



**UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**

**Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua**

**Carrera de Hidrología**

***Estimación de la recarga de agua subterránea en la cuenca del  
Río Cutuchi, Cotopaxi, Ecuador***

**Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**AUTOR: BRYAN JAVIER PUENTE CEVALLOS**

**TUTOR: PhD. BRYAN GUIDO VALENCIA CASTILLO**

**Napo – Ecuador**

**2023**

## DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Bryan Javier Puente Cevallos con documento de identidad 1205485657, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniero en Ciencias del Agua 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 el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 3 de octubre de 2023



---

Bryan Javier Puente Cevallos  
1205485657

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Bryan Javier Puente Cevallos, con documento de identidad N° 1205485657, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “Estimación de la Recarga de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Cutuchi, Cotopaxi, Ecuador” de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 3 de octubre de 2023



---

Bryan Javier Puente Cevallos

1205485657

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “Estimación de la Recarga de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Cutuchi, Cotopaxi, Ecuador” en la modalidad de: Artículo Original en español y de manera optativa en inglés, adaptado a los parámetros y normas de una revista indexada, fue realizado por Bryan Javier Puente Cevallos, 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 Ikiám, para su entrega y defensa.

Tena, 3 de octubre de 2023



---

Bryan Guido Valencia Castillo  
1760101632

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco sinceramente a mi tutor, PhD Bryan Valencia por su invaluable apoyo y orientación durante la realización de este artículo científico. Su profundo conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de mi investigación.

También quiero expresar mi gratitud a la Universidad Regional Amazónica IKIAM por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este estudio y por su respaldo institucional. La excelencia académica y el enfoque en la investigación de IKIAM han sido una fuente de inspiración y motivación para alcanzar los objetivos planteados.

Asimismo, deseo agradecer a todos los profesores que me han brindado su apoyo y asesoramiento a lo largo de este proceso. Su dedicación, comentarios constructivos y sabiduría han sido invaluable en mi formación científica.

Sin el apoyo de todas estas personas, este logro no hubiera sido posible. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro a mis padres, Santos Puente y Narcisa Cevallos, quienes han sido mi fuente constante de apoyo y motivación a lo largo de mi vida. Su dedicación, sacrificio y valores inculcados me han permitido llegar hasta aquí. Gracias por creer en mí, por alentarme en cada paso y por ser mis pilares en los momentos más difíciles.

A mis estimados profesores, quienes han sido guías fundamentales en mi proceso de aprendizaje. Su pasión por la enseñanza, su sabiduría y su compromiso con mi desarrollo académico han sido invaluable. A través de su dedicación y orientación, me han ayudado a descubrir mis habilidades. Agradezco su paciencia y su constante apoyo, que han sido una inspiración en mi camino hacia el conocimiento.

A mis queridos amigos, quienes han compartido risas, retos y momentos inolvidables a lo largo de este camino. Gracias por estar siempre ahí, por escucharme, por brindarme su compañía y por ser una fuente constante de ánimo y motivación. Sus palabras alentadoras y su amistad sincera han sido un soporte fundamental en este recorrido.

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL .....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA .....	vi
TABLA DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLA.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Área de Estudio.....	2
1.2. Marco Geológico .....	3
1.3. Cuenca del río Cutuchi.....	5
2. DATOS Y MÉTODOS .....	6
2.1. Consideraciones .....	7
2.2. Modelo de Precipitación .....	9
2.3. Modelo de Temperatura.....	10
2.4. Modelo de Evapotranspiración .....	10
2.5. Modelo de Escurrimiento .....	12
2.6. Modelo de Infiltración .....	14
3. RESULTADOS .....	14
4. DISCUSIÓN .....	18
5. CONCLUSIÓN.....	19
6. BIBLIOGRAFÍA .....	21

## ÍNDICE DE TABLA

<b>Tabla 1.</b> Valores k en función del tipo y uso de suelo.....	12
<b>Tabla 2.</b> Superficie y precipitación por subcuencas y quebradas .....	14
<b>Tabla 3.</b> Cuantificación de la distribución del agua lluvia.....	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio. UTM (WGS84). .....	3
<b>Figura 2.</b> Formaciones y estructura de la cuenca del río Cutuchi. ....	4
<b>Figura 3.</b> Cuenca del río Cutuchi. Se muestran las subcuencas y ríos. ....	6
<b>Figura 4.</b> Diagrama de pasos en SIG para la obtención de modelos. ....	8
<b>Figura 5.</b> Modelo de precipitación total anual de la cuenca del río Cutuchi. Periodo 1985-2015. ....	9
<b>Figura 6.</b> Modelo de Temperatura media anual de la cuenca Cutuchi. Periodo 1970-2000. UTM (WGS84). ....	10
<b>Figura 7.</b> Modelo de evapotranspiración de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84).....	11
<b>Figura 8.</b> Modelo de escurrimiento superficial de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84). ....	13
<b>Figura 9.</b> Modelo de Infiltración de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84). ....	17

## RESUMEN

El requerimiento hídrico de las poblaciones en crecimiento ha generado un déficit en las fuentes de agua subterránea, en ese sentido el objetivo de esta investigación es estimar la recarga natural por infiltración de agua proveniente de precipitaciones en la cuenca del río Cutuchi ubicada en la provincia de Cotopaxi. Se utilizaron series temporales de precipitación para elaborar los modelos de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Los modelos obtenidos incluyendo el uso y tipo de suelo se usaron para generar un modelo de escurrimiento superficial. Se aplicó la ecuación general de balance hidrológico en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener el modelo de infiltración. Los resultados indican que del total de la precipitación, el 55,8 % se evapotranspira, el 16,3 % se escurre superficialmente y que el 27,9 % se infiltra en el suelo. El volumen calculado que recarga las aguas subterráneas es de 53581,9 Hm<sup>3</sup>/año y la mayor parte se desarrolla al noroeste y suroeste de la cuenca, llegando a valores máximos de infiltración de hasta 731,5 mm/año, y se reduce gradualmente hacia el centro de la cuenca hasta llegar a 24 mm/año de infiltración.

**Palabras Clave:** Agua subterránea, cuenca del río Cutuchi, recarga natural, balance hidrológico.

## ABSTRACT

The water demand of growing populations has resulted in a deficit in groundwater sources. In this regard, the objective of this research is to estimate the natural recharge through water infiltration from precipitation in the Cutuchi River basin, located in the province of Cotopaxi. Time series of precipitation were used to develop models for precipitation, temperature, and evapotranspiration. The obtained models, including land use and soil type, were used to generate a surface runoff model. The general equation of the hydrological balance was applied in a Geographic Information System (GIS) to obtain the infiltration model. The results indicate that of the overall precipitation, 55.8% is evapotranspired, 16.3% flows superficially, and 27.9% infiltrates into the soil. The calculated volume recharging groundwater is 53581,9 Hm<sup>3</sup>/year, and most of it occurs in the northwest and southwest regions of the basin, reaching maximum infiltration values of up to 731.5 mm/year. It gradually reduces towards the center of the basin, reaching a minimum infiltration of 24 mm/year.

**Keywords:** Groundwater, Cutuchi River basin, natural recharge, hydrological balance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual enfrenta el desafío de proporcionar una mayor cantidad de agua debido al crecimiento demográfico en curso (Carrera, 2016). En las zonas donde las actividades económicas se expanden, se observa una creciente escasez del recurso hídrico (Yáñez & Vásquez, 2015). En la cuenca del río Cutuchi ubicada en la provincia de Cotopaxi existe un déficit hídrico durante los meses de verano que comprende los meses de junio a septiembre (Varela & Ron, 2018). El déficit impacta las actividades de agricultura y consumo humano (CISPDR, 2016). La cuenca del río Cutuchi tiene el acuífero Latacunga que es uno de los más importantes de la cuenca, y de la cual se extrae agua para riego en gran parte de la cuenca. Este acuífero se encuentra en riesgo debido a su sobreexplotación (CISPDR, 2016).

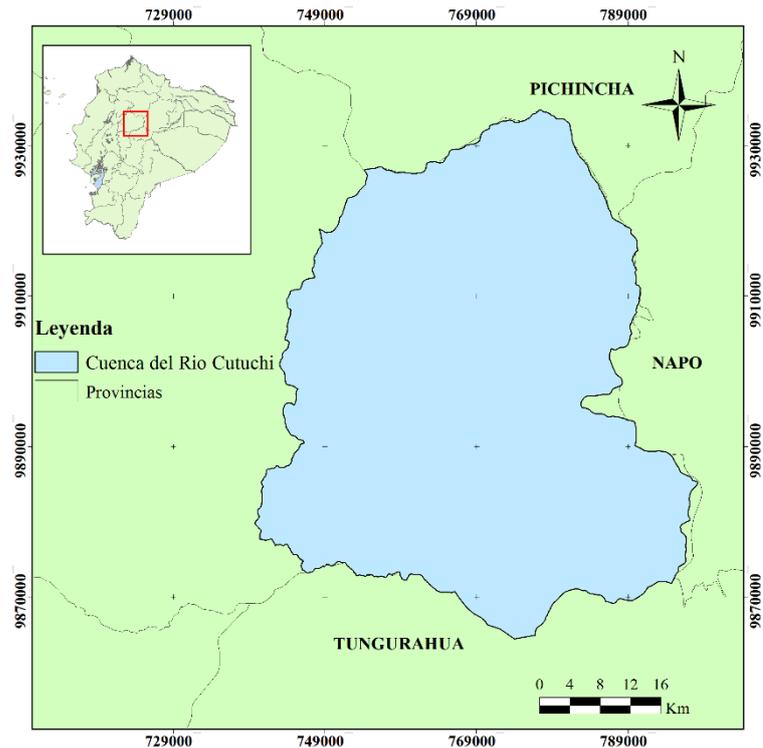
Es posible evaluar la disponibilidad de agua mediante un balance hidrológico que implica medir tanto la recarga como la extracción del recurso hídrico. Cuantificar la recarga natural es un requisito fundamental para el manejo sostenible del recurso hídrico subterráneo, ya que conociendo la cantidad de agua que se dispone se puede planificar de mejor manera su extracción para asegurar su disponibilidad (Cruz-Falcón et al., 2011). De igual manera, conocer dónde están las principales zonas de recarga permite tomar medidas para maximizar la infiltración del agua de lluvia en el suelo (Shaxzon & Barber, 2005). Especialmente en zonas áridas donde su principal actividad económica es la agricultura que en gran medida depende de las aguas subterráneas (Cruz-Falcón et al., 2011).

Existen dos categorías principales de métodos utilizados para estimar la recarga: recarga potencial y recarga real (Bridget et al., 2002). Los métodos de estimación de recarga potencial se basan en datos de aguas superficiales y de la zona no saturada (Bridget et al., 2002). Por otro lado, las estimaciones de recarga real se basan en datos superficiales como la precipitación, temperatura, escurrimientos y evapotranspiración (Cruz-Falcón et al., 2011). A diferencia de la recarga potencial, estas estimaciones consideran variables más directamente relacionadas con los procesos de intercambio de agua en la superficie por lo que se considera que es más precisa. La recarga de agua subterránea ocurre cuando el agua superficial o de lluvia se infiltra en el suelo hasta alcanzar la zona saturada que es donde se almacena el agua (Cruz-Falcón et al., 2011).

La recarga de un acuífero se origina a partir de múltiples fuentes, siendo la precipitación el principal factor responsable de la recarga vertical, mientras que el flujo horizontal subterráneo contribuye a la recarga de manera horizontal (Peña & Arcos, 2004). Esto significa que el agua puede infiltrarse verticalmente a través del suelo como resultado de la precipitación, así como moverse lateralmente desde áreas adyacentes a través del flujo subterráneo, contribuyendo así a la recarga del acuífero. En este estudio se estima la infiltración de agua proveniente de lluvia en el subsuelo de la cuenca Cutuchi, con la finalidad de estimar el volumen de agua que se infiltra anualmente en el subsuelo, a través de la aplicación de un balance hidrológico en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permite identificar las zonas de mayor infiltración de las que depende la recarga de las fuentes de agua subterránea y así entender su dinámica para regular la extracción y administrar de forma adecuada el recurso hídrico para asegurar su disponibilidad.

### **1.1. Área de Estudio**

La cuenca del río Cutuchi se encuentra ubicada en la Provincia de Cotopaxi en los cantones Pujilí, Latacunga, Saquisilí y Salcedo. Una pequeña parte de la cuenca se encuentra en la Provincia de Tungurahua en los cantones de Ambato y Santiago de Píllaro (Fig. 1). Dentro de esta cuenca se encuentra la unidad hidrogeológica Latacunga, que es el principal acuífero del cual se obtiene el recurso hídrico. El clima de la cuenca se clasifica como Zona Tropical Ecuatorial y se encuentra influenciado por los regímenes climáticos occidental y oriental predominantes en el callejón interandino (Yáñez & Vásquez, 2015).



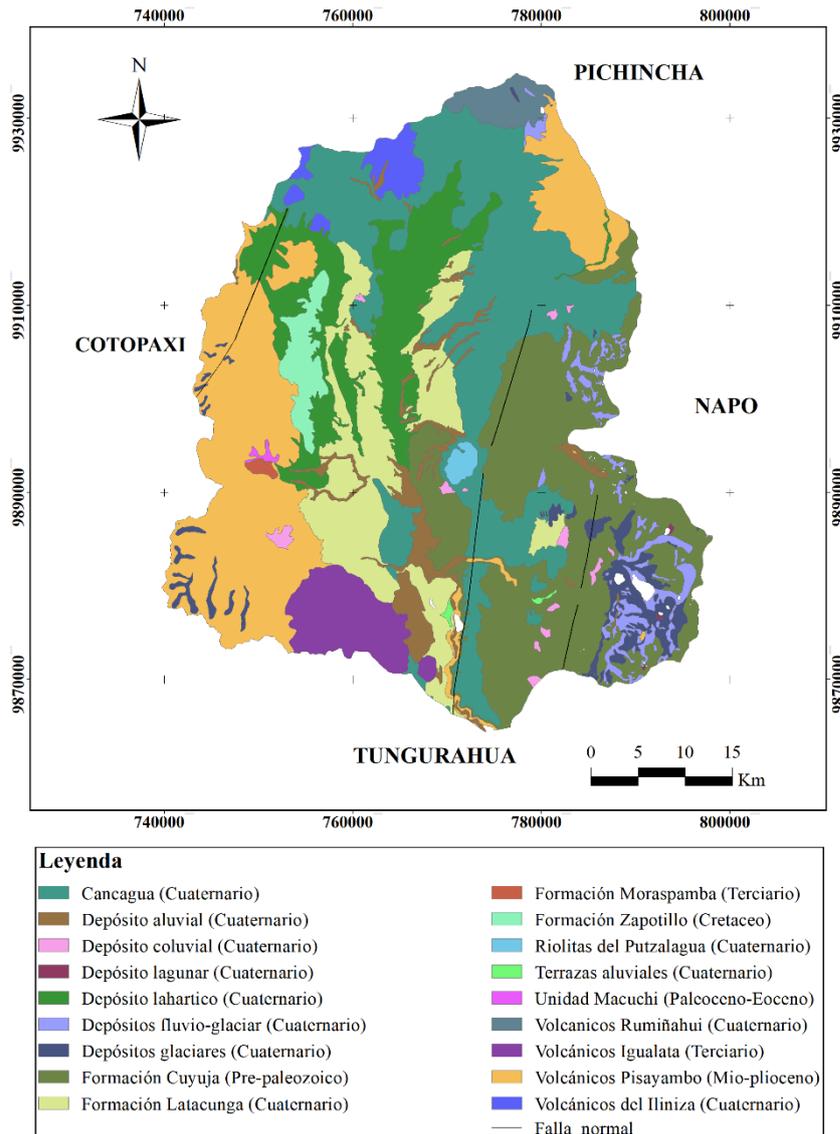
**Figura 1.** Localización del área de estudio. UTM (WGS84).  
**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

En la parte occidental de la cuenca, se registra una mayor cantidad de precipitación durante los meses de octubre a mayo, la cual proviene del océano Pacífico y es interceptada por la Cordillera Occidental (Yáñez & Vásquez, 2015). En el lado este la precipitación proviene de lado de la amazonia que es interceptada por la Cordillera Oriental produciendo un máximo de precipitación entre los meses de junio y septiembre (Pacheco, 2007). Las precipitaciones en esta zona decrecen hacia el centro de la cuenca en relación a la elevación con una precipitación anual que oscila entre 600 y 1200 mm de precipitación. La humedad atmosférica de la cuenca presenta valores de 93% en el Cotopaxi y de 74,4% a la altura de Latacunga (Pacheco, 2007). La temperatura media anual de la cuenca es de 13,5°C, con una temperatura media que varía de -2° en las partes altas a 15°C en las partes bajas. Durante el día la temperatura puede llegar de 17 a 19 °C a una altura de 2400 m.s.n.m. y en las madrugadas a -2°C en las cumbres del volcán Cotopaxi a 5897 m.s.n.m. (Llano, 2015).

## 1.2. Marco Geológico

La cuenca del río Cutuchi se encuentra entre los Andes Ecuatorianos. Su altitud varía desde los 2700 m hasta los 5897 m.s.n.m. (Tarco & Veintimilla, 2010). La formación de

esta cuenca fue el resultado de procesos tectónicos, actividad volcánica andina y eventos de erosión y sedimentación en la zona. En términos de relieve, la cuenca se caracteriza por tener una pendiente media del 18,9% (Yáñez & Vásquez, 2015). En su zona central, el relieve varía entre plano y ligeramente inclinado, con pendientes que oscilan entre 0 y 5%. Esta área de relieve suave abarca la mayor parte de la superficie de la cuenca. En contraste las pendientes que superan el 70% se ubican en las estribaciones de la Cordillera Central y Occidental (PDyOT Latacunga, 2014).



**Figura 2.** Formaciones y estructura de la cuenca del río Cutuchi.  
**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

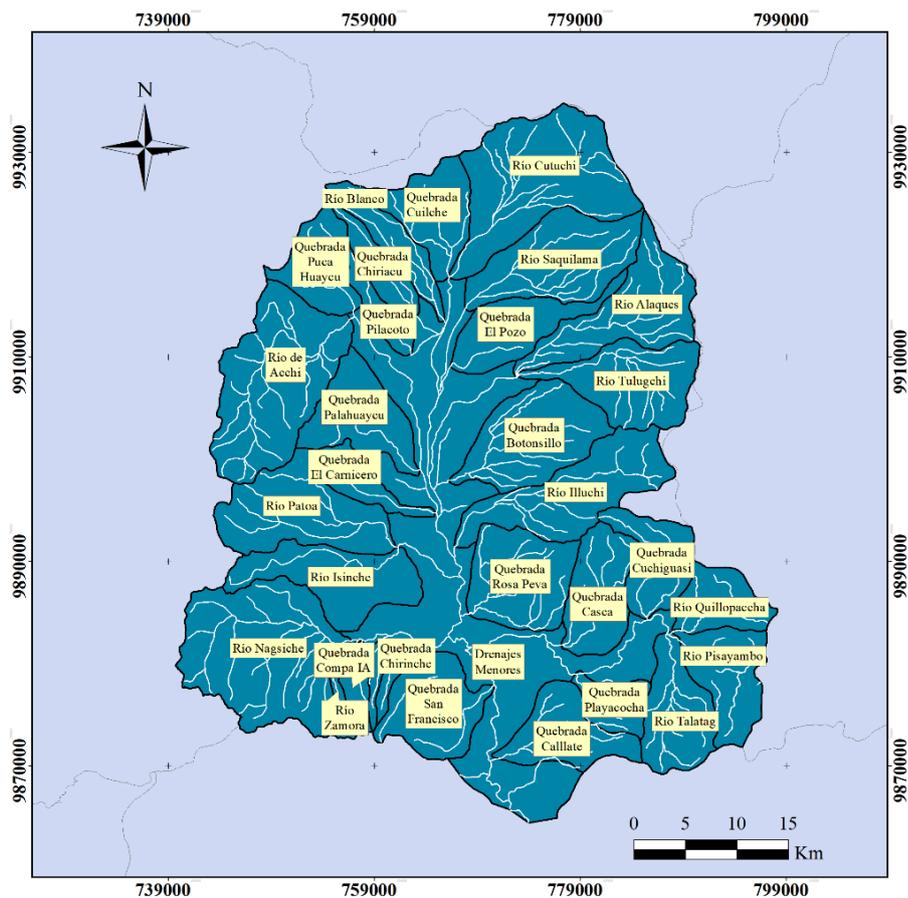
La cuenca está asentada sobre cancaguas (Fig. 2), un gran depósito lahartico que está constituido por bloques, cantos rodados y guijarros dentro de una matriz arcillosa (Yáñez

& Vásquez, 2015). También posee materiales coluviales, lacustres, cenizas, tobas vulcano-sedimentarias y materiales conglomerados (PDyOT Latacunga, 2014). La formación Latacunga (Cuaternario) conformada por la unidad Latacunga, unidad Pilaló de San Andres-Nagsiche, unidad Yanayacu y unidad 37 Chalupas (LOZADA, 2019). La unidad Latacunga se subdivide en dos fases distintas. La primera fase, ubicada en la base, tiene un origen volcánico y está compuesta por una intercalación de sedimentos limo-arenosos con materiales de tipo lava. También se encuentra presente material conglomerático con matriz arenosa en esta fase (LOZADA, 2019). La segunda fase, que se encuentra en la parte superior, es de naturaleza sedimentaria y está compuesta por lavas grises y brechas rojizas de composición basalto andesítica (Bombón, 2018). La formación Moraspamba (Terciario) consiste en lutitas intercaladas y areniscas con conglomerados. La formación Cuyuja (prepaleozoico) se compone de esquistos pelíticos grafiticos cruzados por vetas de cuarzo que contienen cianita, gneis, pizarras y cuarcitas (PDyOT Palora, 2015).

La formación Zapotillo (cretáceo) consta de lutitas intercaladas de lava y toba andesítica (Carrasco, 2018). La formación Cancagua, de origen cuaternario, se compone principalmente de materiales derivados de erupciones volcánicas. Estos materiales incluyen fragmentos de lava, andesita, piedra pómez, arena y ceniza volcánica. La Cancagua se presenta como una toba fina de color blanco o amarillento, que recubre las laderas de las montañas (Guerrón & Tacuri, 2012). La unidad Macuchi (Paleoceno-eoceno) consta de rocas vulcanosedimentarias, también existe presencia de lavas e intrusiones de diabasa en menor medida (Bombón, 2018).

### **1.3. Cuenca del río Cutuchi**

La red hidrográfica de la cuenca del río Cutuchi abarca un área de 2664,17 km<sup>2</sup> y se divide en varias subcuencas. En la parte superior de la cuenca se encuentra la subcuenca que marca el nacimiento del río Cutuchi y atraviesa la región en dirección de norte a sur (Yáñez & Vásquez, 2015). En su curso se van incorporando otras subcuencas de ríos que nacen en flanco Occidental (Río Blanco, Río Acchi, Río Patoa, Río Isinche, Nagshiche, Río Zamora) como en el Oriental (Río Saquilama, Río Alaques, Río Tulugchi, Río Illuchi, Río Quillopaccha, Río Pisayambo y Río Talatag), así como también algunas quebradas por ambos lados: quebrada Pilacoto, quebrada Palahuaycu, quebrada Botonsillo, quebrada Rosa Peva, quebrada Cuchiguasi, quebrada San francisco (Yáñez & Vásquez, 2015).



**Figura 3.** Cuenca del río Cutuchi. Se muestran las subcuencas y ríos.  
**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

## 2. DATOS Y MÉTODOS

Se descargó datos de precipitación anual en formato ráster del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en una resolución espacial 3338,5 m y una resolución temporal mensual desde 1985 hasta 2015. Los datos de temperaturas normales climatológicas fueron obtenidos de WorldClim. Se procedió a la descarga de 12 archivos ráster en formato Geo TIFF, para cada mes del año, con una resolución espacial de 926,6 m. Estos datos abarcan el período comprendido entre 1970 y 2000. Estos 12 ráster de temperatura se promediaron para obtener la temperatura media anual, para validar el modelo se utilizó información de temperatura media anual de estaciones meteorológicas del INAMHI. Como resultado de la evaluación de precisión del modelo se obtuvo un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0,3 para el área de la cuenca Cutuchi. Un ECM de 0,3 puede ser considerado relativamente bajo y sugiere que el

modelo tiene una buena aproximación a los datos reales de temperatura media anual en la cuenca Cutuchi.

En el análisis de la recarga generada por las precipitaciones en la cuenca del río Cutuchi, se empleó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para aplicar la ecuación general del balance hidrológico, siguiendo la metodología utilizada por Cruz-Falcón et al. (2011). Los coeficientes de escurrimiento utilizados en el estudio se obtuvieron de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

El enfoque metodológico se orientó hacia la estimación de la infiltración de agua de lluvia en el subsuelo, considerando las condiciones físicas del medio ambiente que influyen significativamente en este proceso. En el caso de estimación potencial de la recarga, se utilizaron datos de capas ráster de temperatura y precipitación (Cruz-Falcón et al., 2011). A partir de estas capas se generaron los modelos de precipitación y temperatura. Usando la fórmula de Turc (1954) en la cual se incluye la temperatura y precipitación se generó el modelo de evapotranspiración. Para el modelo de coeficiente de escurrimiento, fue necesario obtener información de cobertura del suelo, permeabilidad y precipitación, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 en su apéndice normativo "A". La información de cobertura del suelo permitió identificar las diferentes características del terreno y su influencia en el escurrimiento, mientras que la permeabilidad y la precipitación proporcionaron datos importantes para cuantificar la cantidad de agua que se infiltra. Luego se integró este modelo con el modelo de precipitación para obtener el modelo de escurrimiento. Una vez obtenidos los modelos de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento se generó el modelo de infiltración (Cruz-Falcón et al., 2011).

## **2.1. Consideraciones**

Se tomaron las siguientes consideraciones de los componentes de entradas y salidas, debido a que la cuenca capta el agua directamente de las precipitaciones, la recarga horizontal que implica el flujo horizontal del agua desde otro acuífero o el mar no fue tomada en cuenta. Tampoco se consideró la recarga por riego y recarga artificial debido a que no existe a disposición esta información para el área de estudio, por lo que los resultados podrían verse ligeramente afectados. Únicamente se consideró la evapotranspiración (Et) y escurrimiento superficial (Es) como salidas. Como entradas solo se considera la recarga vertical por lluvias. Por último, se aplicó la forma reducida

de la ecuación de balance hidrológico para calcular la infiltración (Castany, 1971 en Cruz-Falcón et al., 2011) .

$$P = Et + Es + I \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P: precipitación

Et: Evapotranspiración

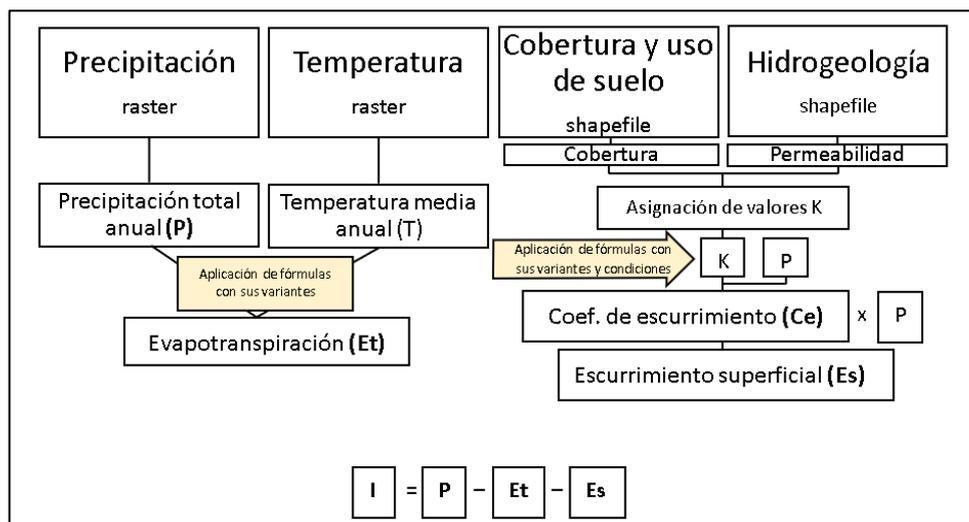
Es: Esgurrimiento superficial

I: Infiltración

Por lo tanto:

$$I = P - Es - Et$$

El procedimiento realizado para aplicar el SIG se resume en el diagrama de la figura 4.



**Figura 4.** Diagrama de pasos en SIG para la obtención de modelos.

**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

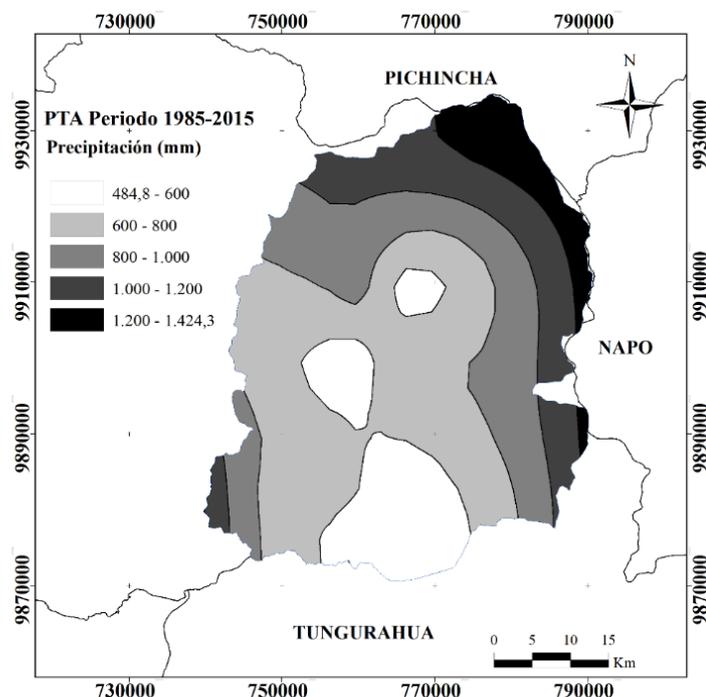
Inicialmente se partió desde los datos históricos de precipitación y temperatura para calcular la precipitación total anual (P) y la temperatura media anual (T). El siguiente paso fue calcular la evapotranspiración (Et) usando la fórmula de Turc (1954), como datos de entrada se usaron los modelos de precipitación y temperatura. El siguiente modelo se elabora a partir de la relación entre cobertura y permeabilidad del suelo para asignar valores k y que posteriormente se usó en conjunto con el modelo de precipitación para generar el modelo de coeficiente de escurrimiento (Cruz-Falcón et al., 2011). Se generó el modelo de escurrimiento superficial (Es) multiplicando el modelo de

coeficiente de escurrimiento por el modelo de precipitación. A continuación, se obtuvo el modelo de infiltración (I) restando los modelos de precipitación (P), evapotranspiración (Et) y escurrimiento superficial (Es) (Cruz-Falcón et al., 2011).

## 2.2. Modelo de Precipitación

El ráster obtenido del INAMHI contenía la precipitación total anual calculada para el periodo de 1985 hasta 2015 (Fig. 5). Se llevó a cabo la reproyección de la capa utilizando el sistema de coordenadas UTM 17S de 1984, y se aplicó la técnica de remuestreo bilineal para modificar el tamaño de celda. Esto permitió pasar de una resolución inicial de 3338,5 m a una resolución más detallada de 100 m, generando nuevos píxeles mediante interpolación.

El objetivo principal de este proceso de remuestreo fue representar los mapas con mayor nivel de detalle. Es importante mencionar que, para realizar las operaciones entre los archivos ráster, es esencial que todos tengan la misma resolución. Por lo tanto, al ajustar la resolución de las capas mediante el remuestreo, se aseguró la coherencia y consistencia necesarias para llevar a cabo los análisis hidrológicos y evaluar la infiltración de agua de lluvia en el subsuelo.

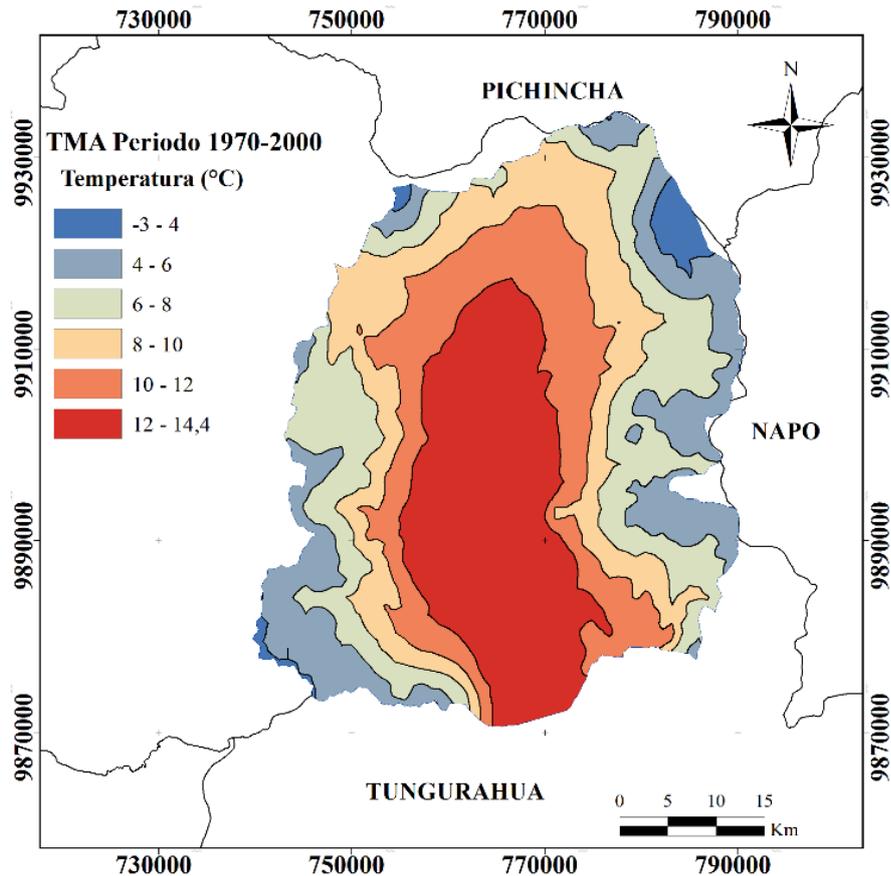


**Figura 5.** Modelo de precipitación total anual de la cuenca del río Cutuchi. Período 1985-2015.

**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

### 2.3. Modelo de Temperatura

Para este modelo se utilizaron los 12 archivos de temperatura media de cada mes, los cuales fueron promediados usando el software ArcMap mediante la herramienta "Calculadora ráster". De esta forma se obtuvo el modelo de temperatura que es la temperatura media anual (Fig. 6) para el periodo 1970-2000.



**Figura 6.** Modelo de Temperatura media anual de la cuenca Cutuchi. Periodo 1970-2000. UTM (WGS84).

**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

### 2.4. Modelo de Evapotranspiración

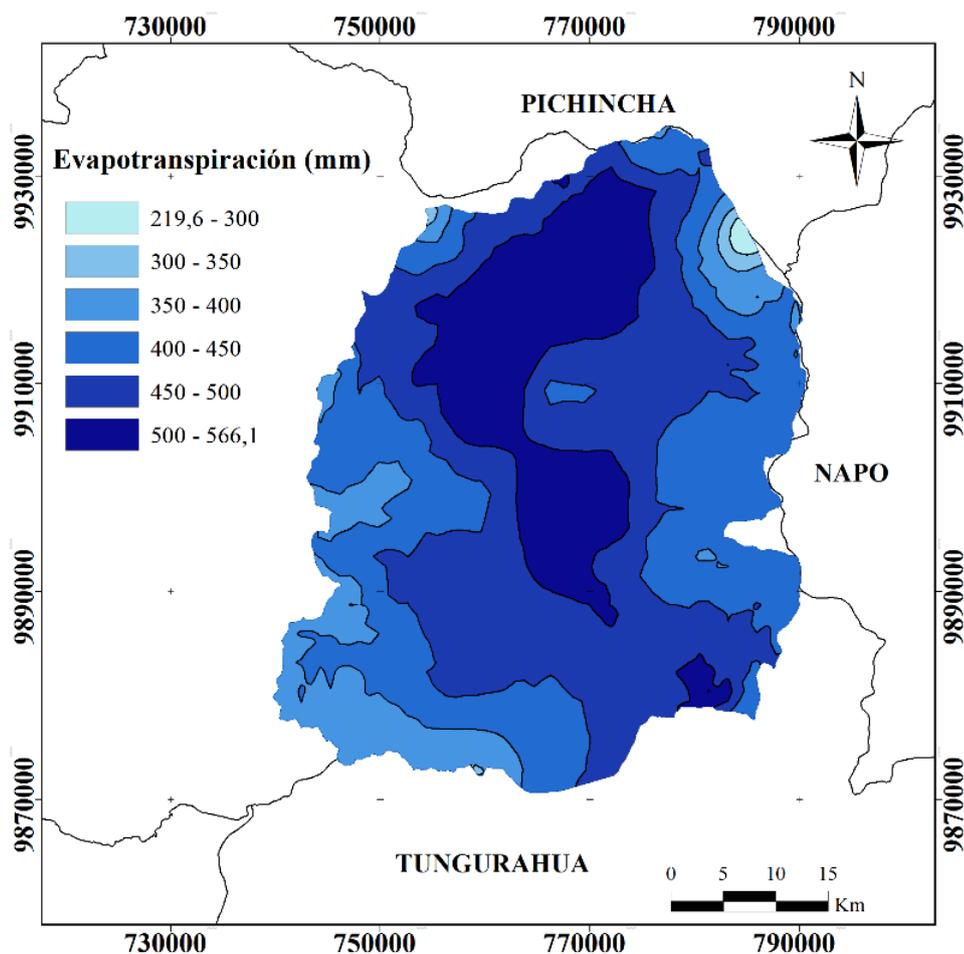
Para calcular la evapotranspiración real anual se utilizó la fórmula empírica de Turc (1954). Como datos de entrada se usan los modelos de precipitación (Fig. 5) y de temperatura (Fig. 6). El factor constante determina qué cantidad del agua precipitada regresa a la atmósfera. Dependiendo de las condiciones climáticas de precipitación y temperatura, se puede modificar cuando los valores obtenidos de evapotranspiración no representan las condiciones reales. En Ortiz & Chile (2020) se calculó la

evapotranspiración en la misma región que se ubica la cuenca Cutuchi y con valores similares de temperatura y precipitación que fueron obtenidos de estaciones climatológicas, se encontró que la evapotranspiración obtenida tanto por el método de Turc como medida directamente no difieren en gran medida, por lo cual se utilizó el mismo factor constante que en dicho estudio.

$$Et = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad \text{Ecuación 3}$$

Al utilizar estas fórmulas en el Sistema de Información Geográfica (SIG), se generó el modelo de evapotranspiración, el cual se representa en la Figura 7 del estudio.



**Figura 7.** Modelo de evapotranspiración de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84).  
**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

## 2.5. Modelo de Escurrimiento

Para obtener el modelo de escurrimiento, se requirió previamente generar un modelo de coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ). Este modelo se creó a partir del cálculo de los coeficientes de escurrimiento, los cuales dependen del parámetro  $k$  (Cruz-Falcón et al., 2011). El parámetro  $k$  determina el porcentaje del agua precipitada que escurre superficialmente en diferentes condiciones del suelo, como la permeabilidad y el uso del suelo. La tabla 1 proporciona información sobre los coeficientes de escurrimiento correspondientes a diferentes valores de  $k$ , lo que permitió generar el modelo de coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) necesario para calcular el escurrimiento superficial en la cuenca del río Cutuchi.

Se usó información de los mapas de hidrogeología y uso de suelo del MAGAP (2005) en formato *shapefile*.

**Tabla 1.** Valores  $k$  en función del tipo y uso de suelo.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características</b>		
A	Suelos permeables		
B	Suelos medianamente permeables		
C	Suelos casi impermeables		
<b>Uso del suelo</b>	<b>Tipo de suelo</b>		
	A	B	C
Áreas desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos	0,24	0,27	0,30
Pastizal	0,20	0,24	0,30
Bosque	0,12	0,22	0,26
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

**Realizado por:** NOM-011-CNA-2000.

De la capa de hidrogeología se consideró la permeabilidad y se reclasificó en tres niveles de permeabilidad, igualmente la capa de uso de suelo también se reclasificó de acuerdo a las categorías de la tabla 1 obtenido de la NOM-011-CNA-2000. La capa de parámetro  $k$  se transformó a formato ráster en la misma resolución de los modelos anteriores. Una vez obtenido el ráster de parámetro  $k$  y en conjunto con el modelo de

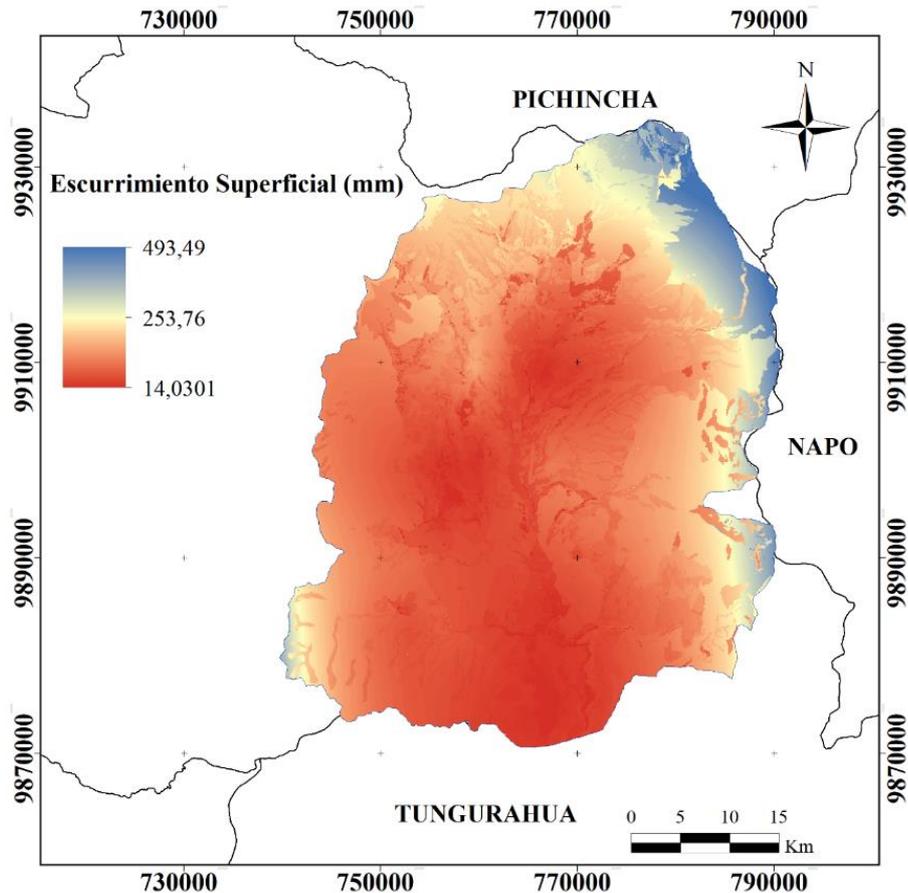
precipitación (Fig. 5) previamente generado, se calculó el modelo de coeficientes de escurrimiento usando las fórmulas empíricas de la NOM-011-CNA-2000 que se presentan a continuación:

$$C_e = \frac{K(P-250)}{2000} \quad \text{para } K \leq 0.15 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$C_e = K \left( P - \frac{250}{2000} + \left( K - \frac{0.15}{1.5} \right) \right) \quad \text{para } K > 0.15 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $C_e$  es el coeficiente de escurrimiento anual (adimensional).

La capa resultante del coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) se multiplicó por el modelo de precipitación, lo que permitió obtener el modelo de escurrimiento anual. El resultado de esta operación se representa en la Figura 8 del estudio. Es relevante resaltar que estas fórmulas se consideran válidas dentro de un rango de valores de precipitación anual que oscila entre 350 y 2150 mm al año.



**Figura 8.** Modelo de escurrimiento superficial de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84).

Realizado por: Puente, Bryan, 2023.

## 2.6. Modelo de Infiltración

El modelo de infiltración se construyó utilizando el modelo de precipitación (Figura 5) y restando los modelos de evapotranspiración (Figura 7) y de escurrimiento (Figura 8) (Cruz-Falcón et al., 2011). La generación del modelo de infiltración se llevó a cabo utilizando la siguiente fórmula:

$$I = P - Et - Es \text{ (Castany 1971 en Cruz-Falcón et al., 2011)}$$

## 3. RESULTADOS

Utilizando el modelo de precipitación (Fig. 5), se realizó una estimación de la captación promedio anual de lluvia mediante la suma de los píxeles correspondientes. Se obtuvo una captación promedio anual de 2467 Hm<sup>3</sup> (hectómetros cúbicos). En el modelo, se puede observar un rango de valores que oscila entre 484,8 y 1424 mm/año, representando las variaciones en la distribución espacial de la precipitación en la cuenca del río Cutuchi. Esta información es fundamental para comprender el régimen de precipitación y su contribución al balance hídrico en la zona de estudio.

La mayor precipitación se presenta al sureste de la cuenca en las zonas más elevadas y disminuye gradualmente hacia el valle que se encuentra hacia el centro y sur de la cuenca. La tabla 2 muestra los valores de precipitación media, área y porcentaje de captación para cada subcuenca y quebrada de la cuenca Cutuchi.

**Tabla 2.** Superficie y precipitación por subcuencas y quebradas.

SUBCUENCAS Y QUEBRADAS	ÁREA (km <sup>2</sup> )	pcp (Hm <sup>3</sup> )	pcp (%)
QUEBRADA CUILCHE	62.72	6561.1	3.42
RIO BLANCO	40.14	3949.8	2.06
QUEBRADA CUCHIGUASI	56.43	6143.0	3.20
QUEBRADA CASCA	69.38	6000.0	3.13
QUEBRADA ROSA PEVA	88.31	6083.9	3.17
RIO ILLUCHI	110.66	9862.2	5.14
QUEBRADA CHIRIACU	30.87	2963.7	1.54

QUEBRADA BOTONSILLO	101.99	7950.4	4.14
QUEBRADA PUCA HUAYCU	54.07	5162.5	2.69
RIO TULUGCHI	89.25	9218.7	4.80
RIO ALAQUES	99.08	10718.4	5.58
QUEBRADA EL POZO	63.13	4558.3	2.37
RIO ZAMORA	12.91	771.4	0.40
RIO SAQUILAMA	107.70	11020.2	5.74
QUEBRADA TRAJAGUASHA	10.37	596.8	0.31
RIO CUTUCHI	165.16	20053.2	10.44
QUEBRADA CHIRINCHE	12.19	673.9	0.35
RIO DE ACCHI	161.87	12306.6	6.41
QUEBRADA PALAHUAYCU	72.25	4854.3	2.53
RIO PATOA	108.45	7271.5	3.79
RIO ISINCHE	90.47	6056.7	3.15
RIO NAGSICHE	182.05	14309.3	7.45
QUEBRADA SAN FRANCISCO	77.25	3929.0	2.05
QUEBRADA EL CARNICERO	33.91	1902.5	0.99
QUEBRADA COMPA IA	17.73	1041.3	0.54
QUEBRADA PILACOTO	23.21	2092.3	1.09
DRENAJES MENORES	391.94	25942.7	13.51

**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

Estos valores resultan de la suma de los pixeles de cada subcuenca obtenidos del modelo de precipitación (Fig. 5). La subcuenca del río Cutuchi es la segunda cuenca más grande después de la cuenca del Río Nagsiche. Esto sin tomar en cuenta el área de drenajes menores que es donde drenan sus aguas todas las subcuencas y quebradas. La subcuenca cutuchi capta 10,44% de la precipitación total que supera a la precipitación captada en otras subcuencas y quebradas, además esta subcuenca resulta muy importante ya que se encuentra ubicada al norte de la cuenca donde están las zonas de alta infiltración (Fig. 9).

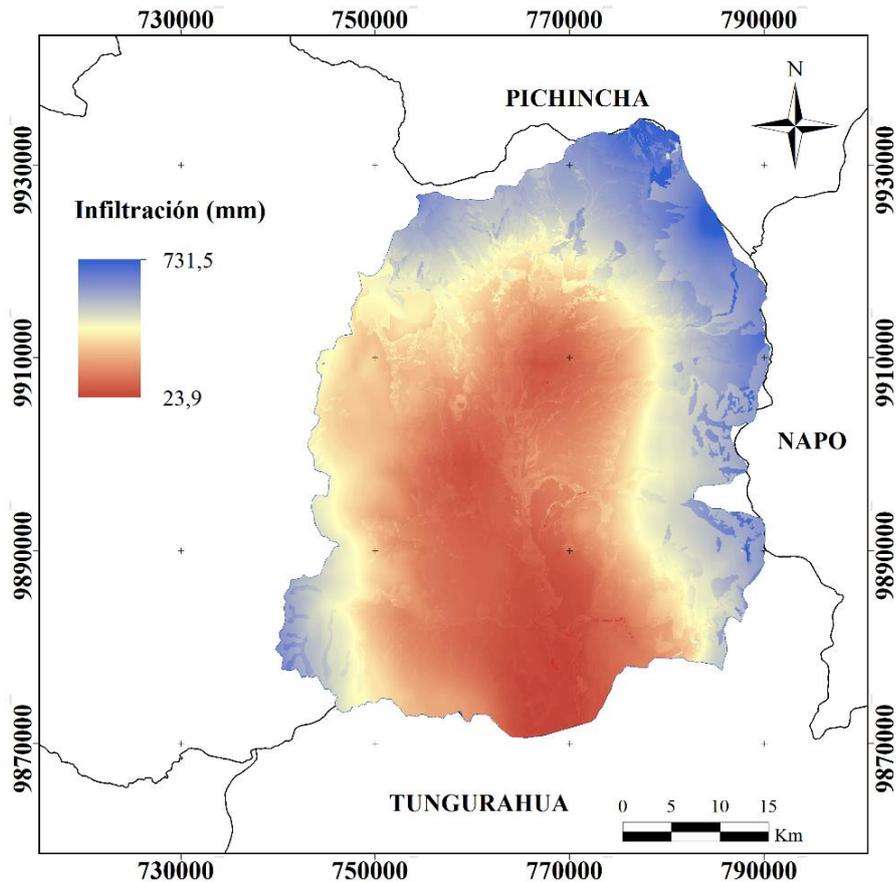
Las otras subcuencas en orden de importancia de captación de agua lluvia e infiltración de agua al subsuelo son: Acchi, Nagsiche, Saquilama y Alaquez. La mayor cantidad de estas subcuencas se encuentran ubicadas al este de la cuenca Cutuchi, en las zonas altas de la Cordillera Oriental. Por el otro lado, Nagsiche recibe la mayor precipitación de las subcuencas ubicadas al oeste de la cuenca Cutuchi en la Cordillera Occidental.

El modelo de temperatura media anual (Fig. 6) muestra valores que van desde  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las máximas temperaturas se presentan en el llano ubicado en el centro de la cuenca. Las temperaturas mínimas se presentan en los extremos de la cuenca donde están las zonas de mayor elevación, la menor temperatura se registra al noroeste de la cuenca donde se ubica el volcán Cotopaxi.

El análisis de evapotranspiración (Fig. 7) revela una mayor pérdida de agua en el área central de la cuenca, que se caracteriza por su topografía más baja y una mayor cobertura vegetal. Este efecto se produce por la disponibilidad de agua que existe en los drenajes menores que se encuentran en la parte central de la cuenca y por la temperatura elevada. La evapotranspiración disminuye gradualmente hacia los extremos donde están las zonas elevadas y frías.

En el modelo de escurrimiento superficial (Fig. 8) se observa que los valores más altos de escurrimiento se ubican en la región sureste de la cuenca, con valores que llegan hasta  $493\text{ mm/año}$ . Por otro lado, en la parte central de la cuenca se observan las zonas con escurrimiento más bajo con valores que llegan hasta  $14\text{ mm/año}$ .

El modelo de infiltración (Fig. 9) muestra que la mayor infiltración se produce al noroeste y sureste de la cuenca, con valores de infiltración de hasta  $731\text{ mm/año}$ . La infiltración se reduce gradualmente hacia el centro y sur de la cuenca, llegando hasta zonas donde la infiltración es de  $24\text{ mm/año}$ .



**Figura 9.** Modelo de Infiltración de la cuenca Cutuchi. UTM (WGS84).  
**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

A partir de los modelos digitales generados, se realizó el cálculo del volumen total de la cuenca para cada uno de los componentes mediante la agregación de los valores de los píxeles en cada modelo. Este enfoque permitió cuantificar el volumen total de agua correspondiente a la precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración en la cuenca del río Cutuchi.

**Tabla 3.** Cuantificación de la distribución del agua lluvia.

	<b>Hm<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
<b>Escurrecimiento Superficial</b>	31355,3	16,3
<b>Evapotranspiración</b>	107056,6	55,8
<b>Infiltración</b>	53581,9	27,9
<b>Precipitación</b>	191993,8	100

**Realizado por:** Puente, Bryan, 2023.

Los resultados obtenidos de cada modelo muestran que, del total de la precipitación, el 55,8 % se evapotranspira, el 16,3 % se genera como escurrimiento superficial y que el 27,9 % corresponde a infiltración en el suelo.

La cuenca del río Cutuchi recibe aproximadamente 191993,8 Hm<sup>3</sup>/año de volumen de agua de lluvia que contribuye a su recarga. Esta recarga se produce principalmente en las zonas montañosas que se ubican al noroeste y sureste de la cuenca. Es allí donde se producen las precipitaciones más altas, con valores que llegan hasta 1424 mm/año. El agua de lluvia penetra en el suelo formado por material metamórfico e ígneo, así como a través de las fisuras y grietas presentes en el terreno. Luego, se mueve lentamente tanto en la superficie como bajo tierra hasta llegar al acuífero Latacunga ubicado en el valle de la cuenca Cutuchi.

#### **4. DISCUSIÓN**

De acuerdo a otros estudios hidrológicos realizados en la cuenca Cutuchi se encontró que, para el caso de la precipitación, en Carrera-Molina et al. (2016) se obtuvo una precipitación media de 823,5 mm/año usando datos de teledetección al igual que en este estudio donde se obtuvo una precipitación media de 927 mm/año. Como se muestra en la figura 5 las precipitaciones más altas se presentan en el este de la cuenca y ocurren en su mayor parte durante los meses de junio a septiembre que son la época lluviosa, esto provoca que el suelo se sature y favorezca a la recarga natural de las aguas subterráneas en zonas donde el suelo posee una alta permeabilidad.

En el caso de la evapotranspiración, en Carrera-Molina et al. (2016) se obtuvo una evapotranspiración de 567,76 mm/año calculado por el método de Thornthwaite, valor muy cercano al obtenido en este estudio de 521,4 mm/año aplicando el método de Turc (1955). La mayor evapotranspiración ocurre en la parte central de la cuenca debido a que ahí se producen las temperaturas más elevadas y por la extensa actividad agrícola que ahí se desarrolla. La alta evapotranspiración y los bajos niveles de precipitación en esta zona dejan una escasa o nula cantidad de agua disponible para que se infiltre en el terreno. Según datos de estaciones meteorológicas en esa zona, únicamente la evaporación supera la precipitación (CISPDR, 2016).

Con respecto a la escorrentía superficial no se encontró datos de referencia para la misma área de estudio. Sin embargo, se logró comparar información con la subcuenca Talatag, la cual se ubica al sureste de la cuenca Cutuchi y según Laraque et al. (2004) presenta valores de escurrimiento superficial de 209 mm/año, muy similar al obtenido en este estudio de 211 mm/año para la misma zona. En CISPDR (2016) se menciona que la escorrentía en el valle interandino de la Cordillera de los Andes varía entre 200 y 800 mm al año. En este estudio se obtuvo un escurrimiento superficial que varía de 14 a 493 mm anuales, estos valores tan bajos pueden ser causados por el factor de escurrimiento que utiliza la Comisión Nacional de Aguas (1991), que es de 1,06% del total de precipitación se escurre, y dependiendo de ese factor es como se definen los valores k para diferentes coberturas y tipo de suelo (Cruz-Falcón et al., 2011). Al subestimar el escurrimiento, el balance resulta en una mayor cantidad de agua disponible para infiltrarse en el suelo.

## **5. CONCLUSIÓN**

La cuenca Cutuchi capta un promedio de 191993,8 Hm<sup>3</sup>/año de agua de lluvia. La mayor precipitación se localiza al sureste y noroeste de la cuenca donde se ubica la Cordillera Oriental, principalmente en las subcuencas de los ríos Talatag, Pisayambo, Quillopaccha, Tulugchi, Alaquez, Saquilama, Cutuchi y Quebrada Cuchihuasi. Además, debido a las bajas temperaturas que provocan bajos niveles de evapotranspiración y la alta permeabilidad del suelo, principalmente al suroeste de la cuenca Cutuchi, permite que se produzca una mayor infiltración del agua lluvia en esta zona.

Del total de precipitación que recibe la cuenca Cutuchi, un 55,8% regresa a la atmósfera por evapotranspiración, 16,3 % se escurre superficialmente y un 27,9 % queda disponible para infiltrarse en el suelo. Los valores calculados de escurrimiento resultaron muy bajos a los valores de escurrimiento reales que se presentan en el valle interandino, influyendo directamente en el valor real de la cantidad de agua que se infiltra en el suelo. El volumen que se infiltra calculado es de 53581,9 Hm<sup>3</sup>/año. Una fracción de este volumen es desplazada hacia el acuífero presente en el valle de la cuenca, ya sea a través de la infiltración en las capas subsuperficiales o mediante el flujo subterráneo. El remanente restante se dispersa de manera subterránea en otras áreas de la cuenca.

Los usos de suelo también modifican la capacidad de infiltración del agua, por lo cual es necesario una representación más actual de la cobertura del suelo en la zona de estudio. Es importante también determinar los coeficientes de escurrimientos para las diferentes coberturas que existen en la zona, ya que a algunas coberturas se les asignó un valor  $k$  tomando como referencia otras coberturas similares que si presentan un valor  $k$  calculado, así como también un factor de escurrimiento que represente las condiciones reales. Por otro lado, la topografía es otro factor importante que se debería tomar en cuenta, la cuenca presenta una topografía muy irregular y esto interviene en el proceso de escurrimiento e infiltración del agua.

El uso de los SIG permite tener una representación espacial de donde se ubican las zonas de mayor o menor infiltración, así como también donde se produce los distintos niveles de escurrimiento superficial. Tener conocimiento de las condiciones de infiltración y escurrimiento de la cuenca permite tener una idea de los factores que influyen en esos procesos, y sabiendo de las zonas de alta permeabilidad se puede gestionar los usos de suelo de manera que permita maximizar la infiltración, al mismo tiempo que reduce el escurrimiento.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Bombón, H. (2018). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO "CUNCHIBAMBA", AMBATO - TUNGURAHUA*.
- Bridget, R., Healy, R., & Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39.
- Carrasco, H. (2018). *Análisis litoestratigráfico y de procedencia de los depósitos sedimentarios cretácicos de la Cuenca Alamor-Lancones*. Escuela Politécnica del Litoral.
- Carrera, David. (2016). *RECURSOS HÍDRICOS Y USO AGRÍCOLA GEOLOCALIZACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN LATACUNGA*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Carrera-Molina, D., Parra, G., Marín, K., & Herrera, R. (2016). *Determinación y cálculo del volumen de agua producido por la sub-cuenca del río Cutuchi del Cantón Latacunga mediante Teledetección*.
- CISPDR. (2016). *PLAN HIDRÁULICO REGIONAL DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA PASTAZA MEMORIA*.
- Cruz-Falcón, A., Vázquez-González, R., Ramírez-Hernández, J., Nava-Sánchez, E., Troyo-Diéguez, E., Rivera-Rosas, J., & Vega-Mayagoitia, J. (2011). Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BSC, México. *Universidad y Ciencia*, 27(3), 251–263. [www.universidadyciencia.ujat.mx](http://www.universidadyciencia.ujat.mx)
- GAD Latacunga. (2014). *DIAGNÓSTICO TERRITORIAL DEL CANTÓN LATACUNGA*.
- Guerrón, A., & Tacuri, L. (2012). *Análisis de la influencia del porcentaje de finos en la capacidad de carga admisible de la cangahua en la ciudad de Quito, Ecuador*.
- Laraque, A., Loup, J., & Pombosa, R. (2004). *Hidroclimatología del Oriente e hidrosedimentología de la Cuenca del Napo*. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.3005>
- Llano, J. (2015). *Evaluación de la explotación del caudal agua subterránea de pozos someros y profundos en el Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi*.
- LOZADA, J. (2019). *ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA DEL NEÓGENO DE LA CUENCA LATACUNGA-AMBATO, SECCIONES EN LOS VALLES DEL RÍO NAGSICHE Y RÍO YANAYACU*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Ortiz, R. S., & Chile A., M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 070–079. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Pacheco, R. (2007). *PROYECTO DE RIEGO POR ASPERSIÓN PARA LA COMUNA DE SAN RAMÓN-PROVINCIA DE COTOPAXI*. Escuela Superior Politécnica del Ejército.
- PDyOT Palora. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Palora, periodo 2015-2025*.
- Peña, H., & Arcos, H. (2004). *Estimación inicial de la recarga vertical para su introducción a modelos de simulación de flujos con la ayuda de sistemas de información geográficos*.
- Shaxzon, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal*. Boletín de Suelos de la FAO.
- Tarco, F., & Veintimilla, K. (2010). *LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA. ANÁLISIS JURÍDICO SOBRE LA PROTECCIÓN DEL RÍO CUTUCHI Y SU SANEAMIENTO EN LA CIUDAD DE LATACUNGA PROVINCIA DE COTOPAXI*.
- Varela, A., & Ron, S. (2018). *Geografía y Clima del Ecuador*. BIOWEB Pontificia Universidad Católica Del Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>
- Yáñez, E., & Vásquez, R. (2015). *Caracterización de los parámetros físicos y químicos de los efluentes de agua al río Cutuchi en el sector Lasso, cantón Latacunga, provincia Cotopaxi, periodo 2015*.

