la exploración de agua subterránea, en la DHM.

## 1.1 Área de estudio

La Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM), está ubicada en la región Costa, al noroeste del Ecuador continental entre las coordenadas geográficas ( $81^{\circ}4,9'E$   $79^{\circ}44,3'W$ ) y ( $1^{\circ}49,6'S$  -  $0^{\circ}26,1'N$ ), además está formada por diecisiete cuencas hidrográficas y pertenece a tres provincias del Ecuador (Manabí 97,7%, 2,3% Santa Elena y 1,2% Esmeraldas) como se observa en la Figura 1 (Zambrano, 2020). La división del territorio nacional en nueve Demarcaciones Hidrográficas fue establecida por la (SENAGUA, 2009) institución encargada de los recursos hídricos en el Ecuador.

La DHM tiene un área de 11 502 km<sup>2</sup>, cuenta con una población aproximada de 1.149.748 habitantes correspondiente al 7,9% de la población nacional de Ecuador (Zambrano, 2020).

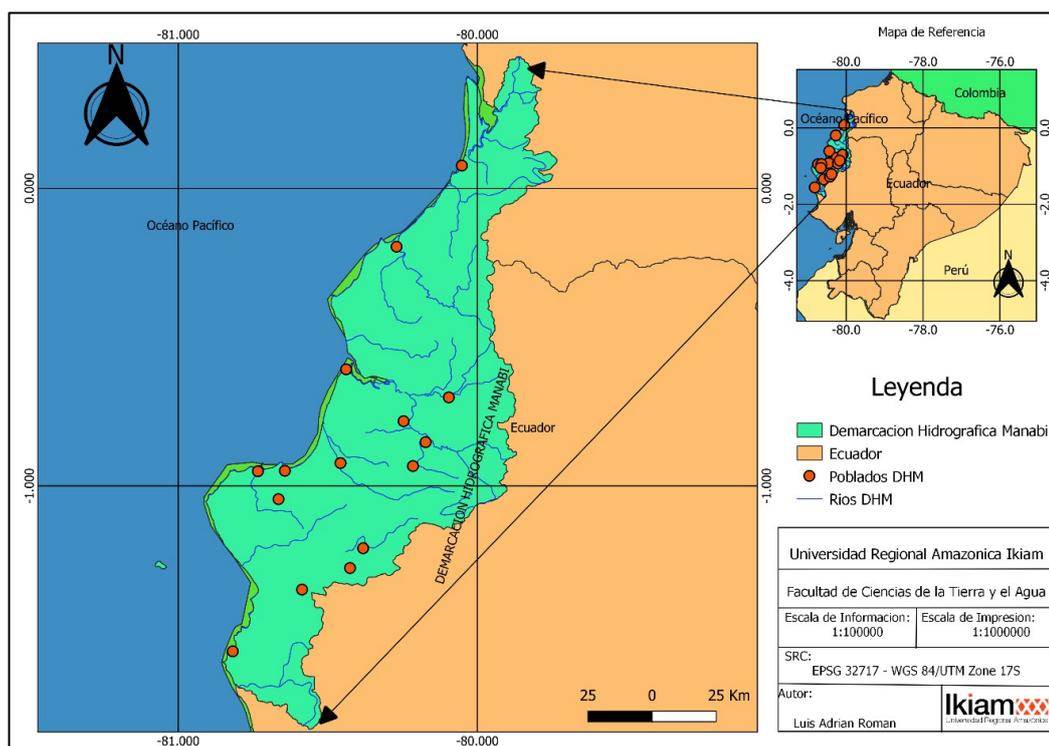


Figura 1. Área de Estudio - Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

Dentro de la demarcación se levanta la pequeña Cordillera de Chongon y Colonche con elevaciones que no superan los 700 metros de altura y de donde nacen los ríos Portoviejo, Chone, Jama (Burbano et al., 2011). La precipitación varía entre 300 a 1800 milímetros por año, presentándose los valores máximos en las zonas de alta montaña. La época lluviosa ocurre anualmente entre diciembre y mayo a excepción de los años donde se produce el fenómeno de El Niño donde las precipitaciones duplican la precipitación anual (Zambrano, 2020)

Como la DHM, no recibe aguas provenientes de los Andes, los recursos hídricos dependen directamente de las precipitaciones y de la capacidad de almacenamiento del agua subterránea (Carvajal & Rodríguez, 2010). Para disponer constantemente de los recursos hídricos, el Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Manabí (PHIMA) desde 1970 dio paso a la construcción de embalses permitiendo la regulación de caudales en épocas secas y el almacenamiento para riego en épocas lluviosas.

Sus principales ríos experimentan largos tiempos de sequías, por ejemplo, se conoce que la cuenca del río Chone sufre 5.5 meses de sequía y el río Portoviejo 7.3 meses de sequías (Campos & Mendoza, 2018). Por tanto, la explotación de los recursos subterráneos

Por tanto, la explotación de los recursos subterráneos en la última década ha ido incrementando. El INAMHI tiene un inventario de alrededor de 5000 puntos de agua (Burbano et al., 2015), de los cuales alrededor de 421 se encuentran en la DHM.

Geológicamente las cuencas de Chone-Jipijapa-Manta y Portoviejo, se hallan cubiertas por sedimentos terciarios de origen marino, con un alto contenido de minerales arcillosos. Lo que condiciona a estos estratos como formaciones geológicas capaces de almacenar agua, pero con poca capacidad de transmitirla (Burbano et al., 2011). En estas áreas afloran sedimentos cuaternarios que forman depósitos aluviales, y presentan condiciones hidrogeológicas favorables, para el almacenamiento de agua, pero teniendo como limitantes la poca profundidad y extensión (Burbano et al., 2011). Dichas condiciones no permiten alcanzar buenos rendimientos de caudal.

## 2 Datos y Métodos

Toda la información procesada es de libre acceso y fue analizada en el software de uso libre QGIS3 y QGIS GRASS 7.8.5.

El cálculo del potencial de agua subterránea, se obtuvo utilizando las capas que se muestran en la Tabla 1 y la metodología presentada en la Figura 2. Las capas fueron analizadas mediante un Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) según lo publicado por (Rahmati et al., 2015). A partir del GWPI, se cartografió la Demarcación Hidrográfica Manabí y se obtuvo el mapa de zonas con potencial de exploración de aguas subterráneas.

Tabla 1. Descripción de la información geográfica a utilizar. Tipo, fuente, escala de información, año y escala de impresión de las capas a utilizar

<i>Capas</i>	<i>Tipo</i>	<i>Fuentes</i>	<i>Escala información</i>	<i>Año</i>	<i>Escala de impresión</i>
<i>Permeabilidad de la Roca</i>	Shape	MAGAP	1:100000	2005	1:1000000
<i>Precipitación</i>	Shape	MAE	1:50000	2012	1:1000000
<i>Densidad de Drenaje</i>	Raster	STRM	30 metros	2014	10 metros
<i>Pendiente Terreno</i>	Raster	STRM	30 metros	2014	10 metros
<i>NDVI</i>	Imagen satelital	Landsat 8	30 metros	2019	30 metros
<i>Pozos de agua</i>	Shape	INAMHI	1:50000	2010	1:1000000

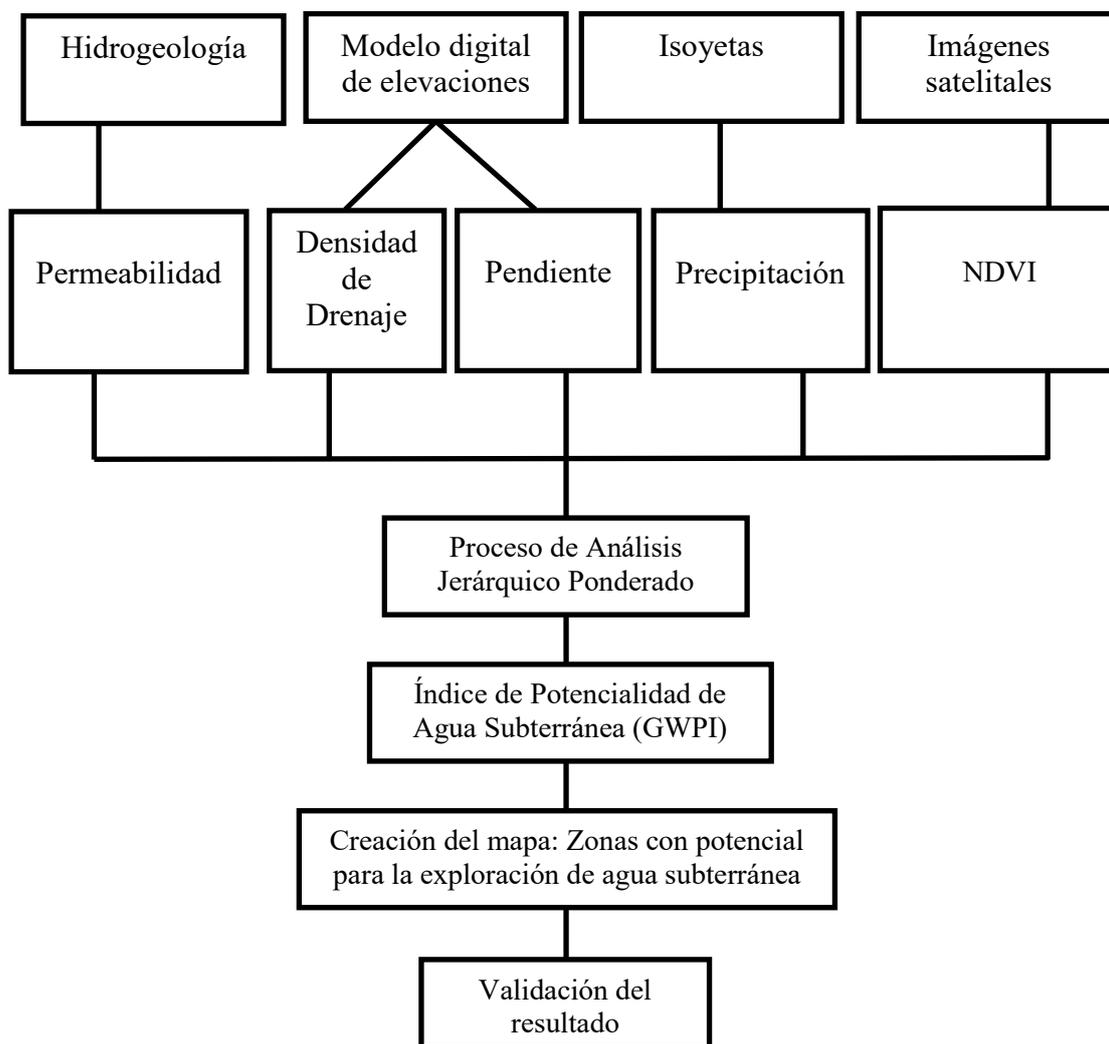


Figura 2. Metodología para determinar las zonas potenciales de agua subterránea en Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

## 2.1 Generación capas temáticas.

### 2.1.1 Permeabilidad

El MAGAP generó en 2005 la capa de Hidrogeología del Ecuador con escala 1:100000, a partir de la cual se obtuvo la capa de permeabilidad de la roca para la DHM (Figura 3). La información es de libre acceso y puede ser consultada en la web del SNI. Según (Burbano et al., 2011) la capacidad de conducción de agua en las rocas, depende directamente del volumen de poros, teniendo que las arenas y gravas son generalmente rocas con buena permeabilidad, por otra parte, las arcillas son impermeables.

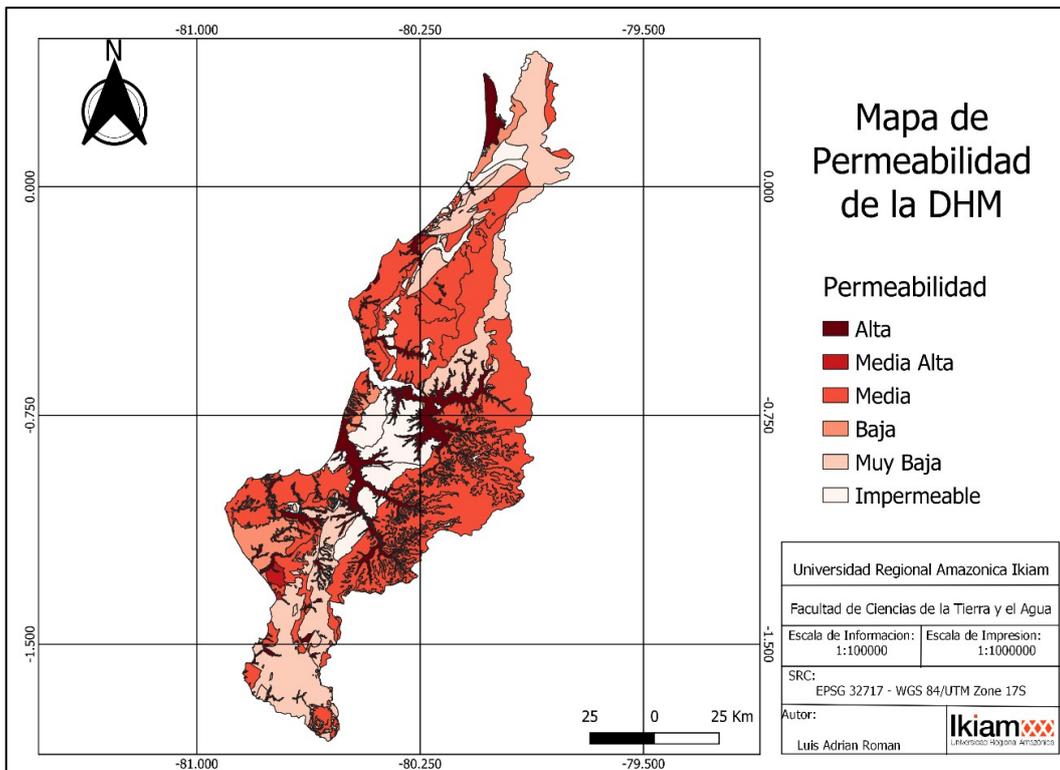


Figura 3. Mapa de permeabilidad de la roca de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

### 2.1.2 Precipitación

La capa de precipitación de lluvia fue generada por el MAE dentro del Proyecto Nacional Bioclimático en el año 2012. Tiene una escala de 1:50000 y toma como base de datos los promedios anuales en series de 25 años (1985-2009). La información es de libre acceso y esta publicada para el año 2012, además, se encuentra disponible en la página web del geo-portal del Instituto Geológico Militar. Nampak et al., (2014) en su estudio afirma que la cantidad de agua que se percola en un sistema de agua subterránea depende principalmente de la precipitación, siendo considerada como la principal fuente de recarga.

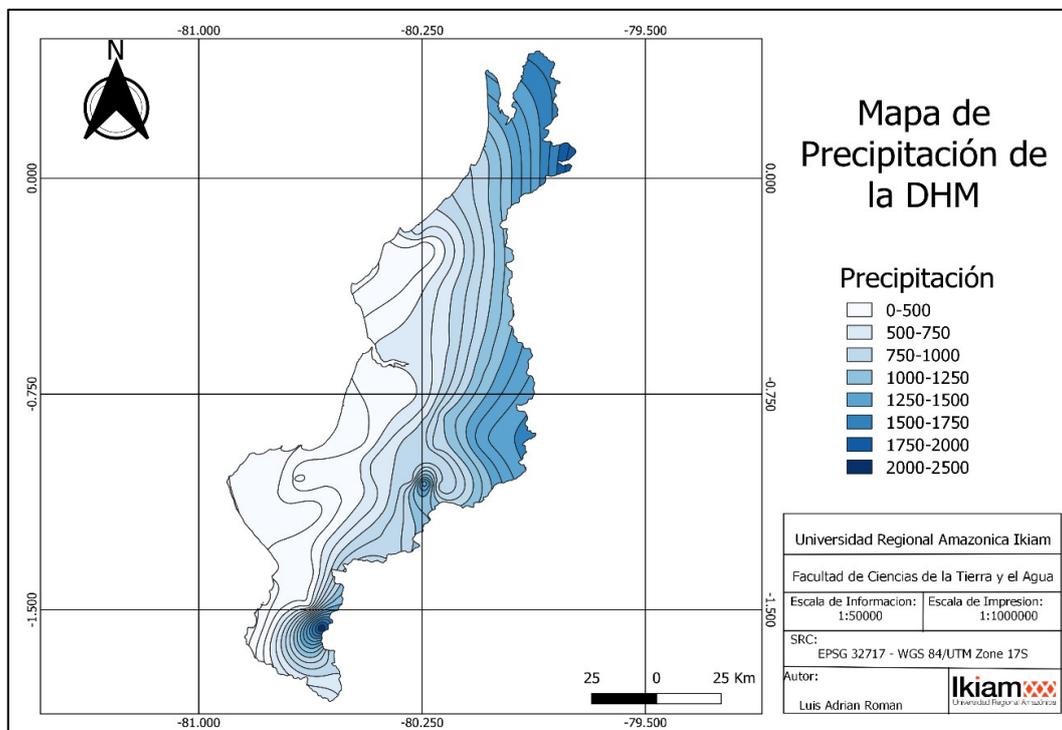


Figura 4. Mapa de precipitación de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

### 2.1.3 Densidad de Drenaje

La capa de densidad de drenaje fue generada a partir del modelo digital de elevaciones del radar STRM (*stands for Shuttle Radar Topography Mission*), el mismo que, es de libre acceso y se encuentra disponible en la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El DEM tiene una resolución de 30 metros por píxel y fue generado en 2014. La densidad de drenaje se calcula dividiendo la longitud de los cuerpos de agua, para el área de la zona de estudio (Camino et al., 2018). Para el presente caso de estudio se utilizó una herramienta para generar los drenajes a partir del DEM (*channel network and drainage basin*); y luego se usó la herramienta de interpolación (*line density*), algoritmo que calcula una medida de densidad con características lineales que se obtiene en una vecindad circular dentro de cada celda ráster. Según Agarwal & Garg, (2016) en su estudio afirma que valores de densidad de drenaje altos representan una baja posibilidad de presencia agua subterránea, mientras que los valores de densidad de drenaje bajos representan una mayor infiltración y por ende una mayor posibilidad de presencia de agua subterránea.

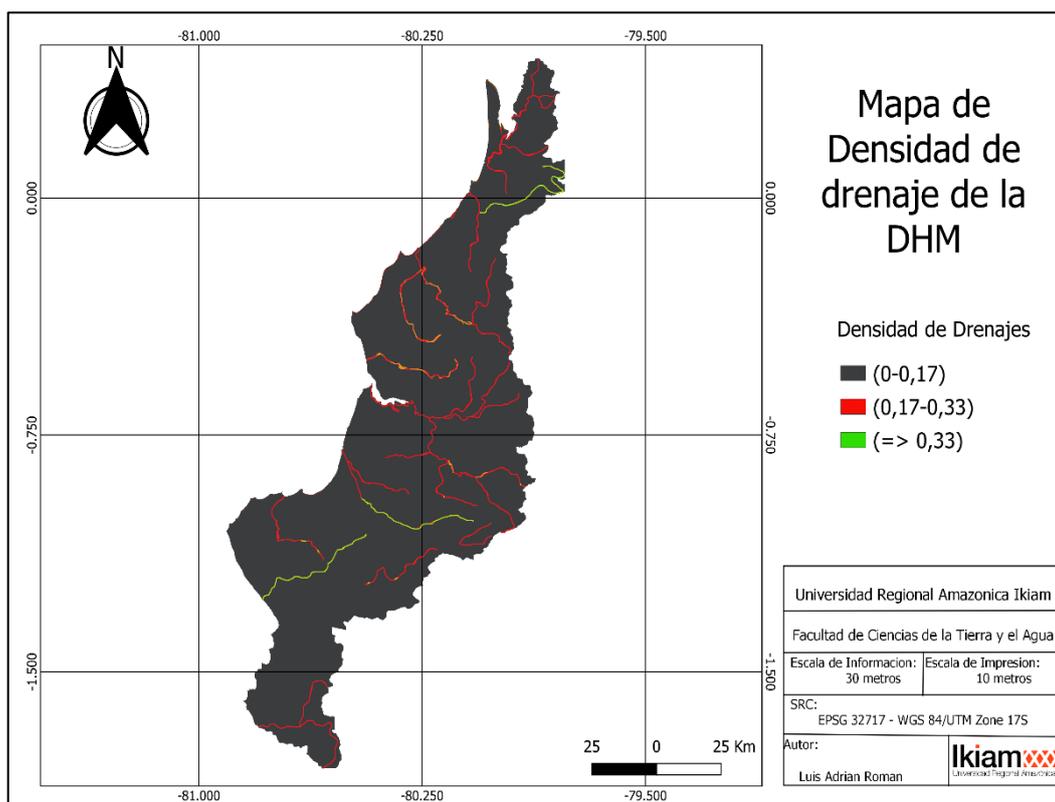


Figura 5. Mapa de densidad de drenaje de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

### 2.1.4 Pendiente del Terreno

La capa de pendiente del terreno se obtuvo partir del modelo digital de elevaciones descrito en la sección 2.1.3 y el software QGIS GRASS 7.8.5. Para la obtención de la capa se utilizó la herramienta de análisis raster (Pendiente). Al resultado se aplicó la clasificación propuesta por el (Serviço Nacional de Levantamento de Solos Conservação, 1979), como podemos observar en la Figura 6. Según (Razandi et al., 2015) el ángulo de pendiente controla el proceso de recarga, por lo que está directamente relacionado con el agua subterránea. Entonces las zonas con menor pendiente tendrán una mejor recarga de agua subterránea (Sener et al., 2005)

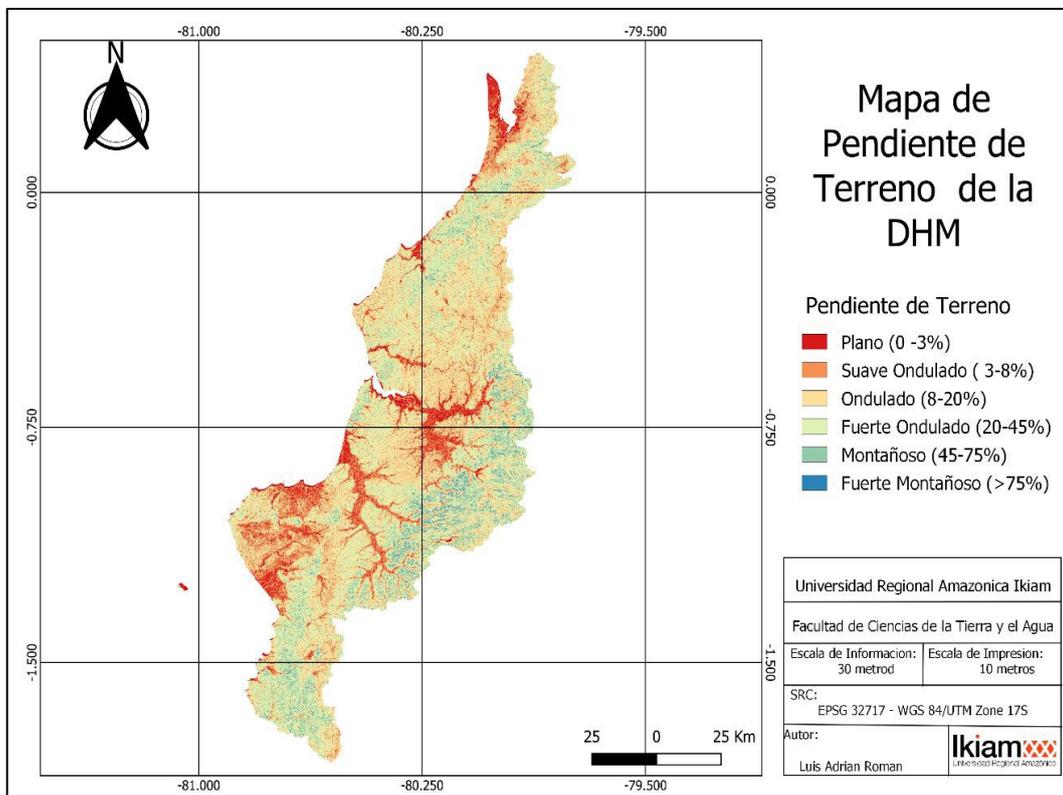


Figura 6. Pendiente del terreno de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

### 2.1.5 Índice de Vegetación de diferencia Normalizado

La capa de NDVI se obtuvo a partir de imágenes satelitales de la DHM proporcionadas por el Landsat 8, descargadas del portal oficial del Servicio Geológico de Estados Unidos. Para el tratamiento de la capa primero se realizó la corrección atmosférica, mediante el complemento de QGIS *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP). Según (Aguilar et al., 2014) este proceso se aplica a las imágenes satelitales para eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca introducida en el sensor y que se refleja en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. El satélite Landsat 8 obtiene imágenes con 11 bandas, de las cuales se usaron la banda 5 (NIR) y la banda 4 (Red) para el cálculo del NDVI donde se aplicó la ecuación 1:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

Red es la banda roja y NIR es la banda infrarroja cercana (Macas & López, 2018) Se considera que, a mayor densidad de vegetación, mayores serán los valores de NDVI, lo que se asocia con una acumulación de humedad de suelo y que los valores negativos se asocian directamente con cuerpos de agua, o lugares donde no se tiene vegetación (Muñoz, 2013), cómo podemos observar en la Figura 7.

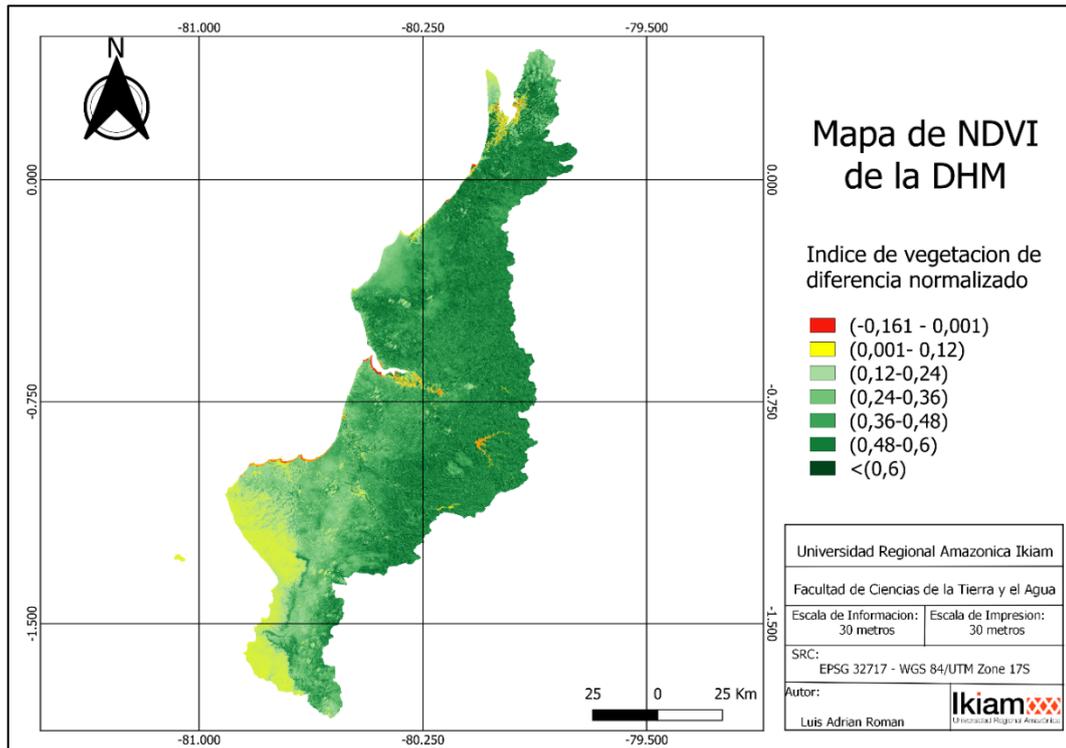


Figura 7. Mapa del NDVI de la Demarcación Hidrográfica Manabí (DHM)

## 2.2 Asignación de pesos normalizados

Teniendo en cuenta que las prospecciones de potencial de agua subterránea aplicando SIG, son procesos complejos en los cuales intervienen múltiples criterios. Se aplicó el proceso de Análisis Jerárquico Ponderado (AHP), como una de las técnicas de decisión multicriterio. Dentro de la comunidad científica los AHP están enfocados en resolver problemas complejos de recursos naturales y se han desarrollado significativamente (Rahmati et al., 2015). Se tomó en cuenta el estudio realizado por Saaty, (1980) para implementar la escala de comparación (1-9) y jerarquizar las capas temáticas. Las comparaciones para cada capa se realizaron tomando en cuenta estudios previos (Macas & López, 2018; Chonlong & Pacheco, 2021), como podemos observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP. Fuente: Macas & López, 2018

Capa	Pm	Pr	Dd	Pt	NDVI
Permeabilidad de la roca (Pm)	1	2	5	6	8
Precipitación (Pr)	1/2	1	3	3	5
Densidad Drenaje (Dd)	1/5	1/3	1	4	6
Pendiente del Terreno (Pt)	1/6	1/3	1/4	1	3
NDVI	1/8	1/5	1/6	1/3	1
Suma	2	3,9	9,4	14,3	23,0

Los pesos normalizados se validaron, calculando la relación de consistencia (CR), ecuación 2. Donde RI es un índice aleatorio de consistencia colocado según el orden de la matriz (n=5), y RI=1,12, por otra parte, el CI es el índice de consistencia en este caso CI=0,09 (Saaty, 1980)

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

Teniendo en cuenta los valores anteriores se dedujo que CR= 0,08, lo que lo vuelve un valor de relación satisfactorio y consistente. Puesto que para que un valor de CR sea consistente debe ser menor a 0,10 (Saaty, 1980). Entonces una vez generada la matriz de comparaciones y verificando la validez de los pesos se procedió a calcular el peso normalizado (W) para todas las capas. Como podemos observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Pesos normalizados para cada capa temática. Fuente: Macas & López, 2018

Capa	Pm	Pr	Dd	Pt	NDVI	W
Permeabilidad de la roca (Pm)	0,50	0,52	0,53	0,42	0,35	0,46
Precipitación (Pr)	0,25	0,26	0,32	0,21	0,22	0,25
Densidad Drenaje (Dd)	0,10	0,09	0,11	0,28	0,26	0,17
Pendiente del Terreno (Pt)	0,08	0,09	0,03	0,07	0,13	0,08
NDVI	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04

## 2.3 Pesos normalizados para las capas temáticas

Se construyó la Tabla 4 para jerarquizar cada capa en base a su categoría y ranking, posteriormente se calculó la columna de peso normalizado (wf) para todos los valores (Razandi et al., 2015).

Tabla 4. Pesos normalizados y rankings para capa temática

<i>Capas</i>	<i>Categorías</i>	<i>Ranking</i>	<i>Peso Normalizado (wf)</i>
<i>Pm</i>	Alta	6	0,2857
	Media Alta	5	0,2381
	Media	4	0,1905
	Baja	3	0,1429
	Muy baja	2	0,0952
	Impermeable	1	0,0476
<i>Pr</i>	2000-2500	8	0,2222
	1750-2000	7	0,1944
	1500-1750	6	0,1667
	1250-1500	5	0,1389
	1000-1250	4	0,1111
	750-1000	3	0,0833
	500-750	2	0,0556
	0-500	1	0,0278
<i>Dd</i>	0-0,17	3	0,5000
	0,17-0,33	2	0,3333
	>0,33	1	0,1667
<i>Pt</i>	Plano (0-3%)	6	0,2857
	Suave Ondulado (3- 8%)	5	0,2381
	Ondulado (8-20%)	4	0,1905
	Fuerte Ondulado (20-45%)	3	0,1429
	Montañoso (45-75%)	2	0,0952
	Fuerte Montañoso (>75%)	1	0,0476

NDVI	(> 0,6)	7	0,250
	(0,48 - 0,6)	6	0,214
	(0,36 - 0,48)	5	0,178
	(0,24 - 0,36)	4	0,142
	(0,12 - 0,24)	3	0,107
	(0,001- 0,12)	2	0,071
	(-0,161 - 0,001)	1	0,035

## 2.4 Índice de Potencialidad de Agua Subterránea (GWPI)

EL GWPI se utiliza para calcular la probabilidad de existencia de agua subterránea en una determinada zona de estudio (Navane & Sahoo, 2017) Dicho cálculo se realiza con los pesos normalizados (W y wf) y una combinación lineal ponderada propuesta por (Malczewski, 1999) que se presenta en la ecuación (3).

$$\underline{GWPI = (PmW * Pmwf) + (PrW * Prwf) + (DdW * Ddwf) + (PtW * Ptwf) + (NDVIW * NDVIwf)} \quad (3)$$

W es el peso normalizado que se presenta en la Tabla 3 y wf es el peso normalizado para cada capa presentado en la Tabla 4.

## 2.5 Mapa de zonas potenciales a explotación de aguas subterráneas

Para su aplicación en el software QGIS primero se estandarizo todas las capas en formato raster, utilizando la herramienta Rasterizar (vectorial-raster). Luego utilizando la Calculadora Raster se reclasificó los valores de cada categoría de las cinco capas, para especializar los pesos normalizados (wf) que se observan en la Tabla 4. Posteriormente se utilizó los valores de (W) de la Tabla 3, para resolver la ecuación (3) en la calculadora raster. Los valores resultantes corresponden al Índice Potencial de Agua Subterránea (GWPI), dentro de la Demarcación Hidrográfica Manabí, los mismos que fueron clasificados en 5 grupos, utilizando el método de clasificación por intervalos iguales.

### 3 Resultados

#### 3.1 Zonas potenciales para la exploración de aguas subterráneas

En la Figura 8 se observa el mapa resultante, el mismo que fue clasificado en: Muy bajo (<0,11), Bajo (0,11-0,15), Moderado (0,15-0,19), Alto (0,19-0,23) y Muy alto (>0,23). Las zonas con potencialidad, baja y muy baja, se encuentran en las zonas con litología de preferencia impermeable, mientras que las zonas de alta y muy alta potencialidad se pueden encontrar en zonas con permeabilidad, media alta y alta, asociada a depósitos aluviales. También se puede observar que las zonas con un potencial muy alto se encuentran en zonas con una pendiente de terreno relativamente baja (0-3%), el mismo que se asocia a las cercanías de los cuerpos de agua de la DHM. En la Figura 8 observamos que, cabeceras cantonales como, Chone, Jama, Rocafuerte, Tosagua son atravesadas por zonas con potencialidad muy alta, mientras que Calceta es atravesada por zonas con alta potencialidad. Junín, Sucre, Pedernales, Santa Ana de vuelta Larga, y Jama se encuentran en potencialidad moderada. Mientras que los valores bajos se encuentran cerca de Puerto López, Jipijapa, Jaramijó, Bahía de Caráquez y Manta. La potencialidad muy baja es asociada a la zona de Montecristi.

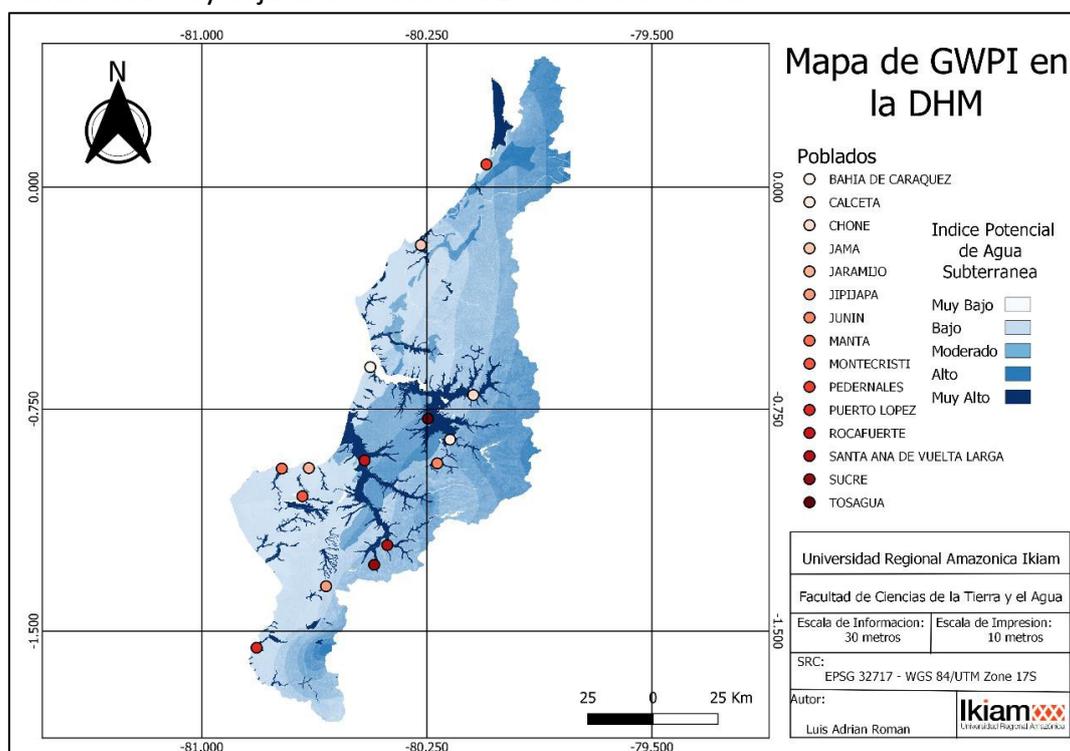


Figura 8. Mapa de potencial para la exploración de agua subterránea de la DHM

### 3.2 Validación del Mapa Resultante

Según lo sugerido por algunos autores (Nampak et al., 2014; Hernández, 2010; Macas & López, 2018; Chonlong & Pacheco, 2021) se utilizó la ubicación espacial del inventario de puntos de agua, mismo que fue generado por el INAMHI. En la Demarcación Hidrográfica Manabí existen alrededor de 421 puntos de agua (Burbano et al., 2015) los mismos que fueron usados para contrastar la información del mapa resultante (Figura 8), mediante un análisis de superposición espacial. De esta manera se cuantificó el número de puntos de agua y el porcentaje de cada uno dentro de las cinco clases del GWPI (Figura 9).

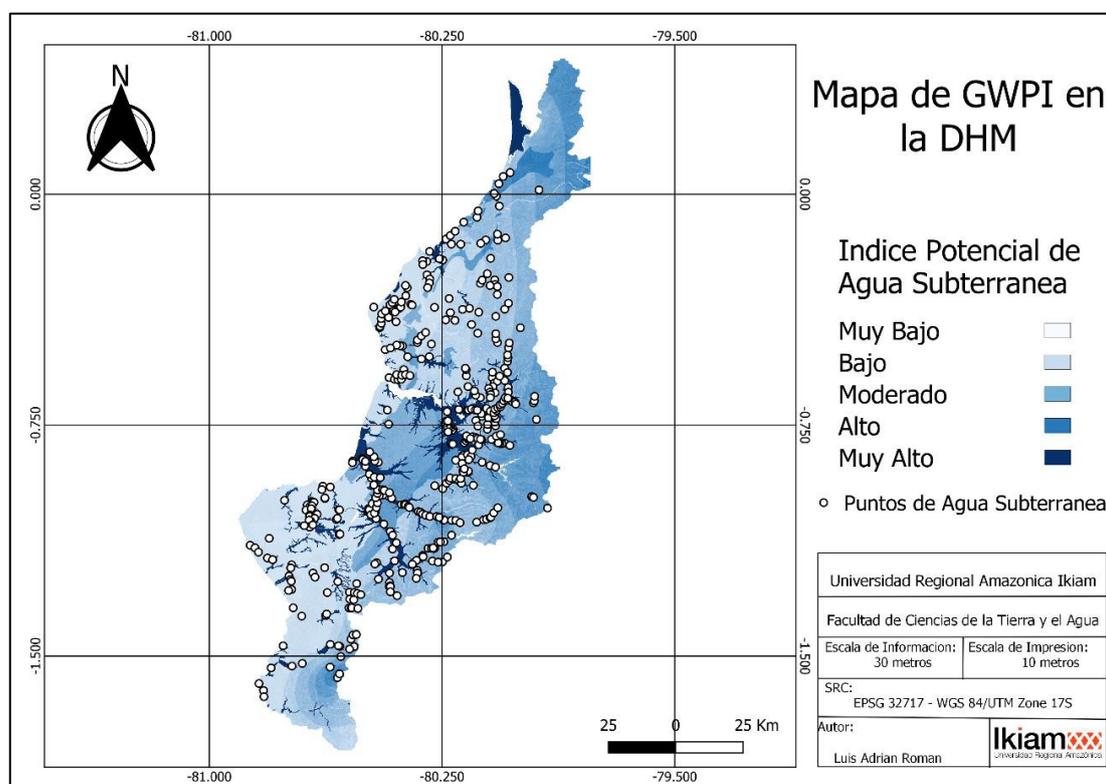


Figura 9. Mapa de Validación del potencial para la exploración de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica Manabí

Los resultados de la validación dicen que 326 puntos de agua que representan el 77,4% se encuentran en zonas con potencial moderado, alto y muy alto. Mientras que 95 puntos de agua que representan el 22,6 % se encuentran en zonas con bajo y muy bajo potencial para la exploración de agua subterránea.

Lo que representa una efectividad 77,4 % Figura 8. En la tabla 5 se muestra el rango, la clase, el número de puntos de agua dentro de cada clase, su respectivo porcentaje y porcentaje acumulado obtenidos a partir del mapa resultante.

Tabla 5. Número y porcentaje de puntos de agua por GWPI

<b>Rango GWPI</b>	<b>Clase</b>	<b>N° P. Agua</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
<b>&lt;0,11</b>	Muy Bajo	23	5,46%	5,46%
<b>(0,11-0,15)</b>	Bajo	72	17,1%	22,56%
<b>(0,15-0,19)</b>	Moderado	141	33,5%	56,06%
<b>(0,19-0,23)</b>	Alto	65	15,44%	71,50%
<b>(0,23-0,28)</b>	Muy Alto	120	28,5%	100%
Total		421	100	

#### 4 Discusión

La razón de consistencia (CR) del mapa del GWPI en la DHM (Figura 8), fue de 0,08, por lo que la subjetividad en el proceso de asignación de pesos a las diferentes capas se considera consistente (Toskano & Gérard, 2005).. El mapa resultante es influenciado mayormente por la permeabilidad de la roca y la precipitación, en menor medida por la densidad de drenajes y en poca medida por la pendiente del terreno y el NDVI (Macas & López, 2018). El porcentaje de efectividad arrojado en la validación del mapa es de 77,4% porcentaje que es comparable con los obtenidos por: Shahinuzzaman et al., (2021) en el este del Distrito de Kushtia en el suroeste de Bangladesh con un 87%, Mandal et al., (2016) observa una efectividad de 85% en el este de India, Singh et al., (2018) identificaron una efectividad de 82% en el canal de Damodar de Bengala occidental, (India), similar a la encontrada por Şener et al., (2018) en la cuenca del Lago Beysehir en Turquía y Mallick et al., (2019) en Asser, Arabia Saudita. Rahmati et al., (2015) detectó una menor efectividad en Kurdistán región de Irán, con 73%.

De la misma manera que Razandi et al., (2015) en, Teheran, al norte de Irán con una efectividad de 73,47%, y Macas & López, (2018) en Ecuador en la Demarcación Hidrográfica Puyango-Catamayo, con 70%. Mientras que (Chonlong & Pacheco, 2021) identificaron un 87% de efectividad en la cuenca del río Chone. Por otra parte el valor de consistencia (0,08) obtenido para la Tabla 3 es menor a ( $CR < 0,10$ ) por lo que la calidad de los resultados finales es aceptable (Toskano & Gérard, (2005) Dichos estudios confirman la efectividad de la metodología aplicada (70 al 88%), para calcular el GWPI por medio de AHP y teledetección en Sistemas de Información Geográfica.

Los resultados del presente estudio podrán ser considerados como información hidrogeológica validada la cual servirá como información relevante para las instituciones encargadas de la gestión, del recurso hídrico. Convirtiéndose en un primer insumo para prospecciones e investigaciones más detalladas sobre el agua subterránea dentro de la Demarcación Hidrográfica Manabí. Información que puede ser aprovechada tanto para uso agrícola, ganadero o consumo humano, teniendo en cuenta que alrededor del 67% del uso del suelo del área de estudio es utilizado para agricultura. Además, la zona está expuesta a constantes pérdidas económicas por causa de sequías y falta de recursos hídricos. Los resultados obtenidos en el proceso de validación del mapa, muestran que el método determina las zonas con potencial para la exploración de agua subterránea.

## **5 Conclusiones**

Se validó el mapa resultante Figura 9, mediante un análisis espacial de superposición y como resultado se obtuvo una efectividad del 77,4 %, teniendo en cuenta que el mapa resultante, predice la posibilidad de existencia de ella.

El mapa de potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Manabí servirá como línea base para futuras investigaciones y prospecciones relacionadas con las aguas subterráneas en la DHM.

La información generada debe ser aprovechada en las tomas de decisiones del ámbito del ordenamiento territorial, por las instituciones encargadas de la gestión, del recurso hídrico y personas particulares que dependan del recurso hídrico para desarrollar sus actividades económicas.

De los criterios utilizados, la permeabilidad, precipitación y densidad de drenaje controlan en gran parte la distribución espacial del Potencial de Agua Subterránea. La (Figura 8), muestran que zonas aledañas a los cauces de los ríos, tienen una muy alta potencialidad (Chone, Jama, Rocafuerte, Tosagua). Además, zonas con potencialidad alta y moderada atraviesan los poblados de Junín, Calceta, Santa Ana de vuelta Larga, Jama, Sucre y Pedernales respectivamente. Puerto López, Jipijapa, Jaramijó, Bahía de Caráquez y Manta se encuentran en zonas con bajo potencial. Mientras que la potencialidad baja pasa por Montecristi.

## 6 Referencias

- Agarwal, R., & Garg, P. K. (2016). Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision Making Technique. *Water Resources Management*, 30(1), 243–260. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1159-8>
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Atmospheric Correction Methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 1–22. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2011). Caracterización Hidrogeológica de las Cuencas Portoviejo - Chone. *Inamhi*, 1–17. [https://issuu.com/inamhi/docs/caract.\\_hidrogeologica-manabi/7](https://issuu.com/inamhi/docs/caract._hidrogeologica-manabi/7)
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador* (INAMHI, Ed.; Segunda ed). INAMHI.
- Camino, M., Bo, M. J., Cionchi, J., del Rio, J., Lopez de Armentia, A., & de Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 1–19.
- Campos, A., & Mendoza, Junior. (2018). Tendencias del cambio climático en la Demarcación Hidrográfica de Manabí. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.33936/riemat.v3i1.1414>
- Carvajal, J., & Rodríguez, F. (2010). Sistematización de prácticas para el aprovechamiento de recursos naturales en la cuenca del Chone. In *Asistencia a los países andinos en la reducción de riesgos y desastres en el sector agropecuario*.
- Castaño, S. (1999). Aplicaciones de la teledetección y SIG al control y cuantificación de las extracciones de agua subterránea. *Medida y Evaluación de Las Extracciones de Agua Subterránea*, 29, 125–141. <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart2/aplicacion.pdf>
- Chonlong, J., & Pacheco, H. (2021). ESTIMACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO PORTOVIEJO MEDIANTE ANÁLISIS JERÁRQUICO BASADO EN SIG Y TELEDETECCIÓN. *Revista Base Del a Ciencia*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/2588-0746>
- Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, . (2014). *Amenaza déficit hídrico*.
- Hernández, M. (2010). Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional. *Revista Politécnica*, 29 (1), 95–100.
- Macas, V., & López, K. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista de Teledetección*, 51, 135. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. In *Wiley*.

- Mallick, J., Khan, R. A., Ahmed, M., Alqadhi, S. D., Alsubih, M., Falqi, I., & Hasan, M. A. (2019). Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques. *Water*, *11*(12), 2656. <https://doi.org/10.3390/w11122656>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1421-8>
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Indices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indice%20de%20vegetacion%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Nampak, H., Pradhan, B., & Manap, M. A. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, *513*, 283–300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>
- Navane, V. S., & Sahoo, S. N. (2017). *A review of integrated RS and GIS technique in groundwater potential zone mapping*. 1–10.
- 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>
- Razandi, Y., Pourghasemi, H. R., Neisani, N. S., & Rahmati, O. (2015). Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*, *8*(4), 867–883. <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0220-8>
- Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process : Planning , Priority . Setting , Resource Allocation Technical University of Istanbul. *European Journal of Operational Research*, 97–98.
- SENAGUA. (2009). Delimitación Y Codificación De Unidades Hidrográficas Del Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *229*, 1–60. [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3419/1/5942.pdf%0Ahttp://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/PORTAL/IG/7\\_delimitacion\\_codificacion\\_metodologia\\_pfafstetter.pdf%0Ahttp://bazica.org/facultad-de-ingenieria-en-ciencias-de-la-tierra.html?](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3419/1/5942.pdf%0Ahttp://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/PORTAL/IG/7_delimitacion_codificacion_metodologia_pfafstetter.pdf%0Ahttp://bazica.org/facultad-de-ingenieria-en-ciencias-de-la-tierra.html?)
- 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>
- Şener, E., Şener, Ş., & Davraz, A. (2018). Groundwater potential mapping by combining fuzzy-analytic hierarchy process and GIS in Beyşehir Lake Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3510-x>

- Serviço Nacional de Levantamento de Solos Conservação. (1979). Clases de Declividade. *EMBRAPA*, 1. <http://www.ceivap.org.br/sesmaria/MAPA-SESMARIA-EMBRAPA-90-60.pdf>
- Shahinuzzaman, M., Haque, M. N., & Shahid, S. (2021). Delineation of groundwater potential zones using a parsimonious concept based on catastrophe theory and analytical hierarchy process. *Hydrogeology Journal*, 29(3), 1091–1116. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02322-2>
- Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2018). Assessing the accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential. *Ecological Indicators*, 91(August 2017), 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.070>
- Toskano, H., & Gérard, B. (2005). The Analytic Hierarchy Process (AHP) as a Tool for Making Decisions in the Selection of Suppliers. *Tesis Digitales UNMSM*, 100. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano\\_hg/cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.pdf) <http://www.jstor.org/stable/978380?origin=crossref>
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Rajiv Ganthi, R., Vijayaraghavan, K., & Sarma, V. S. (2012). Characterisation and quality assessment of groundwater with a special emphasis on irrigation utility: Thirumanimuttar sub-basin, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(2), 245–258. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0190-6>
- Zambrano, E. (2020). *Determinación de medidas de gestión de sequías en climas tropicales : Aplicación a la Demarcación Hidrográfica de Manabí – Ecuador*.