



*Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio*

*Identification of potential groundwater recharge and discharge areas in the Chambo River sub-basin through geographic information systems and multi-criteria analysis*

*Identificação de áreas potenciais de recarga e descarga de águas subterrâneas na sub-bacia do rio Chambo por meio de sistemas de informação geográfica e análise multicriterio*

Norma Ximena Lara-Vásquez <sup>I</sup>

[norma.lara@esPOCH.edu.ec](mailto:norma.lara@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-8381-0401>

Diego Francisco Cushquicullma-Colcha <sup>II</sup>

[diego.cushquiculma@esPOCH.edu.ec](mailto:diego.cushquiculma@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-6265-8164>

Jonny Israel Guaiña-Yungán <sup>III</sup>

[jonny.guaina@esPOCH.edu.ec](mailto:jonny.guaina@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-0456-7429>

Víctor Manuel Espinoza <sup>IV</sup>

[victor.espinoza@esPOCH.edu.ec](mailto:victor.espinoza@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-6058-2274>

Guicela Margoth Ati-Cutiupala <sup>V</sup>

[guicelaati@correo.ugr.es](mailto:guicelaati@correo.ugr.es)

<https://orcid.org/0000-0002-9779-2758>

**Correspondencia:** [norma.lara@esPOCH.edu.ec](mailto:norma.lara@esPOCH.edu.ec)

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

\***Recibido:** 10 de abril de 2021 \***Aceptado:** 03 de mayo de 2021 \* **Publicado:** 01 de junio de 2021

- I. Magister en Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales (FRN), Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero en Ecoturismo, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Instituto de Investigaciones (IDI), Riobamba, Ecuador.
- III. Magister en Informática Empresarial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales (FRN), Riobamba, Ecuador.
- IV. Magister en formulación, evaluación y gerencia de proyectos para el desarrollo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales (FRN), Riobamba, Ecuador.
- V. Ingeniera en Ecoturismo, Universidad de Granada (UGR), Facultad de Ciencias, España.

## Resumen

La recarga hídrica es un factor fundamental para el ciclo hidrológico de una Subcuenca, la presente investigación identifica espacialmente las zonas con potencial de recarga y descarga hídrica en la Subcuenca del río Chambo cuya superficie de 3.580 Km<sup>2</sup>. La identificación de un primer modelo se realizó mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Multicriterio (AMC) integrando los criterios: litología (35%), topoforma (8%), pendiente (21%), textura de suelo (32%), cobertura vegetal y uso del suelo (4%) en formato raster con una resolución de 20 m x 20 m con sus pesos respectivos, para el segundo modelo se aplicó la herramienta de superposición ponderada añadiendo la capa de precipitación anual con un peso de 50%. Para determinar las zonas de descarga se calculó el índice topográfico de humedad (ITH).

El criterio permeabilidad de la capa de litología identifica rocas con porosidad (26,8%), fisuración(57, 1%) e impermeabilidad (17,3), respecto a las topoformas se presentan relieves escarpados y montañosos(49,2%) y planicies(14%), en la subcuenca el 50,7% presenta pendientes escarpadas (>30%); los suelos franco limosos se ubican en el margen occidental del área de estudio(44,83%) seguido de suelos arenosos (37,54%); el 49,8% del suelo es utilizado para actividades agropecuarias y asentamientos humanos, los páramos y bosques (41,78%), finalmente la precipitación mínima y máxima es de 515 y 1372 milímetros de lluvia anual respectivamente. Se evaluaron dos modelos con y sin precipitación obteniendo áreas de 13031,1 y 74030,2 hectáreas con muy alto potencial de recarga hídrica, localizadas en el margen oriental de la Subcuenca del río Chambo. Las zonas de mayor potencial (muy alto y alto) presentan rocas con permeabilidad de porosidad y fisuración, con pendientes de 2%-5%, con relieve escarpado y montañoso, vertientes irregulares, piedemonte y laderas coluviales, corresponde a zonas de paramo y bosque, con suelos franco y limoso. El ÍTH indica que las zonas con muy alto potencial de descarga poseen 15 a 23,54 unidades ubicadas en la zona media de la Subcuenca localizándolas en áreas húmedas y lagunas.

**Palabras clave:** Recarga hídrica; descarga; análisis multicriterio; sistemas; agua subterránea.

## Abstract

Water recharge is a fundamental factor for the hydrological cycle of a Sub-basin, the present investigation spatially identifying the areas with potential for water recharge and discharge in the Sub-basin of the Chambo River whose surface area of 3,580 km<sup>2</sup>. The identification of a first model was carried out using Geographic Information Systems (GIS) and Multicriteria Analysis (AMC)

integrating the criteria: lithology (35%), topoform (8%), slope (21%), soil texture (32%), vegetation cover and land use (4%) in raster format with a resolution of 20 mx 20 m with their own weights, for the second model the weighted overlay tool was applied adding the annual precipitation layer with a weight of 50%. To determine the discharge zones, the topographic humidity index (ITH) was calculated.

The permeability criterion of the lithology layer identifies rocks with porosity (26.8%), cracking (57.1%) and impermeability (17.3), with respect to the topoforms there are steep and mountainous reliefs (49.2%) and plains (14%), in the sub-basin 50.7% have steep slopes (> 30%); silty loam soils are located on the western margin of the study area (44.83%) followed by sandy soils (37.54%); 49.8% of the soil is used for agricultural activities and human settlements, the moors and forests (41.78%), finally the minimum and maximum rainfall is 515 and 1372 millimeters of annual rainfall respectively. Two models with and without precipitation were evaluated, obtaining areas of 13,031.1 and 74030.2 hectares with very high potential for water recharge, located on the eastern margin of the Chambo River Sub-basin. The areas with the highest potential (very high and high) present rocks with porosity and cracking permeability, with slopes of 2% -5%, with steep and mountainous relief, irregular slopes, foothills and colluvial slopes, corresponding to areas of paramo and forest, with loamy and silty soils. The ÍTH indicates that the areas with very high discharge potential have 15 to 23.54 units located in the middle area of the Sub-basin, locating them in humid areas and lagoons.

**Keywords:** Water recharge; discharge; multi-criteria analysis; systems; groundwater.

## Resumo

A recarga de água é um fator fundamental para o ciclo hidrológico de uma Sub-bacia, a presente pesquisa identifica especialmente as áreas com potencial de recarga e descarga de água na Sub-bacia do rio Chambo cuja superfície é de 3.580 km<sup>2</sup>. A identificação de um primeiro modelo foi realizada por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Análise Multicritério (AMC) integrando os critérios: litologia (35%), topografia (8%), declividade (21%), textura do solo (32%), cobertura vegetal e uso do solo (4%) em formato raster com resolução de 20 mx 20 m com seus respectivos pesos, para o segundo modelo foi aplicada a ferramenta de sobreposição ponderada adicionando a camada de precipitação anual com peso de 50%. Para determinar as zonas de descarga, o índice de umidade topográfico (ITH) foi calculado.

O critério de permeabilidade da camada litológica identifica rochas com porosidade (26,8%), fissuração (57,1%) e impermeabilidade (17,3), com relação às topofomas ocorrem relevos íngremes e montanhosos (49,2%) e planícies (14%), em a sub-bacia 50,7% tem declives acentuados (> 30%); solos franco-siltosos estão localizados na margem oeste da área de estudo (44,83%), seguidos por solos arenosos (37,54%); 49,8% do solo é usado para atividades agrícolas e assentamentos humanos, charnecas e florestas (41,78%), finalmente a precipitação mínima e máxima é de 515 e 1372 milímetros de precipitação anual, respectivamente. Foram avaliados dois modelos com e sem precipitação, obtendo-se áreas de 13.031,1 e 74030,2 hectares com altíssimo potencial de recarga de água, localizados na margem leste da Sub-bacia do rio Chambo. As áreas com maior potencial (muito alto e alto) apresentam rochas com permeabilidade de porosidade e fissuração, com declives de 2% - 5%, com relevo acentuado e montanhoso, taludes irregulares, contrafortes e taludes coluviais, correspondendo às áreas de paramo e floresta, com solos argilosos e siltosos. O ÍTH indica que as áreas com potencial de descarga muito alto possuem de 15 a 23,54 unidades localizadas na zona média da Sub-bacia, localizando-as em áreas úmidas e lagoas.

**Palavras-chave:** Recarga de água; download; análise multicritério; sistemas; Agua subterranea

## Introducción

La identificación de las zonas de recarga de agua subterránea en un área es importante para utilizar y salvaguardar adecuadamente los recursos de agua subterránea (Anbarasu et al., 2020), pues constituyen un recurso estratégico en el contexto actual de crecimiento poblacional y cambio climático (Díaz-Alcaide and Martínez-Santos, 2019; UNESCO, 2021), el desarrollo adecuado de este recurso es esencial porque el agua subterránea es una fuente importante de agua potable y agua para la agricultura (Lee et al., 2020; Yifru et al., 2020), la Unesco estima que casi la mitad de la humanidad (3 500 millones de habitantes) se abastece directamente del agua subterránea y que los sectores que más la consumen son: el doméstico (67%), la industria (22%) y la irrigación (11%) (Hatch Kuri, 2017; Zhu and Abdelkareem, 2021).

La importancia de las aguas subterráneas radica en la disponibilidad de agua a largo plazo, calidad natural para suministro de agua potable y un servicio a bajo costo que favorece a regiones con ausencia de sistemas de abastecimiento, por lo que se vuelve esencial monitorear y preservar estos recursos y también proteger su calidad (Herrera, 2017; Tiwari and Kushwaha, 2020). Sin embargo, en diferentes regiones del mundo las reservas de agua subterránea están bajo una intensa presión,

estas zonas se ven afectadas por las distintas actividades que se realizan en el territorio, muchos de los principales acuíferos del mundo están experimentando aceleradas tasas de reducción en sus reservas debido a la creciente demanda de agua (Roy et al., 2020). El agua subterránea se extrae a tasas más altas de las que se pueden reponer naturalmente (Hernández et al., 2020), actualmente la contribución para la gestión de los recursos de agua subterránea es limitada (Yifru et al., 2020)

Las zonas de recarga hídrica reúnen una serie de características que propician la infiltración del agua, (Hernández-juárez et al., 2020; Sener et al., 2005) una de ellas es la conductividad hidráulica de la roca que permite la infiltración del agua de lluvia hasta alcanzar el nivel freático. En estas áreas el nivel freático es profundo, y el suelo es generalmente ácido y poco desarrollado, con poca cantidad de materia orgánica y bajas concentraciones de sodio y sales.

Los estudios de zonas con potencial de recarga hídrica siguen siendo una gran incógnita para los responsables de la toma de decisiones (Hamdi et al., 2020). En Ecuador no existe una metodología oficial para determinar las zonas de recarga hídrica, a esto se suma una reglamentación deficiente y la práctica de actividades agrícolas y pecuarias sin las debidas medidas de conservación de suelos (Berhe Zenebe et al., 2020; Chamorro, 2016; Elmahdy et al., 2020), factores que inciden negativamente en la preservación de estas zonas. Además la escasez general de conocimiento científico (Chidichimo et al., 2018a), limita la generación de políticas públicas orientadas a la gestión eficiente del recurso hídrico afectando la disponibilidad futura de agua en el centro de Ecuador. (Bustamante, 2017; Chidichimo et al., 2018a).

La alternativa sostenible para asegurar a mediano y largo plazo el suministro de la cantidad y calidad del agua para la economía, la sociedad y el medioambiente está dado en desarrollar una política nacional, regional y local del agua integral, encaminada al uso racional, productivo y eficiente del recurso, optimizando la gestión de riesgos asociados a su calidad y a los eventos extremos (Rodríguez and Pérez, 2014).

Hasta el momento, las investigaciones hidrológicas llevadas a cabo en la Subcuenca del río Chambo se limitaron al equilibrio de las aguas superficiales, relegando la contribución del agua subterránea, por lo que el estudio resulta relevante si consideramos que las zonas de recarga hídrica provee agua a una región densamente habitada, donde las infraestructuras de agua potable de las ciudades circundantes dependen exclusivamente del agua subterránea (Chidichimo et al., 2018b). En tal sentido la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ejecuta el proyecto de Investigación denominado

“Diseño e implementación de un sistema de monitoreo ambiental por teledetección en zonas con alto potencial de recarga hídrica en el margen oriental de la subcuenca del Río Chambo como estrategia para asegurar la provisión de los servicios ecosistémicos con el fin de contribuir a la conservación y aseguramiento de las funciones ecológicas de las zonas de recarga hídrica, los resultados de este estudio pueden contribuir al desarrollo sostenible de los recursos de aguas subterráneas mediante la identificación de áreas de alto potencial de aguas subterráneas.(Lee et al., 2020)

## **Antecedentes**

### **Zonas de recarga y descarga**

Las zonas de recarga agrupan una serie de particularidades que motivan la infiltración de agua hasta alcanzar el manto freático(Bardales Espinoza, 2007; Hernández et al., 2020), está asociado a indicadores como la conductividad hidráulica de la roca (Berhe Zenebe et al., 2020)y la elevación topográficamente alta, el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica, baja concentración de sodio y/o sales, la vegetación es xerófila. Las zonas de recarga hídrica son un parte importante del sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica por tanto cualquier alteración podría causar afectación a los acuíferos y en consecuencia la calidad y cantidad del recurso hídrico(Bueso Campos, 2010).

Por otra parte, las zonas de descarga, cuyas propiedades son más perceptibles, ocurre a una elevación topográfica más baja que la zona de recarga, estas áreas pueden estar representadas por un manantial o una laguna, los suelos tienden a ser más salinos y alcalinos tornándose, en general, más desarrollados, con mayor contenido de materia orgánica. La vegetación asociada sobrevive en regiones indeblemente inundadas y/o tolerantes a la salinidad (vegetación halófila), y/o yeso (vegetación gipsófila)(Hernández et al., 2020; Peñuela and Carrillo, 2013)

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

La subcuenca del río Chambo forma parte de la demarcación hidrográfica del Pastaza(Secretaría Nacional del Agua, 2010), su principal afluente es el río del mismo nombre que nace en la cordillera central de los Andes ecuatorianos. La subcuenca cubre una superficie de 3.580 Km<sup>2</sup> y un perímetro de 339.38 Km, localizada entre las provincias de Chimborazo, Tungurahua y Bolívar, cuyas coordenadas son 1°59'42" Latitud Sur 78°29'40" Longitud Oeste. La precipitación promedio anual es

de 872,078 mm, presentando una mayor precipitación en el margen oriental de la Sub cuenca. (Andrade Valdospino, 2019; Chidichimo et al., 2018a).

Las pendientes en la subcuenca del río Chambo varían desde 0% hasta 81.54%. Las pendientes extremadamente abruptas (75 – 81.54) %, representan el 0.08% del área total de la subcuenca.(Naranjo Gaibor, 2013).

## Hidrología

La subcuenca está conformada de 21 microcuencas, las más importantes son las microcuencas de los ríos Cebadas, Guamote, Chibunga, Guano, Puela, Alao, Blanco y Uldán, ocupan aproximadamente el 85% de esta subcuenca, Las aportaciones medias anuales de las microcuencas alcanzan los 4,7 l/s/km<sup>2</sup> en el río Guamote y de 6,3 l/s/km<sup>2</sup> en el río Chibunga. (Chidichimo et al., 2018a)

El río principal de esta subcuenca es el río Chambo, que corre de sur a norte con una longitud (LRP) de 144.49 Km, el área de la subcuenca (A) es de 3589.55 Km<sup>2</sup>, el perímetro (P) es de 339.38 Km, su longitud axial (L) es de 106.77 Km y el ancho promedio (B) es de 33.62 Km. La longitud total de drenaje (LTD) es de 4604.14 Km.(Naranjo Gaibor, 2013). Los estudios hidrológicos efectuados por la (Secretaria Nacional del Agua, 2010) visibilizan la existencia de 2 tipos de redes; la red hidrográfica oriental y red hidrográfica occidental siendo la primera la que aporta la mayor parte del recurso hídrico al Chambo.

**Figura 1:** Límites de la subcuenca del río Chambo.



**Fuente:** Elaboración propia con información de CONALI (2017), SENAGUA (2016).

### **Identificación de las zonas de recarga y descarga**

Las zonas de recarga reúnen características que favorecen la infiltración de agua hasta alcanzar el nivel freático, uno de los indicadores de estas zonas es la conductividad hidráulica de la roca que permite la infiltración del agua de lluvia. Estas zonas se caracterizan por un nivel freático profundo, suelos generalmente ácidos y poco desarrollados, con baja cantidad de materia orgánica y poca concentración de sodio y sales. (Peñuela and Carrillo, 2013)

El agua proveniente de las precipitaciones y que alcanza la superficie de la cuenca, después de saturar los espacios vacíos; poros y/o fisuras de la superficie, y que se llenen de agua las pequeñas depresiones superficiales, da inicio a dos tipos de movimiento: uno superficial siguiendo las líneas de máximo gradiente de energía y otro a través de los espacios vacíos del suelo y subsuelo de acuerdo con el gradiente piezométrico y con la permeabilidad del medio. (Bardales Espinoza, 2007; Chamorro, 2016)

Esta etapa consideró la identificación de criterios ligados a flujos de la subcuenca, ya que manifiestan mayor contraste con respecto a los flujos locales e intermedios (Peñuela and Carrillo, 2013). Cabe destacar que las propiedades de las zonas de descarga se identificaron con mayor facilidad en comparación con las de recarga y tránsito. Se usó el análisis multi criterio para delimitar las zonas de recarga de agua subterránea utilizando las capas: litología, topografía, pendiente, textura de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo (Anbarasu et al., 2020; Kadam et al., 2020). Estos datos se combinaron con el método de superposición ponderada para delimitar las zonas de potencial de agua subterránea (Anbarasu et al., 2020). La identificación de las zonas de descarga se efectuó calculando el índice topográfico de humedad (ITH), aplicando la Teoría de Sistemas de Flujo y su evaluación mediante el AMC.

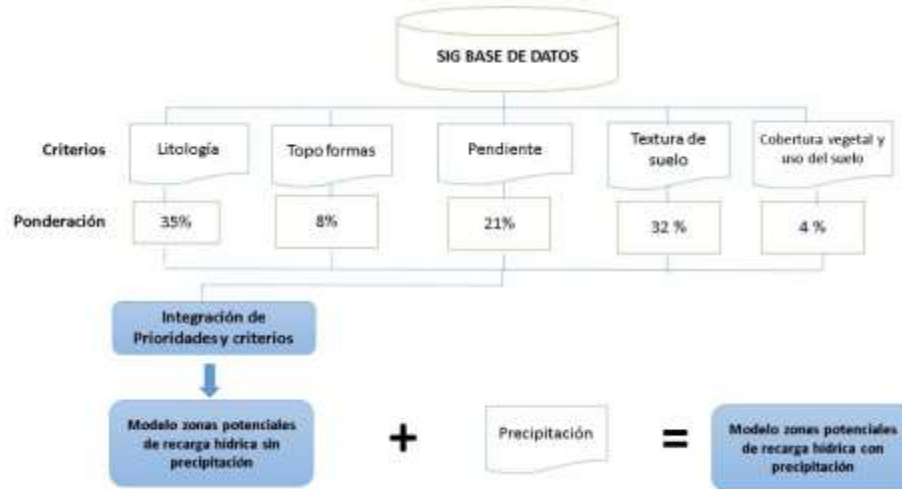
### **Determinación de zonas de recarga hídrica**

#### *Preparación de capas temáticas*

EL análisis del potencial de recarga en el área de estudio, constó de tres pasos, la obtención de la información vectorial oficial para el Ecuador (MAE and MAGAP, 2013), la construcción de bases de datos georreferenciadas y la elaboración de capas temáticas homogéneas de cada criterio analizado. La elaboración de estas capas se realizó mediante el geo procesamiento en el software ArcGis 10.8 (Matomela et al., 2020), usando la proyección UTM, zona 17 SUR, Datum WGS84.



**Figura 2:** Diagrama de flujo para la evaluación del potencial de recarga.



**Fuente:** Elaboración propia.

La capa vectorial de litología se obtuvo del Mapa Hidrogeológico del Ecuador –INAMHI-DGGM (Dirección General de Geología y Minas (1983) Editado (2015), el potencial de recarga de las unidades litológicas se evaluó a través de los indicadores de porosidad primaria intergranular, los valores generales de estos indicadores se obtuvieron de estudios similares. Los valores originales de cada criterio se evaluaron y reclasificaron en valores de contribución a las zonas potenciales de recarga, considerando que una mayor porosidad efectiva y permeabilidad favorecen un mayor potencial de recarga (Abdalla et al., 2020; Kadam et al., 2020).

Las topoformas se identificaron al extraer la capa vectorial del mapa de unidades Geomorfológicas del Ecuador (Castro et al., 2013) a una escala de 1: 50000. El potencial de recarga se evaluó considerando que las zonas de recarga y de descarga se asientan en zonas topográficamente altas y bajas respectivamente. (Freeze and Cherry, 1979). El mapa de pendiente se elaboró mediante las curvas de nivel que fueron tomadas de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (1991) a una escala de 1: 50000 con un intervalo de curvas a 40 metros. Las curvas de nivel se transformaron a un TIN - Triangular Irregular Networks por sus siglas en inglés, mediante la herramienta create TIN, posteriormente las redes irregulares se transformaron a un modelo digital de elevación (DEM) utilizando la herramienta TIN to raster, con un tamaño de celda de 20 x 20 metros.

El porcentaje de pendiente se obtuvo mediante la herramienta SLOPE, el cual se reclasificó en cinco clases de acuerdo con (Food and Agriculture Organization [FAO], 2009) de 0 a 2%, 2 a 5%, 5 a 15%,

de 15% a 30% y mayores a 30%. El potencial de recarga se valoró considerando que las pendientes suaves promueven una menor velocidad y mayor tiempo de infiltración, y las pendientes fuertes promueven una mayor velocidad y menor infiltración. (Abdalla et al., 2020; Zhu and Abdelkareem, 2021)

El mapa de textura suelos se obtuvo del (MAE and MAGAP, 2013), el potencial de recarga de los suelos se evaluó utilizando indicadores de textura y horizontes diagnósticos de los subgrupos de suelos, considerando la base referencial mundial del recurso suelo de (IUSS Working Group WRB, 2015), que permiten identificar rasgos físico-químicos indicativos del comportamiento hidrológico del suelo (Peñuela and Carrillo, 2013). Al evaluar el potencial de recarga se consideró que una textura gruesa favorece la infiltración y el drenaje del suelo (Anbarasu et al., 2020; Ortiz et al., 1999)(Anbarasu et al., 2020), por tanto se asignaron mayores valores a los rasgos y propiedades indicativos de zonas de recarga precedentemente descritos.

El mapa de cobertura y uso de suelo se obtuvo de la capa vectorial denominada Cobertura y uso de la tierra en el Ecuador para el año 2018, elaborado por (MAE, 2013) Para la asignación de la categoría se utilizó la leyenda a nivel 1 y 2 basada en las categorías de cobertura de la tierra definidas por (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), 2019), se clasificaron considerando que la vegetación densa conservada cumple con las funciones ecológicas normales, en cambio las zonas intervenidas con actividades antrópicas disminuyen deterioran y anulan los servicios eco sistémicos, en este contexto se dio mayor valor a zonas con cobertura vegetal.

Para el mapa de precipitación se obtuvo información raster de la base de datos de la plataforma Word Clim(Varela et al., 2015) , se tomaron datos de un periodo histórico de 1970-2000, con una resolución de 30 segundos. Se extrajeron y sumaron los datos de los promedios mensuales utilizando el software Arc Gis 10.8, obteniendo así la capa de precipitación anual, la misma que fue reclasificada en cinco clases, considerando que, a mayor volumen de precipitación, mayor será la recarga. (Sener et al., 2005; Zhu and Abdelkareem, 2021)

### **Análisis de decisiones de criterios múltiples**

El análisis multicriterio (AMC) se fundamenta en el concepto de escalas de relación de conducción de la comparación pareada propuesto por (Saaty, 1987), tiene una precisión superior en el mapeo del potencial de aguas subterráneas, AMC es prometedor y reconoce de manera eficiente las regiones adecuadas para la recarga de agua subterránea sobre otras técnicas convencionales. (Kadam et al.,

2020; Singh et al., 2018). En este trabajo, se utiliza un AMC basado en SIG para integrar capas temáticas de variables que influyen en el almacenamiento natural y el movimiento de agua, dado que la comparación pareada es vital en la aplicación del AMC (Yifru et al., 2020), la asociación de criterios se pondera de acuerdo con su contribución a la presencia de agua subterránea basada en la escala de (Saaty, 1987).

**Tabla 1:** Indicadores superficiales y clases utilizados en la evaluación del potencial de recarga.

Escala	Intensidad de importancia	Definición
1	Igual	Ambos factores contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderado	Experiencia y conocimiento favorecen a un factor ligera a moderadamente sobre otro
5	Fuertemente	Experiencia y conocimiento favorecen a un factor moderadamente a fuertemente sobre el otro
7	Muy fuertemente	Un factor es fuertemente favorecido sobre otro y su dominancia se observa en la realidad.
9	Extremadamente	La evidencia favorece a un factor sobre otro y es del mayor grado de afirmación posible
2,4,6,8	Valores intermedios	Se usa para representar prioridades intermedias entre 1, 3, 5, 7 y 9.

**Fuente:** Elaboración propia con información de (INAMHI, 2015; MAE and MAGAP, 2013)

La priorización de criterios se realizó en dos fases; la primera basada en la experiencia de los autores considerando especialmente la función de cada criterio para delimitar zonas de recarga hídrica subterráneas, en un segundo momento se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva (Yifru et al., 2020) para recalificar los criterios y finalmente obtener los pesos. Se evaluó la consistencia: una medida de dependencia dentro y entre los conjuntos de capas temáticas de su estructura, es importante en AHP (Saaty, 1987). La relación de consistencia (CR), principal, se calculó el valor propio ( $\lambda_{max}$ ) y el índice de consistencia (IC) usando las siguientes ecuaciones de CI de Saaty:

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

$$Rci = \frac{1,98 * (n - 2)}{n}$$

$$CR = Ci/Rci$$

Donde:

n es el número de datos considerados y RCI es aleatorio valor del índice de consistencia (Podvezko, 2009). Un CR de 10% o menos es satisfactorio para proceder con el análisis (Saaty, 1987). La

integración de los criterios y sus prioridades se realizó mediante el método de combinación lineal ponderada. El modelo para evaluar el potencial de recarga se muestra en la ecuación:

$$PR = Litologia(P1) + Topoformas(P2) + Suelo(P3) + Pendiente(P4) + Vegetación(P5)$$

Donde:

$PR$  = Potencial de recarga

$P_i$  = Peso o prioridad de cada criterio

Se utilizó la herramienta de superposición ponderada para integrar los criterios y pesos y obtener como resultado el mapa de recarga hídrico con cinco clases: 1) muy bajo, 2) bajo, 3) moderado, 4) alto y 5) muy alto para facilitar su interpretación y su análisis con otras fuentes de información. (Hernández-juárez et al., 2020).

Una vez obtenido el primer mapa, se corrió nuevamente la herramienta de superposición ponderada integrando el criterio de precipitación asignando igual prioridad a los dos mapas. La validación del modelo se realizó por medio de la sobreposición con otras fuentes de información, como presencia de corrientes y cuerpos de agua perennes y visitas in situ (Hernández-juárez et al., 2020)

### **Determinación de zonas de descarga**

El índice topográfico de humedad (ITH) (Arteaga Delgado et al., 2020) permitió identificar los potenciales lugares donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación de agua superficial como zonas topográficamente bajas y planas, y con presencia de vegetación. (Roy et al., 2020; Zhu and Abdelkareem, 2021). Se analizó utilizando el modelo de elevación digital(MDE) y el ITH (Böhner et al., 2002, p. 214), el cual se reclasificó en cinco clases, considerando que los valores altos del índice indican sitios de acumulación con mayor proximidad del nivel freático, por tanto, mayor potencial de descarga (Hernández-juárez et al., 2020)

EL ITH se calculó con la dirección de flujo, acumulación de flujo y la pendiente, se aplicaron las fórmulas:

$$Slop = slopeDEM * 1.570796)/90$$

$$Tan_{slp} = con(slope > 0, \tan(slope), 0,001$$

$$Fa_{scaled} = (fa + 1) * cellsize$$

$$ITF = \ln\left(\frac{Fa_{scaled}}{Tan_{slp}}\right)$$

## Resultados y discusión

### Priorización de criterios

Se consideraron los criterios que presentan mayor accesibilidad y relevancia para evaluar el potencial de recarga en el área de estudio, fundamentados en la revisión bibliográfica se obtuvo la prioridad de cada variable y un mejor conocimiento sobre su función e interrelación con las otras variables. El CR fue de 0,0735, indicando una consistencia admisible de la matriz (Tabla 2).

Se consideró a la litología como el criterio más importante ya que la recarga depende fuertemente de las principales hidrogeológicas del subsuelo (Anbarasu et al., 2020; Lee et al., 2020; Yifru et al., 2020), que permiten la infiltración de agua, obtuvo un peso de 35%. La textura de suelo fue la segunda variable más importante alcanzó un peso de 32%, su estructura, composición y humedad, son fundamentales para la escorrentía de agua en una zona y depende de características como; el tamaño de grano, porosidad y densidad aparente.

La pendiente se considero la tercera variable en importancia, ya que las tasas de escorrentía e infiltración están controladas fundamentalmente por la pendiente de la superficie en áreas de pendiente pronunciada la recarga es menor en comparación con áreas de pendiente menor, finalmente los criterios toposformas y cobertura vegetal y uso del suelo aportan con pesos bajos.

**Tabla 2:** Determinación de pesos por el método de Saaty (AMC)

	C1	C2	C3	C4	C5	Wi	Ci	LAMDAi	
<b>C1</b>	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	1,43	0,21	0,81	
<b>C2</b>	1	1,00	1,00	6,00	8,00	2,17	0,32	1,05	
<b>C3</b>	1	1	1,00	9,00	9,00	2,41	0,35	1,14	
<b>C4</b>	1/2	1/6	1/9	1,00	4,00	0,52	0,08	1,39	
<b>C5</b>	1/3	1/8	1/9	1/4	1,00	0,26	0,04	0,95	
<b>Pi</b>	3,83	3,29	3,22	18,25	25,00	6,78		5,35	$\lambda_{max}$
						<b>PESOS</b>			
<b>CRITERIO1</b>		Pendiente				0,21	<b>C1</b>		
<b>CRITERIO2</b>		Textura de suelo				0,32	<b>C2</b>		
<b>CRITERIO3</b>		Litología				0,35	<b>C3</b>		
<b>CRITERIO4</b>		Topoformas				0,08	<b>C4</b>		
<b>CRITERIO5</b>		Cobertura vegetal y uso del suelo				0,04	<b>C5</b>		
						1,00			
<b>Ci=</b>	<b>0,08736554</b>								
<b>Rci=</b>	1,188								
<b>CR=</b>	0,0735		Consistente						

**Tabla 3:** Criterios superficiales y clases utilizados en la determinación del potencial de recarga hídrica.

Factor de influencia	Categoría	Potencialidad	Clasificación	Peso
<b>Litología</b>	Permeabilidad muy alta	Muy alto	5	35
	Permeabilidad alta	Alto	4	
	Permeabilidad media	Moderado	3	
	Impermeable	Muy bajo	1	
<b>Pendiente</b>	0 a 2%	Muy alto	5	21
	2,01% a 5%	Alto	4	
	5,01 a 15%	Moderado	3	
	15,01% a 30%	Bajo	2	
	> 30,01%	Muy Bajo	1	
<b>Topoformas</b>	Relieve escarpado/Relieve montañoso/Vertientes irregulares/Piedemonte coluvial/Laderas coluviales	Muy alto	5	8
	Colinas, medianas/Valles Interandinos/Vertientes convexas/Vertientes concavas/Talud de derrubios	Moderado	3	
	Nieve/Superficies de aplanamiento/Cuerpos de agua/Zonas Urbanas	Muy Bajo	1	
<b>Textura de suelo</b>	Gruesa	Muy alto	5	32
	Media	Alto	4	
	Fina	Muy Bajo	1	
<b>Cobertura y uso del suelo</b>	Paramo y bosque	Muy alto	5	4
	Vegetación arbustiva y herbácea	Alto	4	
	Áreas sin cobertura vegetal	Moderado	3	
	Tierra agropecuaria	Bajo	2	
	Zona antrópica	Muy Bajo	1	
			<b>Total</b>	<b>100</b>

**Tabla 4:** Criterio precipitación y clases para Modelo de determinación de zonas de recarga hídrica potencial

Factor de influencia	Categoría	Potencialidad	Clasificación	Peso
<b>Precipitación</b>	900 a 1372 mm	Muy alto	5	50
	800 a 900 mm	Alto	4	
	700 a 800 mm	Moderado	3	
	600 a 700 mm	Bajo	2	
	515 a 600 mm	Muy Bajo	1	

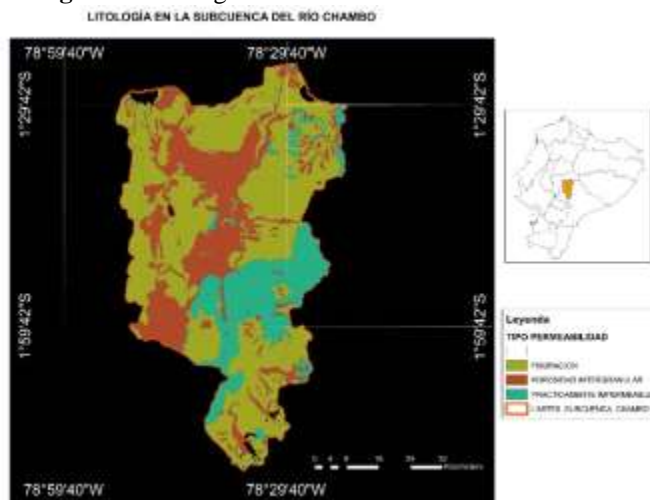
## Análisis de criterios

### Litología

Las características litológicas son significativas, ya que la infiltración del agua precipitada a el acuífero subterráneo se rige por la porosidad y permeabilidad de la capa superficial (Zhu and Abdelkareem, 2021), en el área de estudio el 26,8% de la Sub cuenca presenta rocas con

permeabilidad de tipo porosidad intergranular que se considera de permeabilidad muy alta, representadas en 94043,4 hectáreas formadas por material geológico del Cuaternario compuesto por rocas de tipo sedimentos fluviales, toba, lahares, prioclastos, tillitas, morreras y limolitas, junto con las unidades de basalto, basalto-andesita, tobas riolítica, calizas y conglomerado poligénico-arenisca del Terciario Superior, (Hernández et al., 2020; Kadam et al., 2020), Esta característica se presenta principalmente en la parte central de la Subcuenca en la parroquias de Licto, Flores, Calpi, San Luis, y en las cabeceras cantonales de Riobamba y Guano, al suroeste de la matriz en el cantón Guamote. Se consideran de permeabilidad media o fisuración los depósitos detríticos del Terciario, como conglomerado-poligénico, arenisca-toba riolítica, basalto, andesita-basalto, andesita, brecha volcánica andesítica, toba andesítica-toba riolítica, toba riolítica, caliza y granito-granodiorita (Roy et al., 2020); todas estas unidades se caracterizan por una fisuración moderada o alta corresponden al 57,1 % del áreas de estudio, ubicadas en el margen oriental de la subcuenca en las parroquias de Bilbao, Puela, El Altar, cabecera cantonal de Penipe, La Candelaria, Quimiag, cabecera cantonal de Chambo, al Norte de Pungala, y al sur de Cebadas; en la zona occidental se ubica en las parroquias de San Andres, San Juan, Villa la Unión, Cacha, Punin, Santiago de Quito; Columbe y la cabecera cantonal de Guamote. El 17,3 % presenta rocas con reducida permeabilidad, los cuerpos graníticos, las riolitas, andesita-dacita, caliza-lutita, lutita-caliza y arenisca-lutita, localizadas al sur de Pungala, al norte de Cebadas y al este de la cabecera cantonal de Guamote.

**Figura 3:** Litología en la Subcuenca del Río Chambo.



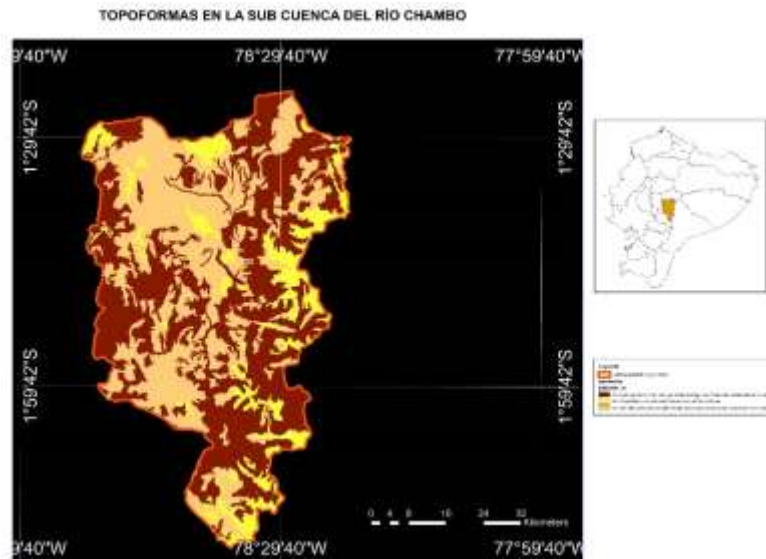
Fuente: elaboración propia.

### Topoformas

El 14% de la Sub cuenca presenta superficies de aplanamiento, cuerpos de agua y zonas urbanas, aluden a características del relieve en términos de amplitud altitudinal o altura relieve asociadas a zonas de descarga en San Juan, San Andrés, la cabecera cantonal de Riobamba, San Isidro de Patulú, Quimiag, Guano La Matriz, Pungala y al Este de Cebadas. Las clases morfológicas correspondientes a colinas medianas, valles Interandinos, vertientes convexas, vertientes cóncavas y talud de derrubios ocupa el 39,3% de se ubican en la parte central de la Sub cuenca en las parroquias de San Andres, Calpi, Lican San Juan, Riobamba La Matriz, Guano La matriz, San Luis, Cubijies, Columbe, Flores y al Noreste de Guamote La matriz, definidos como zonas de tránsito. (Hernández et al., 2020)

El 49,2% de la superficie total registra topoformas con relieve escarpado, montañoso, vertientes irregulares, piedemonte y laderas coluviales, localizadas en las cadenas montañosas de oriente y occidente de la Subcuenca del río Chambo. Estas clases morfométricas aluden a las características del relieve en términos de su amplitud altitudinal o altura relativa entre el punto más bajo y el más alto de una unidad, y proveen información sobre la energía del relieve.

**Figura 4:** Topoformas en la Sub cuenca del Rio Chambo.



Fuente: elaboración propia.

### Pendiente

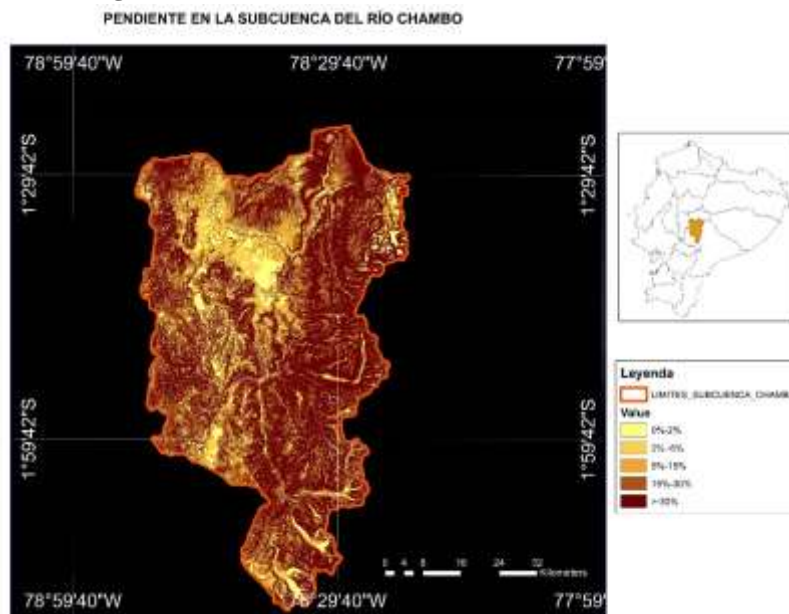
El área de pendiente alta da como resultado una escorrentía rápida y un período de retención bajo para infiltrar el agua y, por lo tanto, se considera "pobre" para la recarga del agua subterránea (Kadam



et al., 2020), debido a la presencia de un sistema montañoso en la Subcuenca y a la presencia de topofomas irregulares 50,7 % presenta pendientes escarpadas (>30%) que se localizan en el margen oriental de la Subcuenca en las zonas circundantes a los volcanes El Altar y Sangay, además en el occidente en el nevado Chimborazo. Por otra parte 83204,28 hectáreas presentan pendientes inclinadas (15%-30%) se ubican principalmente en la zona central y occidental de la Subcuenca en zonas donde se asientan ciudades y pueblos. Las pendientes moderadamente inclinadas (15%-5%) se registran en ciudades como Riobamba y Guano y parroquias como San Luis y Calpi ubicado en la zona Norte de la Subcuenca abarcan 38834,52 hectáreas(ha)

Mientras que la pendiente suave tiene un potencial de agua subterránea alto(Anbarasu et al., 2020) alto (2% y 5%) se presentan en zonas céntricas de Riobamba, Lican y Calpi con terrenos ligeramente inclinados se registran 10035,44 ha, en cuanto a las pendientes moderadamente inclinadas e inclinadas (<2%) se presentan en 48679,04 ha, ubicadas en zonas pobladas de Riobamba y Guano. El mayor potencial de recarga se otorgó a las pendientes moderadamente inclinadas e inclinadas, al ser las superficies donde el flujo superficial tendrá la mayor distribución espacial.

**Figura 5:** Pendientes en la Subcuenca del Río Chambo.



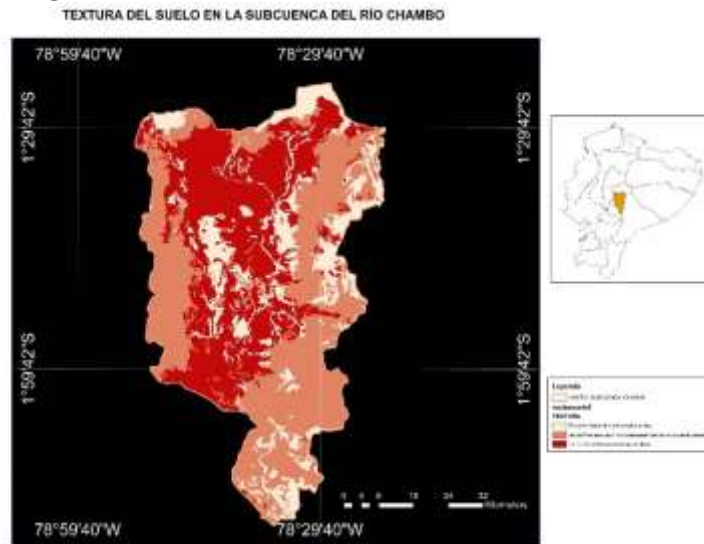
Fuente: elaboración propia.

### Textura del suelo

El suelo controla la infiltración de agua en un área y depende de varias características como el tamaño del grano, la forma del grano, la textura del suelo. (Anbarasu et al., 2020) en el área de estudio los suelos francos y limosos son los suelos dominantes y cubren 44,83% de la superficie total, ubicados en las zonas occidental y oriental, el primero en las parroquias de San Juan, Villa La Unión, Columbe; el segundo en las parroquias del Altar, Matus, la Candelaria, Quimiag, Chambo, Pungala y Cebadas, entre tanto que los suelos arenosos representan el 37,54% de la superficie, presentes en la zona media de la Subcuenca en las cabeceras cantonales de Guano, Guamote y Riobamba.

Los suelos arcillosos y con presencia de rocas (20,21%), es el tercer suelo dominante de la Subcuenca, estas zonas se encuentran dispersas al norte de San Andrés; Pelileo, Quero, al este de La candelaria y Quimiag, Chambo y Pungalá.

**Figura 6:** Textura en la Sub cuenca del Rio Chambo.



Fuente: elaboración propia.

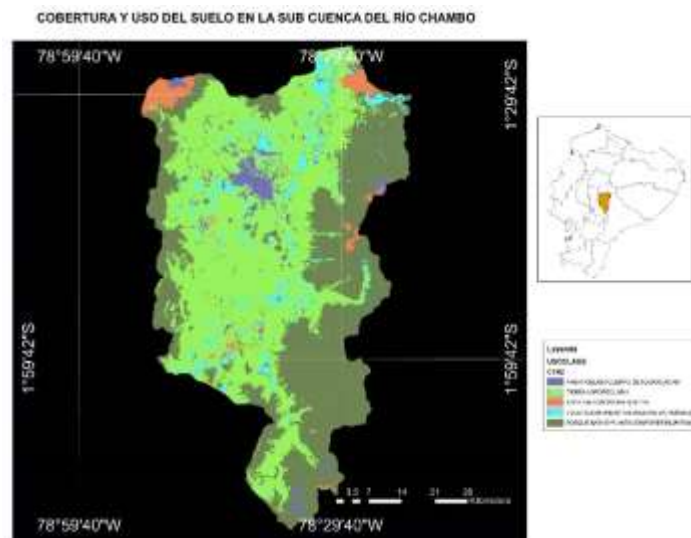
### Cobertura y uso de la tierra

La cobertura y uso del suelo es uno de los factores esenciales que afectan la escorrentía y el potencial de RWH de un área (Matomela et al., 2020), existe una relación espacial positiva entre los cambios de LULC y la recarga de aguas subterráneas, la descarga de aguas subterráneas y el nivel de las aguas subterráneas(Elmahdy et al., 2020). El uso del suelo se caracteriza por una mezcla de cobertura forestal, actividades agrícolas, asentamientos humanos (Sener et al., 2005), basados en el mapa de

cobertura y uso de suelo (MAE and MAGAP, 2013), en el área de estudio se observa 4 tipos de coberturas y usos de suelo; la actividad agropecuaria constituye la mayor superficie (49,8%) y se encuentra ubicada en la zona media de la subcuenca en las cabeceras cantonales de Riobamba, Chambo, Guano y Guamote; los páramos y bosques conservados (41,78%) están localizados al extremo del margen oriental y occidental de la Subcuenca.

Como tercer tipo de cobertura y uso de suelo se identifica a la vegetación no muy densa y poco conservada que agrupa el 5,6% de la superficie total y se localiza en la zona media, se distinguen pequeños parches de vegetación. Se registran además áreas sin cobertura vegetal( 3%) y están localizadas al alrededor del nevado Chimborazo con mayor presencia en las parroquias de Puela y Bilbao, finalmente se registran asentamientos humanos (2,3%) que se ubican principalmente en Riobamba, Guano y Lican, Calpi.

**Figura 7.** Cobertura y uso de suelo en la Sub cuenca del Rio Chambo.

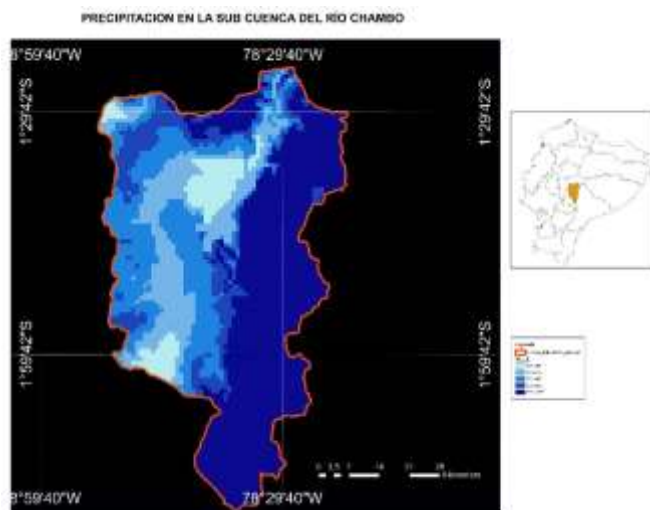


Fuente: elaboración propia.

## Precipitación

Las precipitaciones totales anuales en la Subcuenca del río Chambo, registran una mínima de 515mm. y una máxima de 1372 milímetros de lluvia anual, las zonas más lluviosas se ubican en el margen oriental de la Subcuenca y se registra menor pluviosidad en las zonas con ciudades grandes y el margen occidental.

**Figura 8:** Precipitación en la Sub cuenca del Río Chambo.



Fuente: elaboración propia.

### Descripción de zonas de recarga

El modelo sin precipitación delimita 13031,1 ha con muy alto potencial de recarga hídrica, mientras que el modelo con precipitación determina que existen 74030,2 ha que se localizan en el margen oriental de la Subcuenca del río Chambo obteniendo una diferencia significativa respecto a las zonas con alto, moderado, bajo y muy bajo potencial de recarga (Akter et al., 2020).

**Tabla 4:** Comparación de la superficie por clase del potencial de recarga (PR).

Potencia de recarga	Modelo sin precipitación		Modelo con precipitación	
	Superficie (Hectáreas)	Porcentaje (%)	Superficie (Hectáreas)	Porcentaje (%)
<b>Muy Alto</b>	13031,1	3,636	74030,2	20,658
<b>Alto</b>	175534,3	48,983	171894,6	47,967
<b>Moderado</b>	134262,2	37,466	100660,0	28,089
<b>Bajo</b>	32762,6	9,142	11760,6	3,282
<b>Muy Bajo</b>	2767,4	0,772	12,2	0,003
<b>TOTAL</b>	358357,6	100,0	358357,6	100,0

Fuente: Elaboración propia.

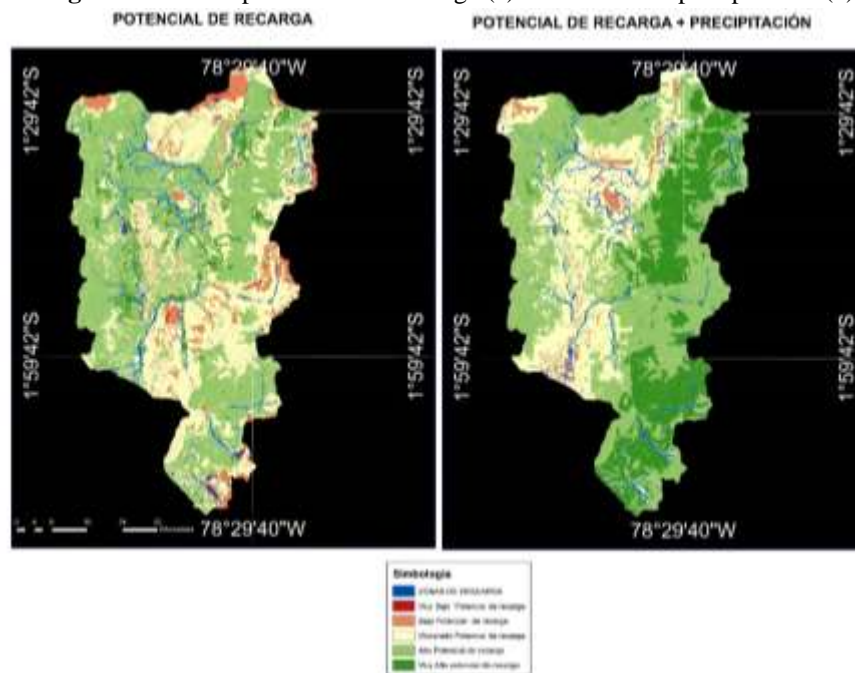
En el mapa de potencial de recarga se observa que 20,6% de la superficie presenta muy alto potencial de recarga; 47%, potencial alto; 28%, potencial moderado; 3,2%, potencial bajo, y 0,003%, muy bajo (Tabla 4). Las zonas de mayor potencial (muy alto + alto) se ubicaron en las parroquias de Cebadas, Pungala, Columbe, Guamote La Matriz, San Juan, Villa La Union, Quimiag, Chambo entre otros.

(Figura 10). Estas zonas se conforman de rocas de tipo sedimentos fluviales, toba, lahares, prioclastos, tillitas, morreras, limolitas, lavas altamente fisuradas, clásticas, piroclásticas, tobas, rocas porfiríticas, diabasas y cuarcitas diaclasadas, en pendientes de 2% y 5% con relieves escarpado y montañoso, vertientes irregulares, piedemonte coluvial y laderas coluviales principalmente corresponde a zonas con vegetación paramuna y bosque, con suelos franco y limoso.

Las zonas de moderado potencial se ubicaron en las parroquias de Guamote , Guano, , Riobamba, Colta, Chambo, poseen suelo de tipo rocosos con lavas altamente fisuradas, clásticas, piroclásticas, tobas, rocas porfiríticas, diabasas y cuarcitas diaclasadas, son áreas con poca cobertura vegetal y suelos arenosos, en pendientes de 5%-15%, en zonas de colinas valles con vertientes convexas y cóncavas.

Las zonas de potencial bajo y muy bajo se ubicaron en las cabeceras cantonales de Guano, Riobamba, Penipe y Chambo y en las parroquias de Palmira, San Juan, Columbe, San Andres, Cotalo, Santiago de Quito, La Providencia entre otros, se presenta en sus territorios superficies de aplanamiento, cuerpos de agua y zonas urbanas con tierras agropecuarias, compuestas por rocas metamórficas, intrusivos, lutitas y areniscas, con suelos arcillosos con presencia de rocas, con pendiente de 0% a 15%.

**Figura 10:** Zonas potenciales de recarga (a) con base en la precipitación (b).



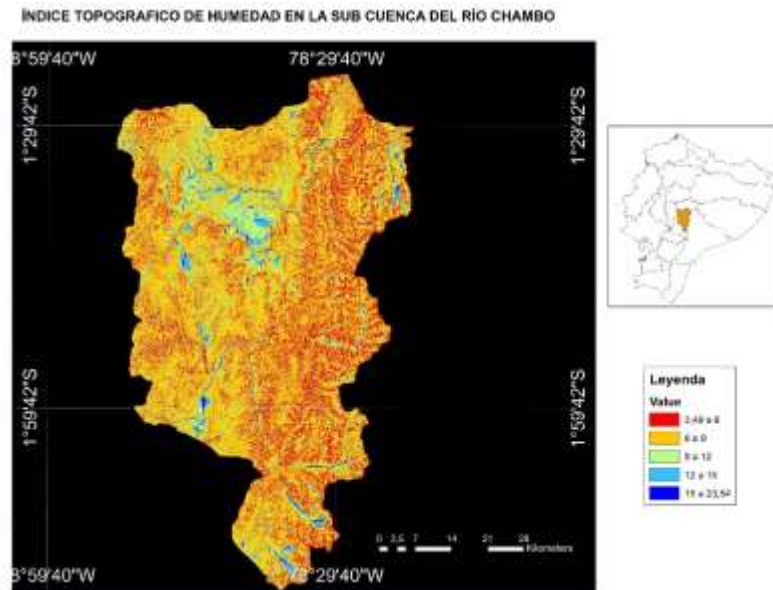
Fuente: elaboración propia.

### Descripción de zonas de descarga

El Índice Topográfico de Humedad (ITH, TWI o CTI)

Al calcular el ITH de obtuvieron valores entre 3,49 y 23,54, se reclasificaron en muy bajo potencial (3,49- 6), bajo (6-9), moderado (9-12), alto (12-15) y muy alto potencial de descarga (15-23,54).

**Figura 11:** Índice topográfico de humedad en la Sub cuenca del Rio Chambo.



Fuente: Elaboración propia.

La zona de descarga permite identificar el funcionamiento de las aguas subterráneas, ya que es el sitio donde emerge el agua y constituye la fase final del recorrido del flujo. (Peñuela and Carrillo, 2013). El mapa de potencial de descarga muestra las áreas con mayor presencia de indicadores regionales asociados con zonas de descarga del agua subterránea ubicada en la zona media de la Subcuenca en las parroquias de San Luis, Lican, Calpi, San Andrés y el cantón Riobamba, además de la parroquia La Matriz en Guamote y en la parroquia Santiago de Quito en la laguna de Colta, en la parte baja las zonas de descarga se localizan en el cantón Penipe (Figura 10).

### Conclusiones

Los resultados de la integración de criterios incorporados a la teoría de los sistemas de flujo desarrollada en el estudio demostraron la confiabilidad de los mismos para obtener una adecuada

aproximación del funcionamiento hidrológico de la subcuenca ya que relaciona la respuesta de la dinámica de las precipitaciones y las implicaciones en el agua subterránea. El análisis multicriterio resultó ser una herramienta útil para identificar zonas potenciales de recarga y descarga hídrica, se obtuvo que las áreas con relieve escarpado, montañoso con vertientes irregulares contribuyen a delimitar zonas de recarga hídrica con potencialidad muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo, con porcentajes de 20,6%, 47 %, 28%, 3,2 % y 0,003% respectivamente, las condiciones litológicas que favorecen la presencia de zonas de recarga están asociadas a rocas fisurada y con porosidad, con suelos de texturas gruesa en zonas de paramo y bosque.

El índice topográfico de humedad permitió delimitar las zonas con muy alto potencial de descarga hídrica (rango de 15 a 23,54), ya que identifica la concentración de humedad en la totalidad del área de la subcuenca, la mayor parte de estas se localizan en planicies y lagunas.

## Referencias

1. Abdalla, F., Moubark, K., Abdelkareem, M., 2020. Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt. *J. Taibah Univ. Sci.* 14, 1350–1362. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1822646>
2. Akter, A., Uddin, A.M.H., Wahid, K. Ben, Ahmed, S., 2020. Predicting groundwater recharge potential zones using geospatial technique. *Sustain. Water Resour. Manag.* 6. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00384-w>
3. Anbarasu, S., Brindha, K., Elango, L., 2020. Multi-influencing factor method for delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques in the western part of Perambalur district, southern India. *Earth Sci. Informatics* 13, 317–332. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00426-8>
4. Andrade Valdospino, A.F., 2019. RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO DE LA SUB-CUENCA DEL RÍO CHAMBO BAJO UNA PERSPECTIVA DE LA HIDROLOGÍA FÍSICA. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
5. Arteaga Delgado, J.C., Veliz Saldarriaga, L.F., Giler-Ormaza, A.M., Félix Mera, J.E., 2020. Determinación del Índice de Humedad Topográfica para la microcuenca “La Mina” de la costa ecuatoriana. *Rev. Dilemas Contemp. Educ. Política y Valores* 2507, 1–9.

6. Bardales Espinoza, W., 2007. Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala 1–10.
7. Berhe Zenebe, G., Hussien, A., Girmay, A., Hailu, G., 2020. Spatial analysis of groundwater vulnerability to contamination and human activity impact using a modified DRASTIC model in Elalla-Aynalem Catchment, Northern Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* 6, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00406-7>
8. Bueso Campos, M., 2010. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA.
9. Bustamante, D.P., 2017. Escenario De Cambio Climático a Nivel De Subcuencas Hidrográficas Para El Año 2050 De La Provincia De Chimborazo- Ecuador. *La Granja* 26, 15. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.02>
10. Castro, R., Romero, M., Loarte, G., Galeas, R., 2013. Modelo de unidades geomorfológicas. *Minist. del Ambient.*
11. Chamorro, K., 2016. Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra 149.
12. Chidichimo, F., Mendoza, B.T., De Biase, M., Catelan, P., Straface, S., Di Gregorio, S., 2018a. Hydrogeological modeling of the groundwater recharge feeding the Chambo aquifer, Ecuador. *AIP Conf. Proc.* 2022. <https://doi.org/10.1063/1.5060683>
13. Chidichimo, F., Mendoza, B.T., De Biase, M., Catelan, P., Straface, S., Di Gregorio, S., 2018b. Hydrogeological modeling of the groundwater recharge feeding the Chambo aquifer, Ecuador. *AIP Conf. Proc.* 2022. <https://doi.org/10.1063/1.5060683>
14. Díaz-Alcaide, S., Martínez-Santos, P., 2019. Review: Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeol. J.* 27, 2307–2324. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02001-3>
15. Elmahdy, S., Mohamed, M., Ali, T., 2020. Land use/land cover changes impact on groundwater level and quality in the northern part of the United Arab Emirates. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12111715>



16. Food and Agriculture Organization [FAO], 2009. Guía para la descripción de suelos. Organ. las Nac. Unidas para la Agric. y la Aliment. 100.
17. Freeze, A., Cherry, J., 1979. Groundwater.
18. Hamdi, M., Goïta, K., Jerbi, H., Zagarni, M.F., 2020. Modeling of the natural groundwater recharge under climate change: Sisseb El Alem Nadhour Saouaf basin (Central Tunisia) case study. Environ. Earth Sci. 79. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09010-6>
19. Hatch Kuri, G., 2017. Agua subterránea y soberanía interdependiente: El caso de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la región binacional de Paso del Norte. Norteamérica 12, 113–145. <https://doi.org/10.20999//nam.2017.b005>
20. Hernández-juárez, R.A., Manuel, L., Rivera, M., Peñuela-arévalo, L.A., 2020. Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio Identification of Potential Groundwater Recharge and Discharge Areas in the Ayuquila-Arm. Investig. Geográficas 1–19. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.59892>
21. Hernández, R., Martínez, L., Pañuela, L., Rivera, S., 2020. Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investig. Geográficas 1–19.
22. Herrera, L., 2017. EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HIDRICA DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE MIRANDA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER -COLOMBIA. Universidad Industrial de Santander.
23. INAMHI, 2015. Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Inst. Nac. Meteorol. e Hidrol. 282.
24. IPCC( Panel Intergubernamental de Cambio Climático), 2019. La Tierra y el Cambio Climático 1–2.
25. IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos., Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos.
26. Kadam, A.K., Umrikar, B.N., Sankhua, R.N., 2020. Assessment of recharge potential zones for groundwater development and management using geospatial and MCDA technologies in

- semiarid region of Western India. *SN Appl. Sci.* 2. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2079-7>
27. Lee, Sunmin, Hyun, Y., Lee, Saro, Lee, M.J., 2020. Groundwater potential mapping using remote sensing and GIS-based machine learning techniques. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12071200>
  28. MAE, 2013. Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
  29. MAE, MAGAP, 2013. Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador Continental, Ministerio del Ambiente del Ecuador y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca.
  30. Matomela, N., Li, T., Ikhumhen, H.O., 2020. Siting of Rainwater Harvesting Potential Sites in Arid or Semi-arid Watersheds Using GIS-based Techniques. *Environ. Process.* 7, 631–652. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00434-7>
  31. Naranjo Gaibor, L.F., 2013. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO.
  32. Ortiz, J.N., Nikolskii, G., Palacios Vélez, O., Rafael, A.H., 1999. Irrigation Water Losses by Deep Percolation During Infiltration Process. *Terra Latinoam.* 17, 115–124.
  33. Peñuela, A.L., Carrillo, R.J.J., 2013. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investig. Geogr.* 81, 18–32.
  34. Podvezko, V., 2009. Application of AHP technique. *J. Bus. Econ. Manag.* 10, 181–189. <https://doi.org/10.3846/1611-1699.2009.10.181-189>
  35. Rodriguez, D.M., Pérez, P., 2014. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA GUARA, DE CUBA. *Aqua-LAC Rev. del Programa Hidrológico Int. para América Lat. y el Caribe* 6, 58–70.
  36. Roy, S., Hazra, S., Chanda, A., Das, S., 2020. Assessment of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making technique: a micro-level case study from red and lateritic zone (RLZ) of West Bengal, India. *Sustain. Water Resour. Manag.* 6, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00373-z>
  37. Saaty, T.L., 1987. Risk—Its Priority and Probability: The Analytic Hierarchy Process. *Risk Anal.* 7, 159–172. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1987.tb00980.x>

38. Secretaria Nacional del Agua, 2010. CREACION DEMARCACIONES. Acuerdo 2010-66. Ecuador.
39. Sener, E., Davraz, A., Ozcelik, M., 2005. An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeol. J.* 13, 826–834. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0378-5>
40. Singh, J., Abraham, T., Kumar, M., Choudhary, A., 2018. Influence of different cultural method and potassium levels for improvement of growth & yield of wheat under Eastern U.P. *Green farming* 9, 8.
41. Tiwari, R.N., Kushwaha, V.K., 2020. An Integrated Study to Delineate the Groundwater Potential Zones Using Geospatial Approach of Sidhi Area, Madhya Pradesh. *J. Geol. Soc. India* 95, 520–526. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1471-7>
42. UNESCO, 2021. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021, UNESCO. <https://doi.org/10.17163/lgr.n5.2006.05>
43. Varela, S., Terribilie, L., OLivieira, G., 2015. ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía. *Ecosistemas* 24, 88–92. <https://doi.org/10.7818/re.2014.24-3.00>
44. Yifru, B.A., Mitiku, D.B., Tolera, M.B., Chang, S.W., Chung, I.M., 2020. Groundwater Potential Mapping Using SWAT and GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis. *KSCE J. Civ. Eng.* 24, 2546–2559. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0168-1>
45. Zhu, Q., Abdelkareem, M., 2021. Mapping groundwater potential zones using a knowledge-driven approach and GIS analysis. *Water (Switzerland)* 13, 1–24. <https://doi.org/10.3390/w13050579>