



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

## **“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA EN CUENCAS ANDINAS: CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO TABACAY”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Ambiental

Autora:

Sofía Carolina Durazno Nieto

CI: 0104838578

Correo electrónico: [sofidurazno@hotmail.com](mailto:sofidurazno@hotmail.com)

Director:

Ing. Rolando Enrique Céleri Alvear Ph. D

CI: 0602794406

**Cuenca - Ecuador**

08-enero-2020



## Resumen

Antes de iniciar procesos de gestión ambiental, es indispensable conocer la aptitud del terreno para diferentes objetivos. Consecuentemente, para identificar las zonas de una cuenca a ser protegidas para resguardar funciones de regulación hidrológica, es necesario iniciar una caracterización de las unidades de respuesta hidrológica, para definir posteriormente un Índice de prioridad de conservación (IPC). Sin embargo, las metodologías existentes sobre priorización de zonas de conservación en una cuenca no son totalmente aplicables en cuencas con pocos datos (ej. cuencas andinas). Así, el objetivo principal es desarrollar una metodología para la identificación de zonas potenciales de conservación hidrológica de las microcuencas del río Tabacay, en función de la evaluación cuantitativa de las características biofísicas como: morfología, pendientes, tipos de suelo, cobertura vegetal e índice topográfico de humedad. Esto permitirá ubicar a cada microcuenca en un rango que defina su estado de conservación. Inicialmente se recopiló información base: topografía, vegetación, suelos. Luego se generó mapas raster de las características biofísicas. Posteriormente, se planteó una matriz de ponderación de los efectos de las características biofísicas sobre la regulación hidrológica, la cual fue rellena con el criterio de expertos. Finalmente, se procesaron los datos y mapas finales mediante herramientas SIG. Los resultados encontrados indican las zonas de Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy baja importancia de conservación. La metodología es fácil de aplicar y cumple con el objetivo de priorizar zonas a ser conservadas de la cuenca, para facilitar la decisión de las instituciones encargadas, y garantizar la inversión de los fondos.

**Palabras clave:** Tabacay. Índice de Prioridad de Conservación (IPC). Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Índice Topográfico de Humedad (ITH). Conservación hidrológica. SIG. Gestión ambiental.



## Abstract

Before starting environmental management processes, it is essential to know the suitability of the terrain for different objectives. Consequently, to identify areas of a basin to be protected to safeguard hydrological regulation functions, it is necessary to initiate a characterization of the hydrological response units, to subsequently define a Conservation Priority Index. However, existing methodologies on prioritizing conservation areas in a basin are not fully applicable in basins with few data. The main objective is to develop a methodology to identify the most important areas of hydrological conservation from their qualitative evaluation of biological and physical characteristics like: topography, nature, slope, soil and Topographic wetness index. It will allow to put every basin in a range and this will show the conservation status. Raster maps of biophysical features were generated. Subsequently, a matrix was raised to weigh the effects of biophysical characteristics on hydrological regulation, and this matrix were filled by experts. Finally, data were processed and the maps were generated by GIS tools. The results indicate the areas of Very High, High, Medium, Low and Very low conservation importance. The methodology is easy to apply and achieve with the priority conservation areas of the basin, this will do easier the decision-making of enterprises and the investment of their money will be guaranteed.

**Keywords:** Tabacay. Priority Conservation Index (PCI). Hydrological Response Units (HRU). Topographic Wetness Index (TWI). Hydrological conservation. GIS. Environmental management.



## Índice de Contenidos

1.	Introducción .....	9
2.	Estado del arte.....	10
3.	Objetivo.....	12
4.	Materiales y Métodos.....	13
4.1	Zona de Estudio.....	13
4.2	Metodología general y Recopilación de información existente.....	14
4.2.1	Metodología general.....	14
4.2.2	Recopilación de datos .....	16
4.3	Obtención del Modelo Digital del Terreno .....	17
4.4	Generación de mapas basados en el MDT .....	17
4.4.1	Mapa de Pendientes.....	17
4.4.2	Índice Topográfico de Humedad .....	18
4.4.3	Delimitación de subcuencas pertenecientes a la parte alta.....	19
4.4.4	Generación de Índice de Compacidad .....	20
4.5	Subcategorización de características biofísicas .....	20
4.5.1	Mapa de Pendientes.....	20
4.5.2	Índice Topográfico de Humedad .....	22
4.5.3	Mapa de Cobertura Vegetal .....	22
4.5.4	Mapa de Tipos de Suelo.....	23
4.5.5	Morfología.....	23
4.6	Asignación de pesos a las características biofísicas .....	24
4.6.1	Encuestas.....	24
4.6.2	Actores .....	25
4.6.3	Tablas.....	25
4.7	Cálculo del Índice de Prioridad de Conservación .....	26
5.	Resultados .....	27
5.1	Formas de Caracterización.....	27
5.1.1	Análisis de Rangos de Actores.....	27
5.1.2	Análisis estadístico de datos .....	29
5.2	Descripción de mapas generados .....	31
6.	Discusión e interpretación de Resultados.....	37
7.	Conclusiones .....	39
8.	Recomendaciones .....	41
9.	Trabajos futuros .....	41
10.	Bibliografía .....	42



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Mapas recopilados para el estudio .....	17
<b>Tabla 2</b> Coeficientes de escorrentía (Benítez et al., 1980).....	21
<b>Tabla 3</b> Rangos de Pendiente del Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Camacho (2011) .....	21
<b>Tabla 4</b> Rangos de Pendiente que se aplicaron para el estudio .....	21
<b>Tabla 5</b> Rangos de ITH.....	22
<b>Tabla 6</b> Clasificación de Tipos de Cobertura Vegetal.....	23
<b>Tabla 7</b> Clasificación de Tipos de Suelo.....	23
<b>Tabla 8</b> Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius según Gaspari et al., (2012).....	24
<b>Tabla 9</b> Formato de encuesta para identificar la importancia hidrológica de cada características biofísicas .....	25
<b>Tabla 10</b> Puntajes asignados a las características biofísicas.....	27
<b>Tabla 11</b> Puntajes asignados a los rangos de pendiente .....	27
<b>Tabla 12</b> Puntajes asignados a los tipos de cobertura vegetal.....	28
<b>Tabla 13</b> Puntajes asignados a los tipos de suelo.....	28
<b>Tabla 14</b> Puntajes asignados a los rangos del ITH .....	29
<b>Tabla 15</b> Puntajes asignados a las características morfológicas .....	29
<b>Tabla 16</b> Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de las características biofísicas. ....	30
<b>Tabla 17</b> Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de rangos de pendientes.....	30
<b>Tabla 18</b> Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de tipos de cobertura vegetal. ....	30
<b>Tabla 19</b> Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de tipos de suelo.....	31
<b>Tabla 20</b> Valores de ITH.....	31
<b>Tabla 21</b> Valores de características morfológicas .....	31
<b>Tabla 22</b> Valores del Índice de Prioridad de Conservación (IPC) y su descripción .....	32



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Microcuenca del río Tabacay y zona de estudio .....	13
<b>Figura 2</b> Diagrama de actividades de objetivo 1 .....	14
<b>Figura 3</b> Diagrama de actividades objetivo 2 .....	15
<b>Figura 4</b> Mapa de valores máximos el IPC .....	33
<b>Figura 5</b> Mapa de valores mínimos del IPC .....	34
<b>Figura 6</b> Mapa de valores promedio del IPC .....	35
<b>Figura 7</b> Mapa de valores de percepción personal del IPC.....	36




### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Sofía Carolina Durazno Nieto, autor/a del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA EN CUENCAS ANDINAS: CASO DE ESTUDIO DEL RIO TABACAY", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 8 de enero de 2020



---

Sofía Carolina Durazno Nieto

C.I: 010483857-8



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

**Sofía Carolina Durazno Nieto** en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA EN CUENCAS ANDINAS: CASO DE ESTUDIO DEL RIO TABACAY", 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 de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca 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.

Cuenca, 8 de enero de 2020

**Sofía Carolina Durazno Nieto**

C.I: 010483857-8





## Agradecimiento

Primero agradezco a Dios por la vida, a mis padres por ser mi apoyo incondicional, y a mi pequeña Sofia por su comprensión y amor en todo momento.



## 1. Introducción

Los ecosistemas proporcionan varios servicios como alimentos, madera y también servicios como la regulación de procesos hidrológicos, lo que contribuye a nuestra supervivencia y bienestar. (Englund, Berndes, & Cederberg, 2017).

La vegetación tiene gran influencia sobre la regulación de los ecosistemas; la pérdida de cobertura vegetal ocasiona una variación de cambios en el régimen de escorrentía dependiendo de la vegetación existente (bosque de coníferas, bosque de hoja perenne, páramo, etc.) (Zhang et al., 2017)

El impacto provocado por la expansión de la frontera agrícola y la acción humana, se intensifica por la canalización de cauces; reduciendo y alterando en calidad y cantidad bienes y servicios ecosistémicos, considerados imprescindibles para el desarrollo de la población, los efectos son: destrucción de ecosistemas naturales, pérdida de biodiversidad, cambios en el balance de nitrógeno, contaminación por agroquímicos y cambio de estructuras tróficas. (Feijo, 2015)

Para mejorar las condiciones ambientales de las cuencas se han implementado programas de manejo de cuencas, los cuales usan fondos públicos y privados para desarrollar proyectos de conservación. Estos proyectos buscan prevenir, conservar, restaurar, y mitigar las acciones o factores que pudieran comprometer a futuro la calidad y cantidad de los servicios ambientales. Sin embargo, no es fácil identificar los sitios donde se debería desarrollar estos proyectos que determinen las zonas de alta importancia hidrológica y así, asegurar la disponibilidad de agua dentro de las cuencas.

Por estos motivos, el trabajo de las entidades que se encargan de la conservación se ve seriamente limitado y comprometido, por lo que no es posible que sus inversiones monetarias en conservación tengan el éxito deseado. Y como resultado: la cuenca sigue degradándose y se pierden los recursos económicos por inversiones mal focalizadas.



## 2. Estado del arte

Al revisar la literatura se encontraron los siguientes estudios relacionados con el tema:

- ✓ **Estimación de parámetros morfométricos y unidades de respuesta hidrológica en la cuenca del río Raquira, Colombia:** Para obtener las unidades de respuesta hidrológica, se utiliza herramientas de SIG y consideran: tipo de suelo, cobertura vegetal y pendiente con el propósito de localizar zonas con mayor potencial de producción de sedimentos mediante el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). (Hernández Guerra, 2015). Otro estudio similar es el de **Disponibilidad hídrica y demanda de agua de la cuenca Piraí, Bolivia:** Como requisito para la estimación de caudales mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT, se obtiene las URH (Unidades de respuesta hidrológica) a partir de la intersección de los tipos de suelo existente, mapa de uso – cobertura de suelo y un mapa de pendientes. (Quintanilla, Spickenbom, Calderón, & Larrea, 2011)
- ✓ Los métodos aplicados en los dos casos mencionados utilizan como parte de su estudio la caracterización de unidades de respuesta hidrológica mediante la aplicación de un modelo hidrológico que requiere datos de caudales y precipitación de varios años que no se encuentran disponibles en la cuenca de estudio. Por este motivo esta metodología no sería aplicable en la mayoría de las cuencas andinas.
- ✓ **Proceso de priorización de áreas críticas para la producción de agua en la subcuenca del río Copán, Honduras:** Para obtener la zonas de priorización se considera las condiciones de uso actual del suelo, la percepción acerca del estado de conservación de la cuenca y posteriormente se delimita áreas abastecedoras de agua, prácticas de manejo de la cobertura del suelo y se busca garantizar las zonas de cobertura con mayor impacto para la cantidad de agua según su demanda como: bosque – páramo y pastizales – zonas degradadas. (Benegas & León, 2009)

El desarrollo de la metodología para establecer zonas de prioridad de conservación es tan solo el principio de un proceso que permitirá tomar acciones a futuro, en función de los datos existentes; para aplicar el proceso de priorización al



igual que en el río Copán, se necesitaría incluir especificaciones de las características empleadas mediante la verificación in situ y participación de la comunidad.

- ✓ **Criterios para la priorización de cuencas hidrográficas objeto de Ordenación y Manejo, Colombia:** La metodología para priorizar cuencas hidrográficas se orienta a la inclusión de múltiples componentes como: oferta hídrica, demanda hídrica, calidad hídrica, riesgo y fortalecimiento institucional y gobernabilidad. Cada componente se compone de varios factores y éstos a su vez de distintos parámetros, cada componente y parámetro tiene una ponderación, la totalidad de los componentes y parámetros consiste en el 100% según la importancia con la que se considere la cuenca evaluada. El propósito es la priorización de la cuenca completa, mas no la zonificación de una microcuenca según características biofísicas. (Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, 2014).
- ✓ **Evaluación de modelos de elevación digital para la delimitación de unidades de respuesta hidrológica en una cuenca del Himalaya:** Para estimar la producción de sedimentos y escorrentía superficial de la cuenca de Sitla Rao, India; se definen las unidades de respuesta hidrológica a partir de la cobertura vegetal, uso de suelo, profundidad del suelo y la pendiente obtenida de imágenes satelitales de distinta procedencia. (Saran, Sterk, Peters, & Dadhwal, 2010)

En general se puede apreciar que las metodologías citadas no emplean todas las características biofísicas consideradas en este estudio. La información utilizada proviene del procesamiento de imágenes satelitales y, se considera aplicable a nuestro estudio siempre y cuando exista el conocimiento adecuado para su selección y procesamiento, también debe corroborarse los datos mediante verificación in situ previo a la aplicación de la metodología.

Los criterios para priorización aplicados en Colombia, se asemejan mucho a la metodología que se propone en este estudio (asignación de pesos), pero no se considera aplicable al objetivo.

El estudio propuesto en esta tesis varía en comparación al resto de estudios mencionados principalmente por: el propósito del estudio, la disponibilidad de la información utilizada, las características biofísicas consideradas, la asignación de



pesos a cada característica e ítem de su clasificación, la obtención de pesos asignados es mediante entrevistas a expertos; esto se justifica debido a que permitirá cumplir los objetivos de las instituciones que administran las cuencas hidrográficas y por otro lado se podrá focalizar la inversión en zonas donde se tendrá alto impacto ambiental.

Por lo tanto, se considera necesario desarrollar métodos propios, flexibles, que puedan ser utilizados en cuencas con pocos datos, de acuerdo a su disponibilidad, lo cual es la situación existente en las cuencas andinas. De esta manera la gestión ambiental obtendrá los resultados esperados en función del objetivo propuesto; al aplicar una metodología que ofrece resultados basados en características biofísicas de la cuenca y en el criterio de análisis de expertos.

### **3. Objetivo**

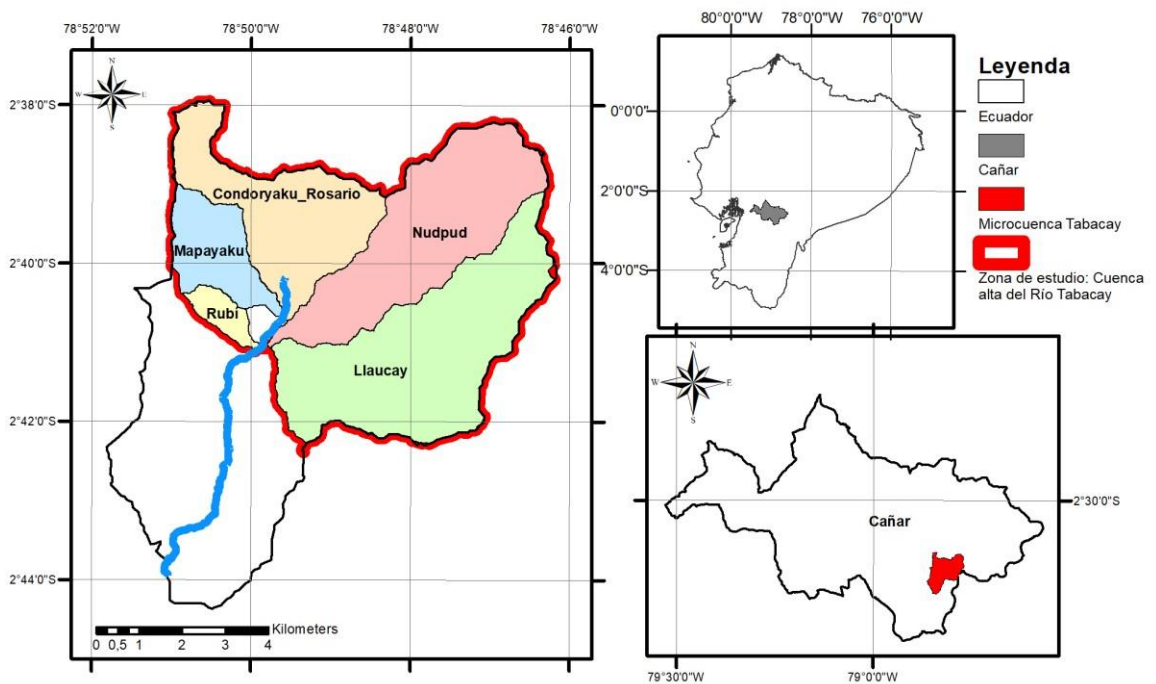
El propósito de este estudio es desarrollar una metodología para la caracterización de unidades de respuesta hidrológica de cuencas hidrográficas a partir de la evaluación cuantitativa de las características biofísicas que determinan la calidad de sus servicios hidrológicos. Para lograr este objetivo inicialmente se caracterizará biofísicamente la cuenca y posteriormente se desarrollará la metodología a partir de la información obtenida.

## 4. Materiales y Métodos

### 4.1 Zona de Estudio

El área de estudio corresponde a la parte alta de la microcuenca del Río Tabacay, perteneciente a la subcuenca del río Burgay, cuenca del río Paute. La cuenca del Tabacay completa tiene un área de 68.33 km<sup>2</sup> por lo que se considera una cuenca pequeña. Sin embargo el estudio se ha realizado en sus principales quebradas que son: Rubí, Mapayacu, Condoryaku – Rosario, Nudpud y Llaucay que tienen un área de 46.77 km<sup>2</sup> (PROMAS, 2003).

La microcuenca del río Tabacay tiene una temperatura media anual de 9,65 °C, su altitud va desde los 2520 msnm hasta los 3720 msnm. La precipitación promedio anual es de 939,89 mm/año. (Jaramillo Neira, 2018).



**Figura 1** Microcuenca del río Tabacay y zona de estudio

## 4.2 Metodología general y Recopilación de información existente

### 4.2.1 Metodología general

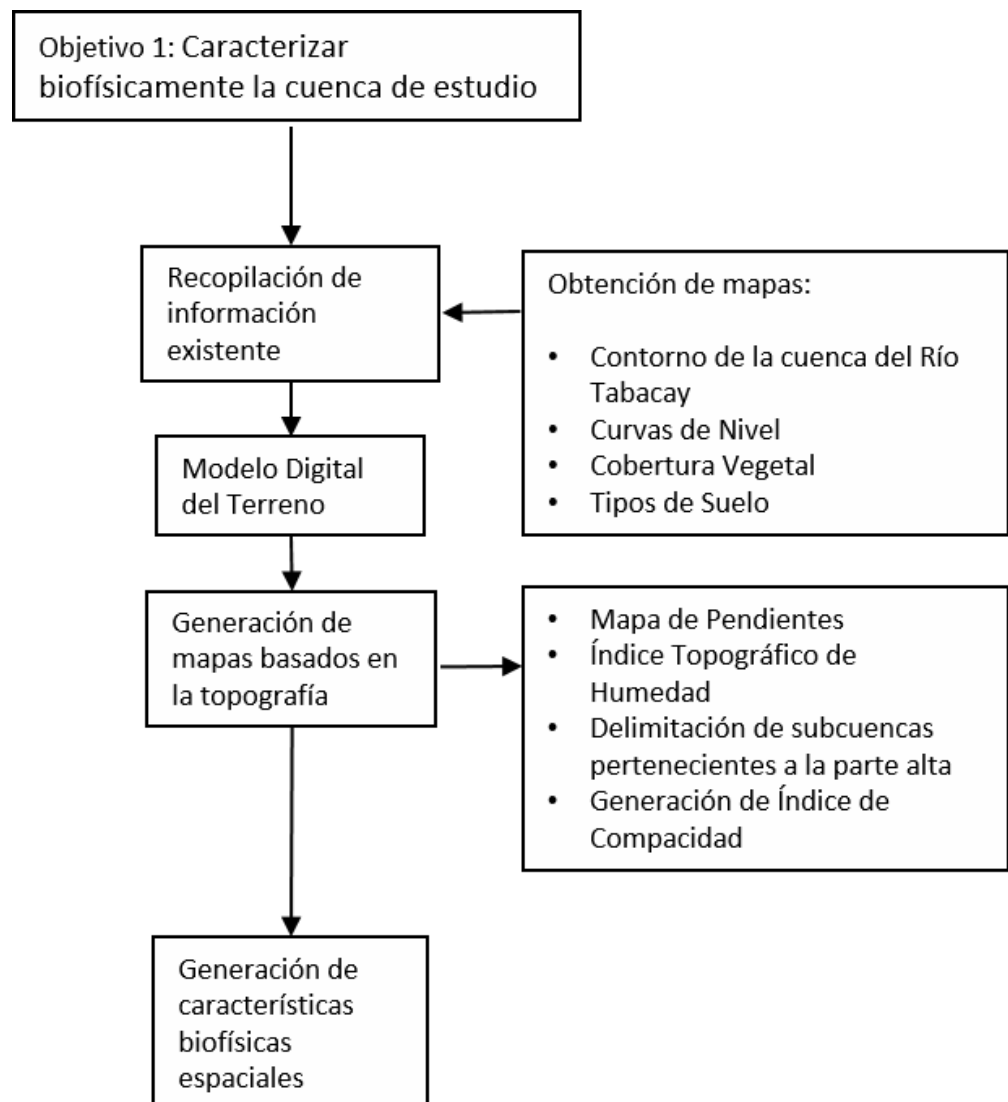
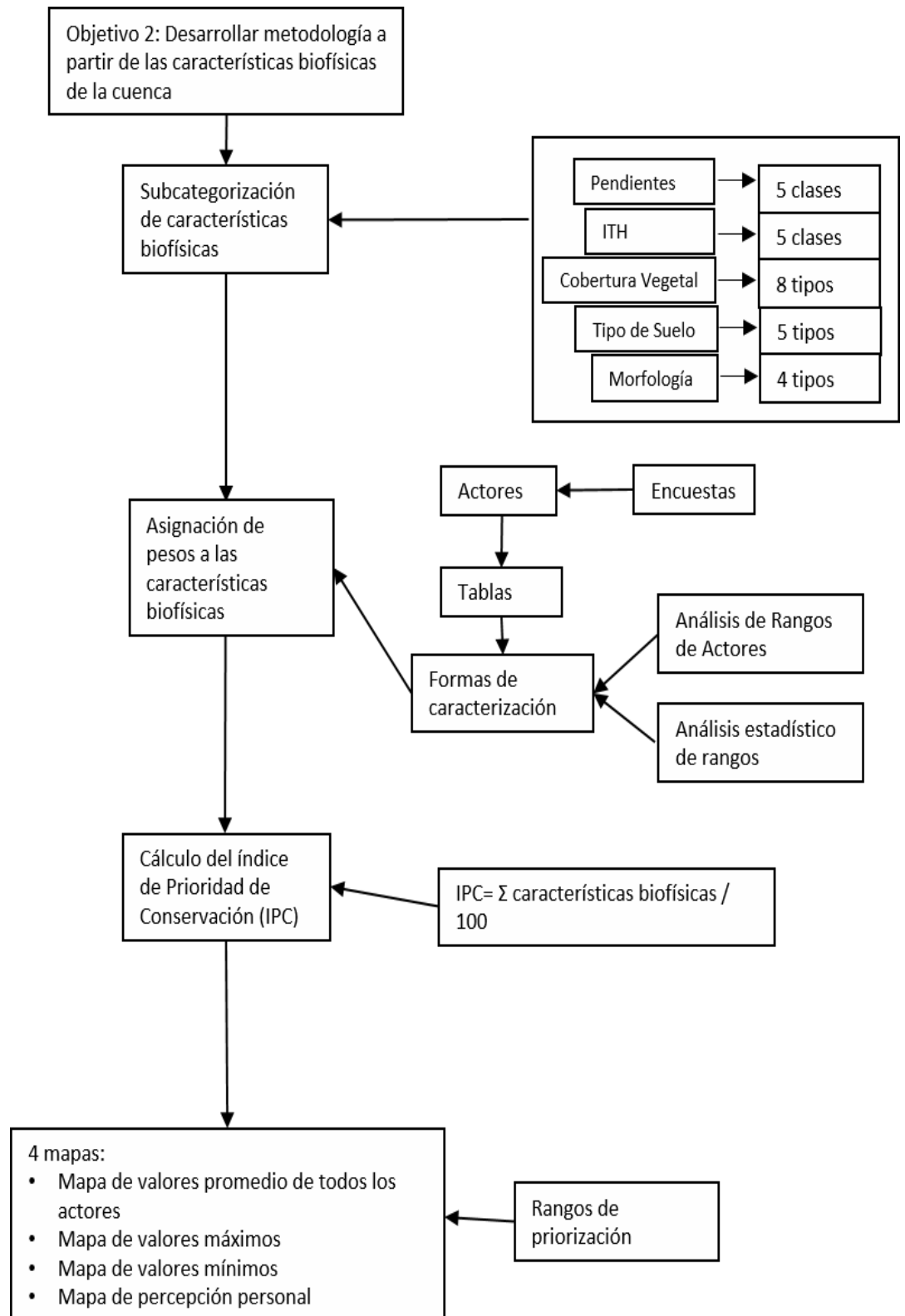


Figura 2 Diagrama de actividades por objetivo (1)



**Figura 3** Diagrama de actividades por objetivo (2)





#### 4.2.1.1 Descripción de actividades desarrolladas

- Recopilación información existente
- Selección de características biofísicas acorde a disponibilidad de datos y su importancia hidrológica
- Procesamiento de mapas y clasificación acorde al objetivo del estudio
- Elaboración de tablas con características biofísicas para asignar pesos
- Selección de expertos que fueron parte del estudio
- Aplicación de encuestas a expertos
- Análisis de pesos asignados por los expertos
- Procesamiento estadístico de los pesos asignados por los expertos
- Procesamiento de mapas con los datos procedentes del análisis estadístico
- Generación de mapas resultantes mediante algebra de mapas
- Interpretación de resultados y asignación de intervalos con sus características cualitativas

#### 4.2.2 Recopilación de datos

Los mapas que se han empleado para la elaboración de éste trabajo son: contorno de la microcuenca a una escala de 1:50.000, el cual se empleará para las características morfológicas de la cuenca, la cobertura vegetal existente en la microcuenca, curvas de nivel y tipos de suelo. Con la información recopilada se procedió a elaboración de los mapas necesarios para la caracterización biofísica de la microcuenca.

Los mapas mencionados se han obtenido de diferentes fuentes, las cuales se especifican en la Tabla 1.

**Tabla 1** Mapas recopilados para el estudio

Mapa	Formato	Escala	Procedencia
Contorno de la Microcuenca del río Tabacay	Shapefile feature class	1:50.000	FONAPA
Cobertura Vegetal	Shapefile feature class	1:50.000	FONAPA
Curvas de Nivel	Shapefile feature class	1:50.000	FONAPA
Tipo de suelo	Shapefile feature class	1:50.000	EMAPAL

### 4.3 Obtención del Modelo Digital del Terreno

Mediante herramientas de software de Sistemas de información geográfica, se procedió al procesamiento del Modelo Digital del terreno (MDT). Es la representación gráfica de un modelo tridimensional basado en la generación de una red irregular de triángulos a partir de un conjunto de puntos. Para su obtención se utilizó los mapas previamente recopilados de curvas de nivel y el contorno de la microcuenca del río Tabacay; para facilitar el manejo de los mapas por su tiempo de procesamiento, se convirtió el MDT a formato raster.

### 4.4 Generación de mapas basados en el MDT

#### 4.4.1 Mapa de Pendientes

Un mapa de pendientes indica la tasa máxima de cambio del valor de elevación de una celda en relación a las celdas presentes a su alrededor. Mediante herramientas SIG (Sistemas de información Geográfica) y el MDT; para cada celda perteneciente a la zona de estudio, se generó un mapa de pendientes de elevación en porcentajes y otro según su grado de inclinación, para posteriores análisis.



#### 4.4.2 Índice Topográfico de Humedad

El índice topográfico de humedad (ITH) indica las zonas potenciales de concentración de humedad o acumulación de agua presentes en la microcuenca. Para su elaboración se utilizó el MDT y el mapa de pendientes según su grado de inclinación, que fue transformado a radianes para la generación de este mapa.

Inicialmente, se procesó el MDT mediante el relleno de sumideros o espacios en blanco que pudieran generar errores en mapas posteriores. A partir del MDT corregido, se obtuvo un mapa de direcciones de flujo que indica la dirección que seguirá el flujo en función de la pendiente de cada celda evaluada.

A partir del mapa de direcciones de flujo se generó el mapa de zonas de acumulación de agua; éste consta en un conteo de celdas con la misma dirección, que fluyen hacia una celda particular. Los valores del mapa de pendientes convertido a radianes, sirvió para obtener el mapa de tangentes que consiste en el cálculo de la tangente de cada celda de la zona de estudio.

El mapa de zonas de acumulación de agua, es la base para determinar las superficies de contribución aguas arriba (SCAA). Para esto fue necesario especificar el tamaño de la celda.

El índice topográfico de humedad se obtuvo a partir del logaritmo de las SCAA por el mapa de tangentes y se asignó cinco clases en función de la distribución de sus datos.



#### 4.4.3 Delimitación de subcuencas pertenecientes a la parte alta

A partir del MDT previamente corregido, el mapa de dirección de flujo y el mapa de zonas de acumulación de agua, se obtuvo:

- ✓ Mapa de clasificación de arroyos. Se muestran los puntos que recibirán flujo de diferentes lugares.
- ✓ Mapa de vínculo de arroyos. A partir del mapa de clasificación de arroyos, distingue cada tramo del cauce donde se genere la unión de los mismos.
- ✓ Mapa de ríos y quebradas. A partir del mapa de vínculo de arroyos, se generó una capa vectorial de los cauces existentes en la microcuenca.
- ✓ Mapa de agrupación de áreas de recolección de aguas. A partir del mapa de vínculo de arroyos, se agrupan los puntos que vierten el flujo a cada uno de los segmentos previamente establecidos.
- ✓ Mapa de delimitación de áreas de recolección de aguas. A partir del mapa de agrupación de áreas de recolección de aguas, se generó una capa vectorial a partir de las zonas previamente establecidas.
- ✓ Mapa de puntos de desembocadura de cada subcuenca. Se definió sobre el mapa de quebradas los puntos de desembocadura de cada subcuenca.

Después de haber establecido los puntos de desembocadura de cada subcuenca, se obtuvo cinco subcuencas pertenecientes a la parte alta de la cuenca, y se generó una capa vectorial de la delimitación de cada subcuenca.



#### 4.4.4 Generación de Índice de Compacidad

A partir del contorno de cada subcuenca previamente establecida, fue necesario añadir una columna extra en la tabla de atributos. El propósito era el cálculo del índice de Gravelius (Gravelius, 1941), el cual indica la forma de la superficie de la cuenca, según su delimitación y, en función de su morfología definida por su perímetro y área.

$$k_c = 0,282 * \left[ \frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Donde:

Kc = Índice de compacidad

P = Perímetro

A = Área

#### 4.5 Subcategorización de características biofísicas

Cada característica biofísica previamente descrita, se divide en varias clases según los datos existentes, sus propias clasificaciones como es el caso de la cobertura vegetal y bibliografía relacionada para el estudio. De esta manera se describen a continuación las 5 características biofísicas y sus clasificaciones.

##### 4.5.1 Mapa de Pendientes

Se divide en cinco categorías acorde a los valores definidos por Benítez et al., (1980) en la tabla de coeficientes de escorrentía, en los cuales se relaciona el coeficiente de escorrentía en función de la cobertura vegetal, la pendiente en porcentaje y el tipo de suelo existente; y por Camacho (2011) en el manual de buenas prácticas para el manejo de cuencas hidrográficas.

**Tabla 2** Coeficientes de escorrentía (Benítez et al., 1980)

Rangos de Pendiente acorde a Tabla de Coeficientes de escorrentía (Valores para zonas rurales) (%)	Característica cualitativa de los rangos
<1	Despreciable
>1	Suave
>5	Media
>20	Alta
>50	Pronunciada

**Tabla 3** Rangos de Pendiente del Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Camacho (2011)

Rangos de pendiente acorde a técnicas de conservación de suelos (%)
>2
>5
>10
>20
>30
>40

En función de las tablas de los autores antes mencionados, se ha reclasificado los rangos y su característica cualitativa para su uso en el estudio.

**Tabla 4** Rangos de Pendiente que se aplicaron para el estudio

Clasificación de los Rangos de Pendiente	Rangos de Pendiente asignados (%)	Característica cualitativa de rangos
1	0 – 5	Suave
2	5 – 10	Media
3	10 – 20	Media Alta
4	20 – 40	Alta
5	>40	Pronunciada



#### 4.5.2 Índice Topográfico de Humedad

Según Roa-Lobo & Kamp (2012), mientras más elevado sea el valor del índice, mayor humedad presenta la celda en función de su configuración topográfica. Por lo tanto, la clasificación asignada (5 clases) de la magnitud de la concentración de escurrimiento dependió de los valores obtenidos mediante la generación del mapa y la distribución de sus datos. Dentro del análisis de la microcuenca se obtuvieron valores que van desde 2,77 a 25,99; por lo tanto, se ha dividido en 5 rangos de igual magnitud, los cuales se especifican en la Tabla 5.

**Tabla 5** Rangos de ITH

Clasificación del Índice Topográfico de Humedad	Rangos establecidos del Índice Topográfico de Humedad
1	2,77 – 6,50
2	6,50 – 9,59
3	9,59 – 12,97
4	12,97 – 16,65
5	16,65 – 25,99

#### 4.5.3 Mapa de Cobertura Vegetal

La clasificación de la cobertura vegetal (8 clases) se encuentra en función de las categorías existentes en la zona de estudio, las cuales se exponen en la Tabla 6.

**Tabla 6** Clasificación de Tipos de Cobertura Vegetal

Clasificación de la Cobertura Vegetal	Coberturas existentes
1	Bosque Nativo
2	Plantación Forestal
3	Pastizal
4	Páramo
5	Natural (Lagunas)
6	Mosaico Agropecuario
7	Cultivo Anual

#### 4.5.4 Mapa de Tipos de Suelo

La clasificación de los tipos de suelo (5 clases) se encuentra en función de las categorías existentes en la zona de estudio. Y se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7** Clasificación de Tipos de Suelo

Clasificación de los Tipos de Suelo	Tipos de Suelo
1	Dystric Cambisol
2	Humic Regosol
3	Humic Umbrisol
4	Eutric Cambisol
5	Umbric Andosol

#### 4.5.5 Morfología

La clasificación de las características morfológicas se dio acorde a los valores previamente calculados del índice de compacidad de cada subcuenca perteneciente a la zona de estudio, y, se dividió en cuatro clases según Gaspari et al., (2012).





**Tabla 8** Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius según Gaspari et al., (2012)

Kc	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval oblonga
1,5 a 1,75	Oval oblonga a rectangular oblonga
>1,75	Rectangular

La tabla de atributos se adicionó una columna para agregar la característica cualitativa correspondiente al rango que pertenece el índice de compacidad calculado, mediante sentencias condicionales.

#### 4.6 Asignación de pesos a las características biofísicas

Posterior a la generación y clasificación de las características biofísicas, se procedió a la asignación de pesos a cada característica según el criterio dado por varios especialistas en áreas como hidrología, hidráulica, agronomía, etc., desde ahora llamados actores, mediante encuestas elaboradas.

##### 4.6.1 Encuestas

Se elaboró un formato de encuesta en el que consta las características biofísicas y su clasificación con el propósito de que cada actor asigne un puntaje máximo a cada característica y que la sumatoria de los puntajes sea igual a 10, para la clasificación de cada característica biofísica se debía asignar un puntaje de 0 a 1 acorde a la importancia considerada por cada actor. El puntaje máximo de la sumatoria de las características es 10 en el caso de que cada característica se multiplicara por el ítem de máximo puntaje de su clasificación y se considera el más importante, porque las zonas de muy alta importancia para conservación responden a los puntajes máximos, entre 8 y 10, y las zonas con puntajes menores a 8 se consideran menos importantes. Los actores según su experticia, dieron los puntajes pertinentes únicamente en las áreas dentro de su conocimiento con el propósito de evitar datos erróneos en el estudio.



**Tabla 9** Formato de encuesta para identificar la importancia hidrológica de cada característica biofísica

No.	Característica Biofísica (CB)	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
1	Pendiente					
2	Cobertura Vegetal					
3	Tipo de Suelo					
4	ITH					
5	Morfología					

#### 4.6.2 Actores

Los expertos que respondieron a las encuestas cumplen con el perfil detallado a continuación:

- Ingeniero Ambiental con maestría en Hidrología (A1)
- Ingeniero Agrónomo con maestría en Hidrología (A2)
- Ingeniero Civil con maestría en Hidrología (A3)
- Ingeniero Civil con doctorado en Hidráulica (A4)

#### 4.6.3 Tablas

Posterior al llenado de encuestas con el criterio de cada experto, se generó unas tablas con el puntaje asignado a cada característica biofísica y su clasificación.

#### 4.7 Cálculo del Índice de Prioridad de Conservación

Se recopiló los datos obtenidos mediante el análisis estadístico de rangos, para la generación de mapas. La asignación de valores en la clasificación de cada característica se dio por sentencias condicionales y álgebra de mapas, en el caso del mapa de pendientes y del ITH; para los mapas de: tipos de suelo, tipos de cobertura vegetal y morfología de cada subcuenca, se añadió una columna a la tabla de atributos y se ejecutó sentencias condicionales para los fines propuestos.

Se consideró principalmente el peso de las características biofísicas y de manera secundaria el peso de cada ítem perteneciente a su clasificación; para su cálculo se empleó la siguiente expresión:

$$IPC = \sum_{1}^{n} CB_n * C_{CB_n}$$

Donde:

IPC = Índice de Prioridad de Conservación

CB = Característica biofísica (pendiente, tipo de cobertura vegetal, tipo de suelo, ITH y morfología)

n = número de característica biofísica (1 - 5) o número de ítem de la clasificación de cada característica (depende de cada clasificación)

(CB<sub>n</sub>)<sub>n</sub> = n ítem de la clasificación de cada característica biofísica

El índice de prioridad de conservación es la sumatoria del puntaje asignado a las características biofísicas, multiplicado por el puntaje asignado a la clasificación de cada característica según corresponda a los valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal para cada celda de la zona de estudio.



## 5. Resultados

### 5.1 Formas de Caracterización

#### 5.1.1 Análisis de Rangos de Actores

El peso asignado refleja la importancia de cada característica acorde al criterio de cada actor, para el análisis de los datos se consideró los datos obtenidos y los objetivos de éste trabajo; por lo tanto, en el análisis se prescindió de algunos criterios en distintas áreas. Los puntajes asignados por los actores se presentan desde la tabla 10 hasta la 15.

**Tabla 10** Puntajes asignados a las características biofísicas

No.	Característica Biofísica	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
1	Pendiente	3	2	1	2,5	3
2	Cobertura Vegetal	2	3	2	1	1,5
3	Tipo de Suelo	2	3	3	3,5	1
4	ITH	2	1,5	2,5	1,5	4
5	Morfología	1	0,5	1,5	1,5	0,5

**Tabla 11** Puntajes asignados a los rangos de pendiente

Rangos de Pendiente (%)	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
0 – 5	1	1	1	0,2	1
5 – 10	0,9	0,9	0,9	0,2	0,6
10 – 20	0,8	0,9	0,8	0,2	0,5
20 – 40	0,5	0,7	0,5	0,2	0,4
Mayor a 40	0,1	0,4	0,1	0,1	0,3

**Tabla 12** Puntajes asignados a los tipos de cobertura vegetal

Cobertura Vegetal	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
Natural (Lagunas)	1	1	1	1	1
Páramo	1	1	1	1	1
Bosque Nativo	1	1	1	0,5	1
Plantación Forestal	0,8	0,7	0,5	0,5	0,7
Mosaico Agropecuario	0,6	0,5	0,3	0,13	0,4
Pastizal	0,4	0,3	0,3	0,25	0,3
Cultivo Anual	0,4	0,3	0,3	0,13	0,2

**Tabla 13** Puntajes asignados a los tipos de suelo

Tipos de Suelo	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
Umbric Andosol	1	1	1	0,2	1
Dystric Cambisol	0,8	0,9	0,9	0,2	0,6
Humic Umbrisol	0,8	0,9	0,8	0,2	0,5
Eutric Cambisol	0,8	0,7	0,5	0,2	0,4
Humic Regosol	0,5	0,4	0,1	0,1	0,3

Los resultados para ITH son el puntaje propio asignado debido a que la información fue generada después de las encuestas por sugerencia de uno de los actores.

**Tabla 14** Puntajes asignados a los rangos del ITH

ITH	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
2,77 – 6,50	0,1				
6,50 – 9,59	0,2				
9,59 – 12,97	0,6				
12,97 – 16,65	0,8				
16,65 – 25,99	1				

**Tabla 15** Puntajes asignados a las características morfológicas

Morfología	Puntaje propio	Puntaje A1	Puntaje A2	Puntaje A3	Puntaje A4
Casi redonda a oval redonda	0.2	1		0.2	
Oval redonda a oval oblonga	0.5	0.7		0.3	
Oval oblonga a rectangular oblonga	1	0.3		0.5	
Rectangular	1	0.3		0.5	

### 5.1.2 Análisis estadístico de datos

Acorde a los objetivos, se consideró los valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal para el procesamiento de los datos y posteriormente, para la generación de mapas. Los cuales se encuentran en las tablas de la 16 a la 21.



**Tabla 16** Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de las características biofísicas.

No.	Característica Biofísica	Puntaje propio	Puntaje Mínimo	Puntaje Máximo	Puntaje Promedio
1	Pendiente	3	1	3	2,3
2	Cobertura Vegetal	2	1	3	1,9
3	Tipo de Suelo	2	1	3,5	2,5
4	ITH	2	1,5	4	2,25
5	Morfología	1	0,5	1,5	1,13

**Tabla 17** Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de rangos de pendientes.

Rangos de Pendiente (%)	Puntaje propio	Puntaje Mínimo	Puntaje Máximo	Puntaje Promedio
0 – 5	1	1	1	1,00
5 – 10	0,9	0,9	0,9	0,80
10 – 20	0,8	0,5	0,9	0,73
20 – 40	0,5	0,4	0,7	0,53
Mayor a 40	0,1	0,1	0,4	0,27

**Tabla 18** Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de tipos de cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal	Puntaje propio	Puntaje Mínimo	Puntaje Máximo	Puntaje Promedio
Natural (Lagunas)	1	1	1	1
Páramo	1	1	1	1
Bosque Nativo	1	1	1	1
Plantación Forestal	0,8	0,5	0,8	0,68
Mosaico Agropecuario	0,6	0,3	0,6	0,45
Pastizal	0,4	0,3	0,4	0,33
Cultivo Anual	0,4	0,2	0,4	0,3

**Tabla 19** Valores máximos, mínimos, promedio y de percepción personal de tipos de suelo.

Tipos de Suelo	Puntaje propio	Puntaje Mínimo	Puntaje Máximo	Puntaje Promedio
Umbric Andosol	1	0,9	1	0,95
Dystric Cambisol	0,8	0,6	0,8	0,7
Humic Umbrisol	0,8	0,7	0,8	0,75
Eutric Cambisol	0,8	0,6	0,8	0,7
Humic Regosol	0,5	0,3	0,5	0,4

**Tabla 20** Valores de ITH

ITH	Puntaje propio
2,77 – 6,50	0,1
6,50 – 9,59	0,2
9,59 – 12,97	0,6
12,97 – 16,65	0,8
16,65 – 25,99	1

**Tabla 21** Valores de características morfológicas

Morfología	Puntaje propio
Casi redonda a oval redonda	0.2
Oval redonda a oval oblonga	0.5
Oval oblonga a rectangular oblonga	1
Rectangular	1

## 5.2 Descripción de mapas generados

Se obtuvieron cuatro mapas del IPC según las características biofísicas seleccionadas: pendientes, tipo de cobertura vegetal, tipo de suelo, ITH y morfología; y la clasificación de cada característica.



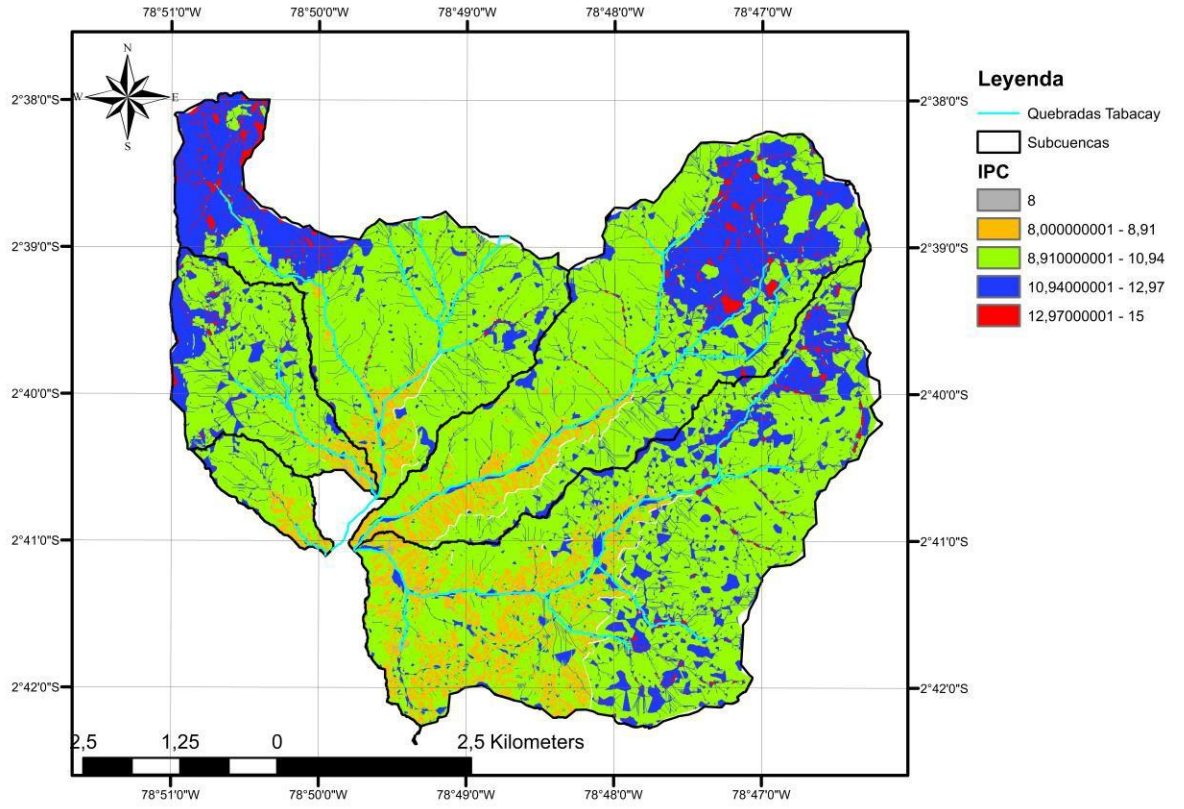
La sumatoria de valores pertenecientes a las características biofísicas, varía en cada mapa; se elaboró una tabla con el cálculo de los valores máximos, mínimos, promedio o de percepción personal, presentes en la Tabla 16; y por último, se generó intervalos fijos (5 clases) para cada caso, y se presenta en la Tabla 22.

Los mapas obtenidos corresponden a los valores mínimos, máximos, promedio y de percepción personal del IPC y pueden apreciarse desde la Figura 4 a la Figura 7.

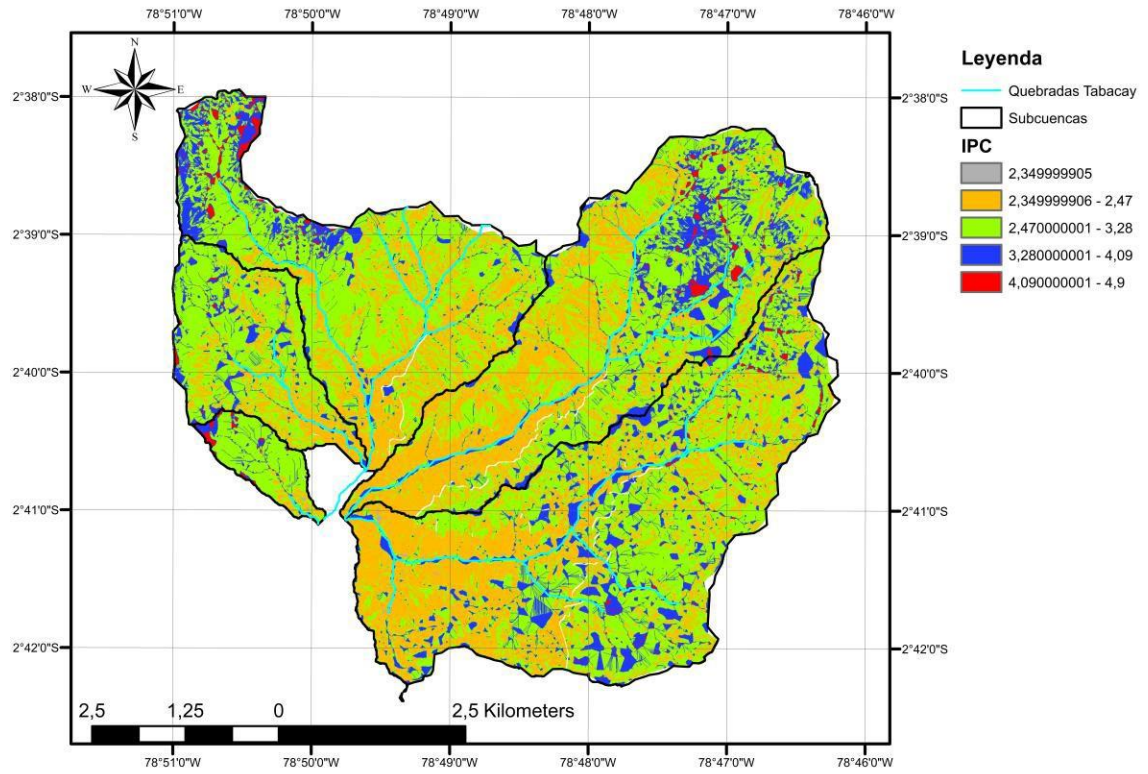
**Tabla 22** Valores del Índice de Prioridad de Conservación (IPC) y su descripción

No.	Intervalos				Prioridad de Conservación
	IPC Mínimo	IPC Máximo	IPC Promedio	IPC Propio	
1	1,05 – 1,8	4,85 – 6,88	2,5 – 4,08	1,5 – 4	Muy baja importancia
2	1,8 – 2,55	6,88 – 8,91	4,08 – 5,53	4 – 5,5	Baja importancia
3	2,55 – 3,3	8,91 – 10,94	5,53 – 6,98	5,5 – 7	Media importancia
4	3,3 – 4,05	10,94 – 12,97	6,98 – 8,43	7 – 8,5	Alta importancia
5	4,05 – 4,9	12,97 – 15	8,43 – 10	8,5 – 10	Muy alta importancia

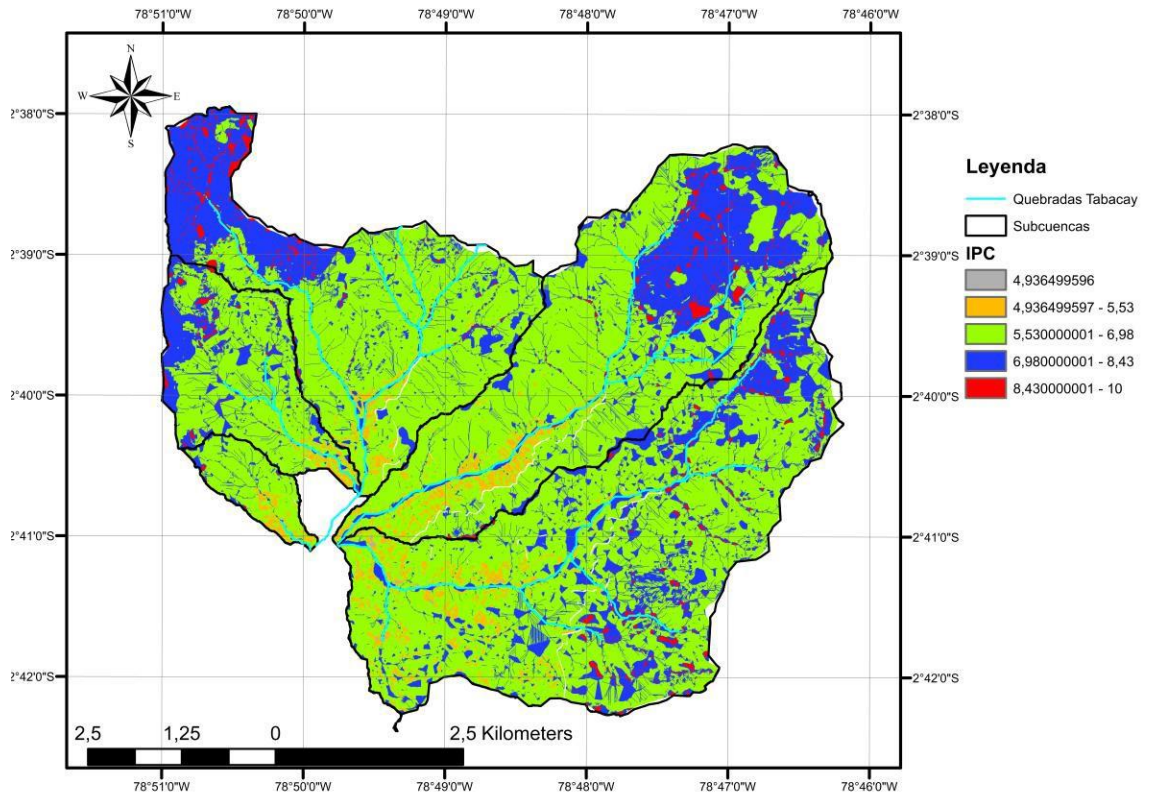
En los siguientes mapas, las zonas con menor puntaje del IPC, se representan en color gris y se consideran de muy baja importancia para conservación, las zonas de color naranja se consideran de baja importancia y las zonas de color verde son de importancia media; las zonas de color azul con puntaje dentro del cuarto intervalo (mayor al puntaje promedio y menor al puntaje máximo), se consideran de alta importancia para su conservación. Las zonas con mayor puntaje del IPC, se representan con color rojo y se consideran de muy alta importancia para su conservación.



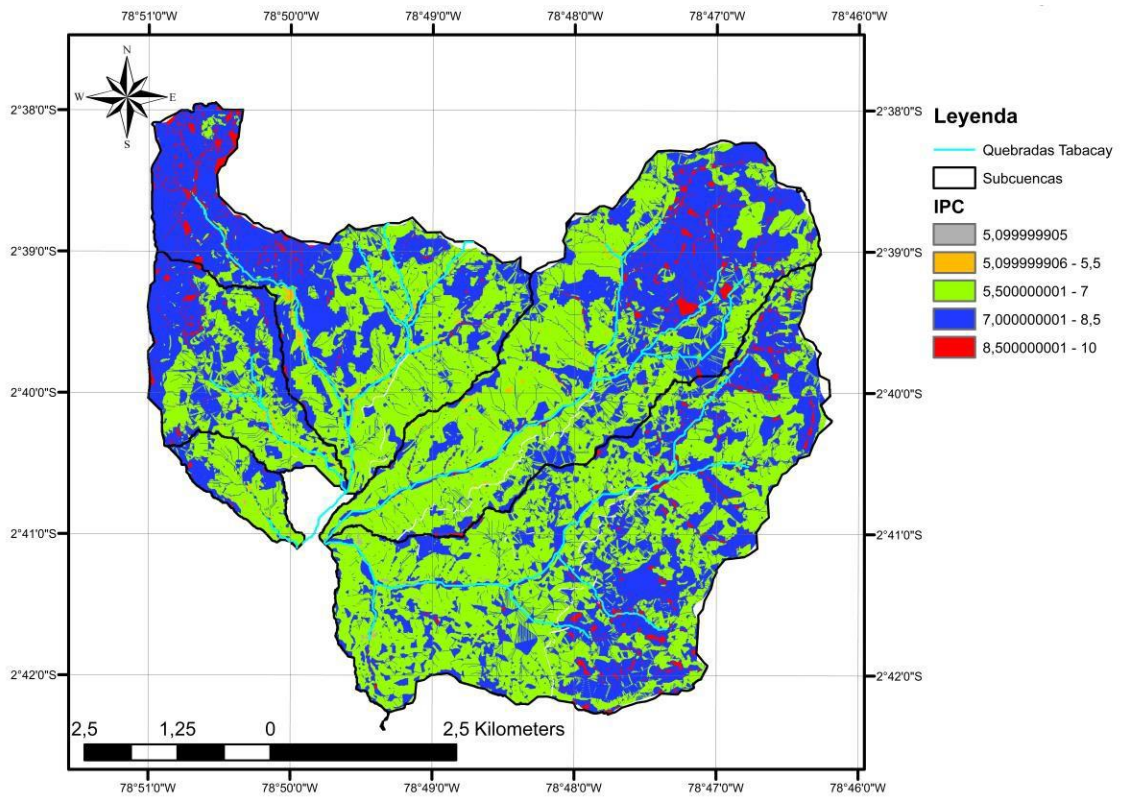
**Figura 4** Mapa de valores máximos el IPC



**Figura 5** Mapa de valores mínimos del IPC



**Figura 6** Mapa de valores promedio del IPC



**Figura 7** Mapa de valores de percepción personal del IPC

## 6. Discusión e interpretación de Resultados

En el mapa de valores mínimos del IPC (Figura 5), predominan las zonas de importancia muy baja y baja de conservación; le siguen las zonas de importancia media y, en menor cantidad se aprecian zonas de alta importancia y muy alta importancia de conservación.

El mapa de valores promedio (Figura 6) coincide en su mayoría con el mapa de valores máximos del IPC (Figura 4). Las zonas de importancia muy baja de conservación son escasas, predominan las zonas de importancia media; las zonas de alta importancia y muy alta importancia de conservación, varían levemente porque se presentan en mayor cantidad en el mapa de valores promedio. La característica biofísica prioritaria en el mapa de valores promedio es el tipo de suelo y, en el mapa de valores máximos es el ITH.

En el mapa de percepción personal (Figura 7), existen escasas zonas de importancia muy baja, baja y media. Las zonas de muy alta importancia de conservación, son las que presentan menor porcentaje de pendiente, cobertura vegetal con puntaje alto y valores máximos del ITH.

La característica biofísica considerada con menor puntaje en todos los mapas, es la morfología y, en la mayoría de mapas el ITH tiene el mayor puntaje. Esto puede ser apreciado en la Tabla 16.

Los 4 mapas generados comparten las zonas de muy alta importancia, por lo que se considera que el criterio de los actores tiene mucha concordancia y demuestra la importancia de seleccionar expertos con un alto conocimiento del tema.

Al realizar el análisis estadístico de los resultados se puede identificar cómo las prioridades cambian en función de una característica biofísica que resulta más importante; por ejemplo, en el mapa de valores mínimos y máximos, el ITH es el índice que predomina, mientras que en el mapa de valores promedio, predomina el tipo de suelo y, en el mapa de percepción personal, la característica predominante es la pendiente.



El mapa de valores de prioridad mínima presenta muchas zonas de baja importancia para conservación, a diferencia del resto de mapas. Por otro lado, los mapas de valores máximos y valores promedio coinciden en su mayoría porque ambos priorizan el ITH y el tipo de suelo y, ambos tienen muchas zonas de importancia media de conservación; finalmente, el mapa de percepción personal presenta muchas zonas de alta importancia de conservación.

En un futuro se debería considerar la combinación entre todas las posibilidades existentes y con los resultados, se podría generar mapas de similitudes y discrepancias.



## 7. Conclusiones

En este estudio se desarrolló una metodología fácil de aplicar para identificar zonas de importancia de conservación a partir de mapas de características biofísicas de las cuencas. El estudio fue desarrollado en la cuenca alta del río Tabacay, sin embargo, el método puede ser aplicado en cualquier cuenca que disponga de esta información.

Los resultados indican que las zonas de muy alta importancia para su conservación, están presentes en su mayoría en la parte alta de la cuenca y corresponden a pendientes leves, vegetación nativa, suelo Andosol (predominante en la cuenca), ITH alto y subcuencas de forma rectangular. El método propuesto facilita la identificación de zonas de nula, baja, media, alta y muy alta importancia de conservación, la selección de las mismas por parte de las instituciones, depende del presupuesto disponible para inversión en su conservación.

La facilidad de aplicación del método se debe a que es flexible en cuanto a la cantidad de datos que requiere: si hay más información (por ejemplo, profundidad de suelos), se la puede incorporar, y si hay menos, igual se pueden generar mapas de prioridad con la información disponible, pero presenta dificultades por el contenido heterogéneo de información debido al uso de datos de distinta procedencia, motivo por el que la metodología podría presentar un leve margen de error o ausencia de datos en los mapas resultantes. El método podría fácilmente ser aplicado en otras cuencas que cuenten con la misma información que la cuenca de estudio y, posteriormente se haría una verificación in situ, con propósito de validación.

La metodología fue aplicada a partir de la priorización de características biofísicas con fines de regulación hidrológica. Para esto los puntajes fueron asignados por los expertos. Se concluye que fue acertado contar con el criterio de los expertos en el estudio, pero, para garantizar que los datos obtenidos mediante encuestas sean válidos, es necesario definir e informar el objetivo del estudio; caso contrario, los resultados serían incongruentes. En un futuro se sugiere contar con una mayor





participación de actores de diferentes especialidades para tener una mayor variabilidad de criterios al procesar las encuestas e identificar el impacto de no contar con expertos hidrólogos en las zonas de priorización.

A partir de la asignación de pesos de los expertos se generaron los mapas de priorización. Se encontró que, en los mapas generados con puntajes mínimos, máximos, promedio y de percepción personal, las zonas de mayor prioridad coincidieron en su mayoría, en todos los mapas, demostrando que la metodología propuesta, llega a identificar los resultados esperados. El criterio de los expertos tiene mucha influencia en el estudio, por lo tanto, se concluye que es necesario consultar al menos a 4 expertos para asegurar que los resultados sean congruentes y no sesgados.

La metodología desarrollada para obtener el IPC es de fácil aplicación, pero el tiempo de procesamiento y los resultados, dependen de la calidad de los datos empleados. La calidad de los recursos, debe ser la misma para todos; para la elaboración del estudio fue necesario el procesamiento y corrección de mapas, y de ésta manera obtener los resultados esperados de la metodología.



## 8. Recomendaciones

La información empleada en el estudio corresponde a diferentes escalas y fuente, por lo que se sugiere una actualización o levantamiento de la información de las características biofísicas recopiladas como: tipo de suelo y tipo de cobertura vegetal, con propósito de garantizar los resultados al aplicar la metodología propuesta.

## 9. Trabajos futuros

Algunas características biofísicas de la cuenca podrían incluirse para afinar los resultados de la metodología. Principalmente la profundidad del suelo, índice de erodabilidad de los suelos e índice de erosividad de la lluvia (en función de información meteorológica recolectada de varios años) podrían ser muy útiles para identificar las mejores zonas de conservación hidrológica.

Con propósitos de validación de la metodología, las características biofísicas obtenidas mediante procesamiento de mapas existentes, podrían obtenerse del procesamiento de imágenes satelitales, a escalas espaciales más finas.

Para la verificación de ésta metodología es recomendable la verificación in situ en la que podría incluirse al estudio el estado de conservación o degradación de la vegetación existente.



## 10. Bibliografía

- Benegas, L., & León, J. (2009). *Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas - La experiencia del Programa Focuenas II*. Retrieved from <https://www.catie.ac.cr/attachments/article/542/CriteriosParaPriorizarCuencas.pdf>
- Benítez, C., Arias, W., & Quiroz, J. (1980). *Manual de Conservación de Suelos y Aguas*. Ministerio de Agricultura y Alimentación.
- Camacho, N. (2011). *Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*.
- Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. (2014). *Criterios para la priorización de cuencas hidrográficas objeto de Ordenación y Manejo*. Retrieved from <http://www.aguamiderechomideber.org/wp-content/uploads/2014/12/Documento-tCcnico-priorizaciøn.pdf>
- Englund, O., Berndes, G., & Cederberg, C. (2017). How to analyse ecosystem services in landscapes—A systematic review. *Ecological Indicators*, 73, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.009>
- Feijo, C. (2015). *La destrucción morfológica y biológica de los ríos pampeanos*. (January 2007).
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS*, 143–158.
- Gravelius, H. (1941). *Flusskunde*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=wjxwmwEACAAJ>
- Hernández Guerra, D. A. (2015). *Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del río Ráquira departamento de Boyacá a través del programa SWAT*. Universidad Católica de Colombia.



Jaramillo Neira, K. S. (2018). *Caracterización Hidrológica e Hidrogeológica de la Microcuenca del río Tabacay*.

PROMAS. (2003). *Plan de manejo de la microcuenca del Río Tabacay*. 1,4.

Quintanilla, M., Spickenbom, J., Calderón, N., & Larrea, D. (2011). Disponibilidad Hídrica y Demanda de Agua de la cuenca Piraí: Situación Actual y Escenario de Cambio Climático. In *Fundación amigos de la Naturaleza*. Santa Cruz, Bolivia.

Roa-Lobo, J., & Kamp, U. (2012). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53 (1), 109–126. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Saran, S., Sterk, G., Peters, P., & Dadhwal, V. K. (2010). Evaluation of digital elevation models for delineation of hydrological response units in a himalayan watershed. *Geocarto International*, 25(2), 105–122.

<https://doi.org/10.1080/10106040903051967>

Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., ... Liu, S. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 546, 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.040>