

LOCALIZACIÓN DE ZONAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN APLICANDO LÓGICA DIFUSA

CRITICAL AREAS OF CONSERVATION USING DIFFUSE LOGIC

Sofía Mejía Aguilar¹, Fabián Rodríguez-Espinosa^{2*}

¹ Consultora privada, José Abascal N-4021 y Gaspar de Villarroel, sofi210493@gmail.com

² Universidad de las Fuerzas Armadas, Gral. Rumiñahui s/n y Ambato, Sangolquí Ecuador, ffrdriguez3@espe.edu.ec.

* Autor de correspondencia: Universidad de las Fuerzas Armadas, ffrdriguez3@espe.edu.ec

Recibido: 25 de febrero 2021

/

Aceptado: 01 de junio 2021

RESUMEN

Ante la exigente demanda de los servicios que provienen de los recursos naturales, debido al aumento poblacional, el crecimiento económico y la necesidad de mejorar la calidad de vida, ha causado el deterioro de los servicios ambientales. El cuidado de los mismos representa un trabajo demandante en tiempo y dinero, por lo que existen herramientas como la valoración económica cuyo objetivo es asignar valores cuantitativos a los bienes y servicios ecosistémicos y así apoyar de alguna manera a la conservación de los ecosistemas con el fin de lograr el manejo eficiente de los recursos. En el presente estudio se realizó un modelo con la metodología de lógica difusa, que permitió proponer zonas de conservación y cuidado del recurso hídrico. Se determinó que existen 6100 Ha con alta probabilidad de ser conservadas. Finalmente, la ciudad de Tulcán debería revisar sus políticas de tarifas de agua para mejorar el manejo del recurso de forma eficiente y promover la conservación del páramo donde sus fuentes de agua se localizan.

Palabras clave: Conservación, páramos, lógica difusa, ubicación

ABSTRACT

Population growth is the driving force of a raise on natural resources demand, economic growth and life quality increase. Yet, it is also the main cause of environmental services damage and worsening. Conservation of environmental services is a demanding work in time and money especially with those which do not have a price or market value. The present study concentrates in, throughout a Fuzzy logic model, establishing critical areas of paramo conservation for water conservation. This study was carried out in the City of Tulcan, Carchi province. An area of 6,100 ha of Andean highlands (paramo) should be protected or declare for some kind of conservation to guarantee water provision. Finally, the city of Tulcan should review its policy for water fees in improve water management efficiency and conservation of water sources.

Key words: Conservation, Andean highlands, Diffuse logic, localization

INTRODUCCIÓN

La demanda de los servicios ambientales que provienen de los ecosistemas está en aumento, debido principalmente al crecimiento exponencial de la población mundial, el desarrollo económico y la necesidad de mejorar la calidad de vida (Klimaszyk and Goldyn, 2020; McGrane, 2016; Khatri and Tyagi, 2015). Esta mayor demanda ha causado el deterioro y la sobreexplotación de los ecosistemas, especialmente a los ecosistemas frágiles como los páramos (Quispe-Coica, et al., 2020; Biswas and Tortajada, 2019; Custodio y Chávez, 2019; Ruiz, et al., 2017). Los páramos por su alta sensibilidad ante cualquier alteración o daño ambiental, son difícilmente recuperables, y necesitan especial atención dada la presión social sobre el ambiente y el impacto de las actividades antrópicas. En los páramos las condiciones ambientales extremas con temperaturas que pueden bajar menos de 0° y una alta variabilidad durante el día. Condiciones a las cuales se han adaptado un número pequeño de especies por lo tienen una baja tolerancia a cambios (Capriles et al., 2016; Celleri and Feyen, 2009; Squeo et al., 1991). Estas condiciones hacen que sean extremadamente vulnerables a los efectos antrópicos y necesitan especial cuidado dada la presión social sobre el ambiente y el impacto de las actividades humanas que hacen incrementar su fragilidad (Boelens, 2008; Rivera & Vargas, 1991).

Los páramos son fundamentales para la regulación de la hidrología regional y constituyen la fuente de agua potable para consumo humano, desempeñando de esta manera una función hidrológica, como fábricas de agua y esponjas de almacenamiento. Los páramos tienen un importante valor científico y ecológico por su flora, avifauna endémica y su paisaje único, es decir tiene una función ecológica, también cumplen un importante rol en la producción agrícola, pecuaria y forestal, lo cual representa una función económica (Camacho, 2013). Su principal, aunque no única función relacionada con las sociedades humanas es la capacidad de sus suelos, desde captar, almacenar y distribuir agua a las tierras bajas, donde es consumida y usada por millones de personas, para riego, agua potable, generación hidroeléctrica, etc. (Viviroli, et al., 2007).

La importancia hidrológica de los páramos radica en el potencial de captación, almacenamiento y regulación hídrica por lo cual han sido considerados ecosistemas estratégicos (McGrane, 2016; Guhl, 1982). El páramo es el mayor proveedor de agua de los Andes de Venezuela, Colombia y Ecuador y de partes extensas de las zonas interandinas, de las costas del Caribe y el Pacífico de Costa Rica y Panamá, hasta el desierto del norte de Perú (Rodríguez-Espinosa et al., 2018; Rodríguez et al., 2009b). No es exagerado señalar que prácticamente todos los sistemas fluviales de los países andinos septentrionales nacen en el páramo y que los sistemas de riego, agua potable e hidroelectricidad dependen, en gran medida de este ecosistema (Malagón Castro, 2003; Malagón y Pulido, 2000; Malagón et al., 1991).

El más conocido y estudiado servicio de aprovisionamiento del páramo es la provisión de agua dulce, pues provee de hasta 80% del agua dulce de las grandes ciudades como Quito y Bogotá (Rodríguez-Espinosa et al., 2018; Buytaert et al, 2006; Rodríguez et al., 2009a). En el Ecuador se desarrolló la creación de una mancomunidad para la protección del páramo, 11 provincias forman parte de esta iniciativa y la provincia que lidera el proyecto es Cotopaxi. El objetivo principal es el cuidado de estos ecosistemas, tener una distribución equitativa del agua y evitar el avance de la frontera agrícola (Moreta, et al., 2018). Otros servicios ambientales también tienen vital importancia y reconocimiento para la conservación de ecosistemas críticos como el almacenamiento de carbono tanto en la capa vegetal como en el suelo son de vital importancia para capturar el CO₂ proveniente de la combustión de hidrocarburos (León et al., 2017). La paja es usada en la construcción tradicional pero también en algunas construcciones, el uso de leña y madera (construcción, herramientas, cercas) de los bosques dentro del páramo también es frecuente (Vega & Martínez, 2000). El objetivo del estudio es proponer zonas

prioritarias de cuidado del recurso hídrico mediante el uso de herramientas geo-informáticas con la metodología de Lógica Difusa.

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

El área de influencia del proyecto se encuentra localizada en las parroquias Tufiño y en la cabecera cantonal de Tulcán (la población a servir), en la provincia de Carchi. El cantón Tulcán se encuentra ubicado al Norte de la provincia del Carchi, su cabecera cantonal es la ciudad de Tulcán, la misma donde se agrupan gran parte de su población. El cantón limita al Norte con Colombia, Departamento de Nariño, al Sur con los cantones Huaca, Montufar, Espejo y Mira, al Este con Colombia y la provincia de Sucumbíos y al Oeste con Colombia y la provincia de Esmeraldas (Gobierno Autónomo Descentralizado de Tulcán, 2015).

Según el Gobierno Provincial del Carchi (Prefectura), la ciudad de Tulcán posee el 47% de su población. Por ello Tulcán, con una población según el censo del INEC 2010 de 60.403 habitantes que representa el 69% de la población de todo el territorio del cantón Tulcán, se divide en dos parroquias urbana: Gonzáles Suárez y Tulcán, teniendo una extensión total de 1670,03 Km², con una altura de 2.957 m.s.n.m. (Figura 1).

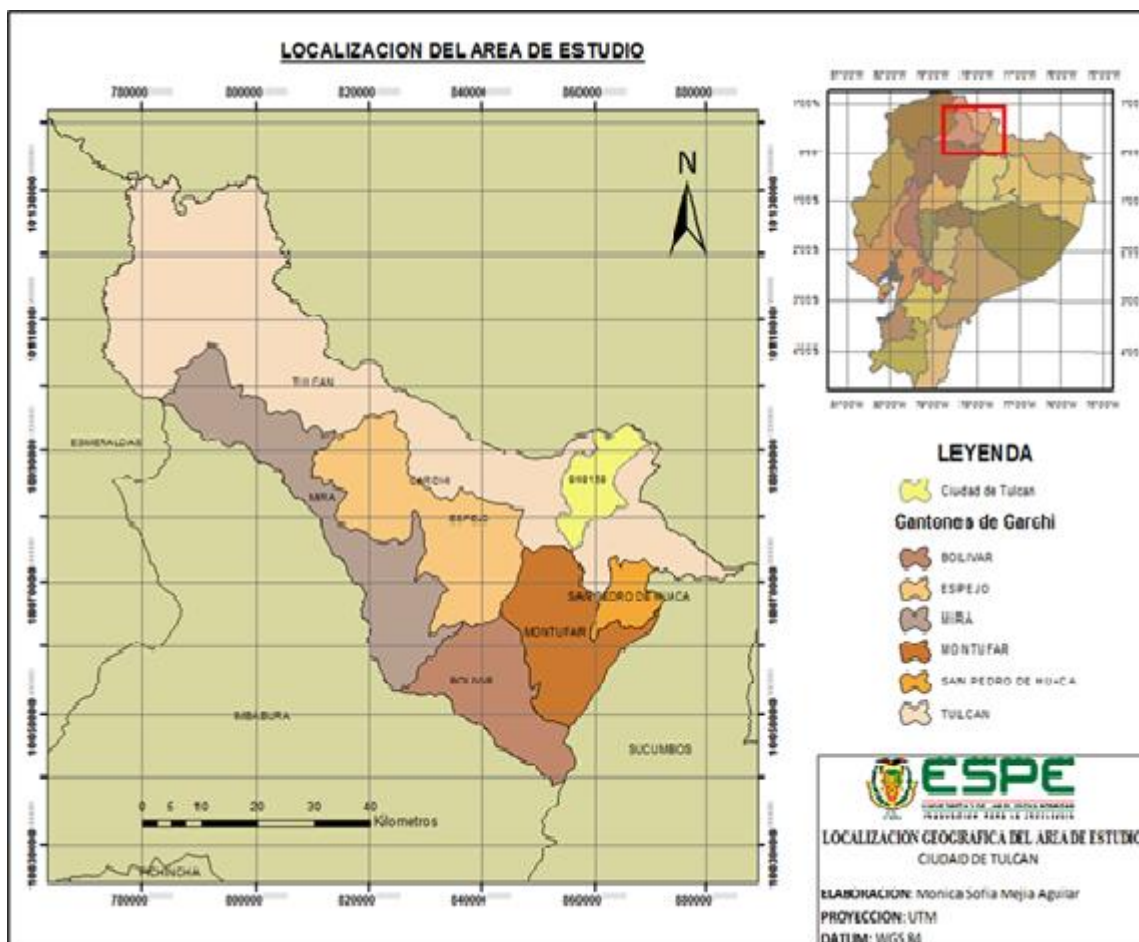


Figura 1. Localización del área de estudio

EVALUACIÓN MULTICRITERIO

El objetivo general de la evaluación multicriterio es auxiliar al decisor a escoger la mejor alternativa entre un conjunto de alternativas en base a un conjunto de criterios (factores y restricciones) en competencia y conflicto, estos pueden ser económicos, ambientales, sociales, institucionales, técnicos, entre otros (Pietersen, 2006).

De acuerdo con Tkach y Simonovic (1997), las técnicas multicriterio se caracterizan por una gran diversidad metodológica y pueden agruparse en tres principales grupos de técnicas: a) de ordenamiento o jerarquías; b) de utilidad multiatributo o multicriterio, y c) técnicas de programación matemática. Las primeras requieren de comparaciones pareadas o globales entre alternativas, y no son prácticas cuando el número de alternativas es grande; las segundas se basan en modelos multiplicativos simples o aditivos para agregar o agrupar criterios simples; las terceras se utilizan en un contexto continuo para identificar soluciones muy cercanas a la solución ideal introduciendo la medida de la distancia en unidades métricas (Bocco et al, 2002).

La premisa básica de la lógica difusa, como una de las técnicas multicriterio, es que existen imprecisiones en los atributos y en la geometría de los datos especiales. La definición de las clases en una clasificación en los procesos de establecer jerarquías y la imprecisión al asignar fenómenos a las clases pueden afectar la toma de decisiones. La lógica difusa se enfoca en modelar las imprecisiones de los límites de clases (ESRI, 2016).

La teoría matemática de la lógica difusa fue propuesta por Zadeh en 1965, y se basa en la existencia de diferentes grados de pertenencia entre lo falso y lo verdadero (deseado, no deseado; apto, no apto); es decir, valores como “moderado”, “bajo”, “alto”, entre otros (variables lingüísticas), en lugar de expresarse como “sí” o “no” similar al concepto del álgebra booleana. Mediante la lógica difusa, un problema se puede representar en términos de conjuntos difusos, los cuales pueden derivarse de procedimientos cuantitativos o cualitativos (Prakash, 2003).

Para modelar o representar las variables se hará uso de las funciones sinusoidales y cosinusoidales ya que estas se ajustan a las representaciones que tiene la lógica difusa, en donde al ángulo a ser analizado será la variable a ser representado, por lo que la probabilidad de que suceda un evento se puede definir como:

$$P = f(\text{sen}(\alpha)) \quad (1)$$

Donde:

P = probabilidad de ocurrencia de un evento o fenómeno

α = variable en función del evento o fenómeno

Mínima P = 0 o 0%

Máxima P = 1 o 100%

En Padilla (2006) se determina que existen 3 casos. En el Caso 1 se contempla a la curva del seno cuadrado, que se encuentra en un rango de 0 a π radianes. Los eventos al cual corresponderían este caso, serían aquellos que la probabilidad de presencia va desde 0 y crece hasta un punto máximo, posteriormente esta probabilidad vuelve a decrecer.

$$P = (\text{sen}^2(\alpha)) \quad (2)$$

Rango = $[0 < \alpha < \pi]$

Los puntos de interés del caso 1, de acuerdo con Padilla (2006) permiten el análisis del área bajo la curva. Los puntos de inflexión se calculan con la segunda derivada de la función (Figura 2). A raíz de esto se determinan los puntos necesarios para ser analizados, los cuales se presentan en la figura 2b.

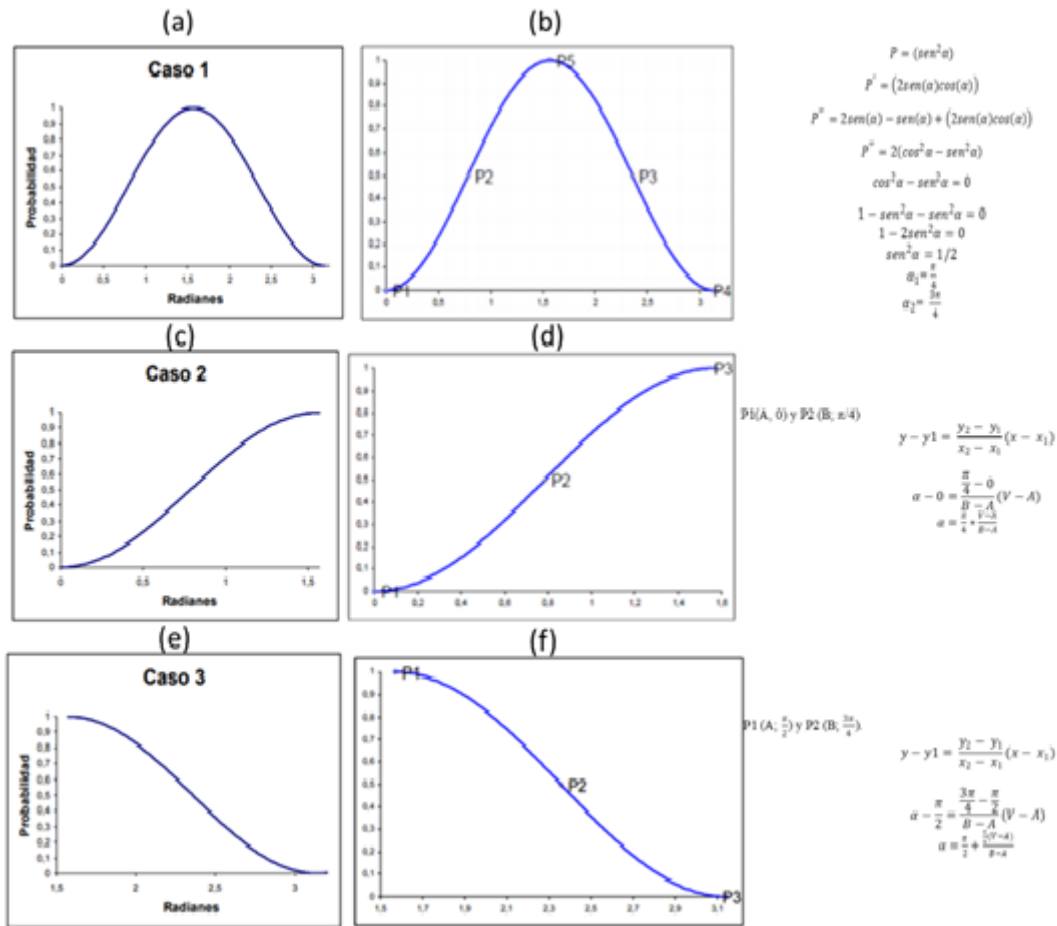


Figura 2. Casos de la lógica difusa; (a) y (b) para Caso 1; (c) y (d) para Caso 2, (e) y (f) para el Caso 3.

Fuente: (Padilla, 2006)

Donde, P1 (A; 0) en la figura 2b: este es el valor mínimo que obtendrá la variable a ser modelada; P2 (B; $\pi/4$): punto de inflexión donde empieza el área en la que se encuentra ubicado el mayor número de datos. P3 (C; $3\pi/4$): punto de inflexión donde termina el área en la que se encuentra ubicado el mayor número de datos. P4 (D; π): punto en el que la variable a modelar tendrá el valor mínimo. P5 (E; $\pi/2$): punto en el que la variable toma su valor máximo, donde $E = (B+C) / 2$ (figura 2b).

Sección P1P2 (figura 2b) es la sección al inicio de la función en la que existe menor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$P1(A; 0) \text{ y } P2(B; \frac{\pi}{4})$

$$y - y1 = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} (x - x1) \tag{3}$$

Remplazando los puntos se tiene:

$$\begin{aligned}\alpha - 0 &= \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A) \\ \alpha &= \frac{V - A}{B - A} * \frac{\pi}{4}\end{aligned}\quad (4)$$

Sección P2P5 (figura 2b) es la sección al inicio de la función en la que existe mayor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P2 (B; $\pi/4$) y P5 (E; $\pi/2$)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Remplazando los puntos se tiene:

$$\begin{aligned}\alpha - \frac{\pi}{4} &= \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{\frac{B + C}{2} - B} (V - B) \\ \alpha &= \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{2}(V - B)}{C - B}\end{aligned}\quad (5)$$

Sección P5P3 (figura 2b) es la sección al final de la función en la que existe mayor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P5 (E; $\frac{\pi}{2}$) y P3 (C; $\frac{3\pi}{4}$)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (6)$$

Remplazando los puntos se tiene:

$$\begin{aligned}\alpha - \frac{\pi}{2} &= \frac{\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{C - \frac{B + C}{2} - B} (V - \frac{B + C}{2}) \\ \alpha &= \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi}{4}(2V - B + C)}{C - B}\end{aligned}\quad (7)$$

Sección P3P4 (figura 2b) es la sección al final de la función en la que existe menor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P3 (C; $\frac{3\pi}{4}$) y P4 (D; π)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (8)$$

Remplazando los puntos se tiene

$$\alpha - \frac{3\pi}{4} = \frac{\pi - \frac{3\pi}{4}}{D - C} (V - C)$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V-C)}{D-C} \quad (9)$$

Caso 2. Este caso contempla a la parte de la curva seno cuadrado, que se encuentra en un rango de 0 a $\pi/2$ radianes (figura 2c). Los eventos al cual corresponderían este caso, serían aquellos que la probabilidad de presencia crece desde 0 hasta un punto máximo, a medida que se alejen de determinada condición habrá más probabilidad de ocurrencia.

$$P = f(\text{sen}^2(\alpha))$$

$$\text{Rango} = [0 < \alpha < \pi/2]$$

En este caso existen 3 puntos de inflexión de la curva los mismos que serán tomados del caso 1 (figura 2d), P1(A,0); P2 (B; $\pi/4$); P3 (C; $\pi/2$).

Sección P1P2 (figura 2d) es la sección en la que existe menor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P1(A, 0) y P2 (B; $\pi/4$)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Remplazado los puntos se tiene

$$\alpha - 0 = \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} * \frac{V-A}{B-A} \quad (10)$$

Sección P2P (figura 2d) es la sección en la que existe mayor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P2 (B; $\frac{\pi}{4}$) y P3 (C; $\frac{\pi}{2}$)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Remplazando los puntos se tiene

$$\alpha - \frac{\pi}{4} = \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{C - B} (V - B)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V-B)}{C-B} \quad (11)$$

Caso 3. Es la curva de la función seno cuadrado que comprende el rango de $\pi/2$ a π . Se puede entender por su curva que a medida que se las variables que se alejen de una condición específica, su probabilidad de ocurrencia disminuye (figura 2e). Existen 3 puntos de inflexión

de la curva los mismos que serán tomados del caso 1 (figura 2f), estos puntos con coordenadas: P1 (A; $\pi/2$); P2 (B; $3\pi/4$), P3 (C, 0).

Sección P1P2 (figura 2f) es la sección en la que existe mayor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P1 (A; $\frac{\pi}{2}$) y P2 (B; $\frac{3\pi}{4}$).

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$$

Remplazando los puntos se tiene

$$\begin{aligned}\alpha - \frac{\pi}{2} &= \frac{\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{B - A}(V - A) \\ \alpha &= \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi(V-A)}{4}}{B-A}\end{aligned}\quad (12)$$

Sección P2P3 (figura 2f) es la sección en la que existe menor cantidad de datos. Se utiliza la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

P2 (B; $\frac{3\pi}{4}$) y P3 (C, 0).

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$$

Remplazando los puntos se tiene

$$\begin{aligned}\alpha - \frac{3\pi}{4} &= \frac{\frac{\pi}{4} - \frac{3\pi}{4}}{C - B}(V - B) \\ \alpha &= \frac{3\pi}{4} + \frac{\frac{\pi(V-B)}{4}}{C-B}\end{aligned}\quad (13)$$

Para determinar las zonas prioritarias de conservación en las afluentes abastecedoras de agua para la ciudad de Tulcán, primero se obtuvo los archivos cartográficos bases para su análisis y aplicación en un software de Sistemas de Información Geográfica que en este caso fue ArcGis 10.8. Para lo cual se requirió información cartográfica al área de técnicos de la empresa municipal de agua potable y alcantarillado en la ciudad de Tulcán, se obtuvo información en archivos shapefile de insumos bases como: Puntos de captación de agua, cuencas y microcuencas hidrográficas, curvas de nivel y áreas protegidas. Además, se obtuvo información temática del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAGAP) en archivos shapefile: Sistemas productivos y Geopedológico (Figura 3).

Adicionalmente se utilizó las curvas de nivel a escala 1:50.000 utilizando la altura en metros, se ubicó los cuerpos de agua también a escala 1:50.000, de igual forma se utilizó el Orden de Suelo a partir de la información geopedológica del MAGAP a escala 1: 25.000 del año 2013, y finalmente el uso de suelo a partir de la información de los sistemas productivos del MAGAP a escala 1:25.000 también del año 2013. La variable páramos fue obtenida de la Cobertura Vegetal obtenida del MAGAP del año 2013 en escala 1:25.000 (Figura 4).

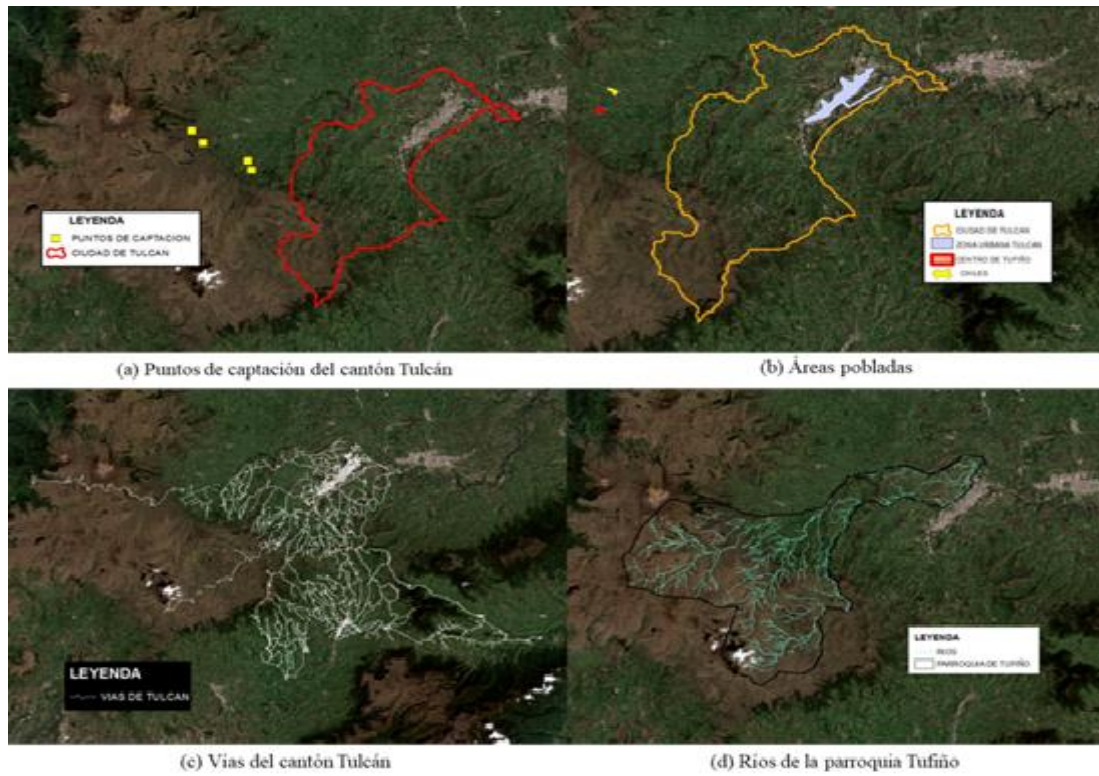


Figura 3. Variables utilizadas en la Lógica Difusa de la demarcación del área de estudio; (a) puntos de captación de agua; (b) áreas pobladas; (c) vías del cantón Tulcán, y (d) ríos de la parroquia Tufiño.

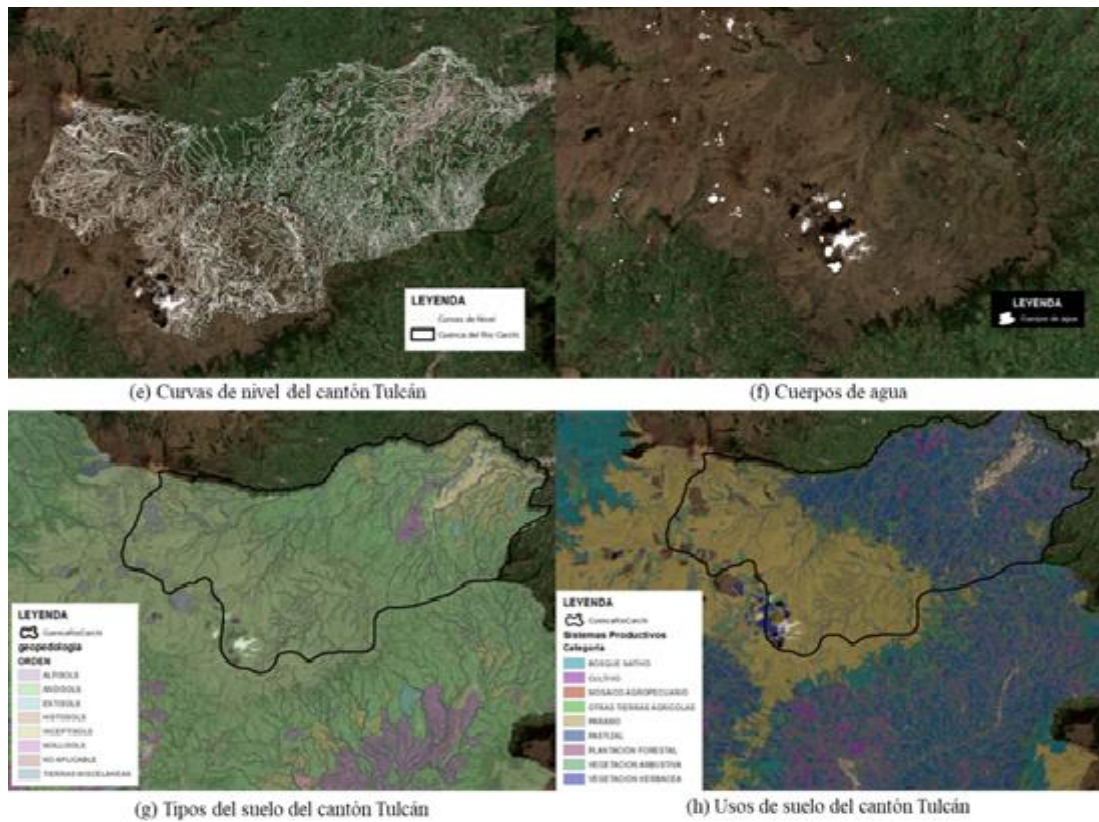


Figura 4. Variables en la Lógica Difusa de la caracterización del área de estudio; (e) curvas de nivel; (f) cuerpos de agua; (g) tipos de suelo, y (h) usos de suelos.

La altura es un factor que determina la existencia de los ecosistemas, el páramo en el país se ubica entre las cotas de los 3200 a 4700m en el país (Camacho, 2013). Para realizar la zonificación se tomará en cuenta la altura desde los 3200m. Mientras más cerca se encuentre una zona a la altura establecida tendrá mayor probabilidad de ser conservada, se aplica el caso 3 de lógica difusa.

Los puntos de captación representan el lugar inicial del sistema de abastecimiento de agua potable, para su posterior tratamiento y suministro del recurso a la población (Basan Nickisch, et al., 2018). Los puntos donde se capta el agua tienen una gran importancia, mientras más cerca se encuentre de la zona tendrá mayor probabilidad de ser conservada, se aplica el caso 3 de lógica difusa

Sistema Hídrico. El agua es un recurso crucial para la humanidad y para el resto de los seres vivos. Los ríos y lagos, aguas costeras, marítimas y subterráneas, constituyen recursos valiosos que es preciso proteger (Campoblanco & Gomero, 2000). Para la zonificación se tomó en cuenta los ríos ubicados en la parroquia de Tufiño. Mientras más cerca esté una zona de las fuentes de agua tendrá mayor probabilidad a ser conservada, se aplica el caso 3 de lógica difusa

Zonas pobladas. El impacto que tienen las actividades humanas en su desarrollo, constituye la fuente de presiones en el medio ambiente y tiene como consecuencia un desequilibrio en los ecosistemas (CSIC, 2006). Para la zonificación se tomó en cuenta la ciudad de Tulcán, Tufiño y Chiles. Mientras más lejos se encuentre una zona de esta variable tiene mayor posibilidad a ser conservada, se aplica el caso 2 de lógica difusa.

Cuerpos de Agua. Los lagos y lagunas permiten mantener y aumentar la biodiversidad del ecosistema (Conaf, 2013). Mientras más cerca esté la zona de esta variable, tiene mayor probabilidad para ser conservada. Se aplica el caso 3 de lógica difusa.

Sistema Vial. Los proyectos viales constituyen un elemento importante en el desarrollo de las regiones, pues ayudan al beneficio social y económico, a su vez mejoran la calidad de vida de los habitantes. Sin embargo, la apertura de carreteras, al igual que todas las obras de infraestructura y actividades antropogénicas, causa efectos negativos sobre el ambiente (Arroyabe M et al, 2006). Mientras más lejos estén las vías se podrá mantener una zona en estado de conservación, se aplica el caso 2 de lógica difusa.

Concesiones de agua. Existe un orden de prioridad para las concesiones de agua, lo que quiere decir que algunos usos tienen prioridad sobre otros usos, el uso doméstico tendrá siempre prioridad sobre los demás, los usos colectivos sobre los individuales y los de los habitantes de una región sobre los de fuera de ella (Corrales, 2015). Para el estudio se tomaron en cuenta las autorizaciones de agua para consumo humano. La cercanía a esta variable tendrá la posibilidad de mantener una zona en estado de conservación, se aplica el caso 3 de lógica difusa.

Los páramos tienen características que los hacen vitales, Mientras más cerca este la zona a ser conservada de este ecosistema frágil, tiene mayor probabilidad de ser conservada, se aplica el caso 3 de lógica difusa.

Las variables utilizadas fueron rasterizadas, para esto se aplicó la herramienta de Euclidean Distance del Spatial Analyst. Se consideró la escala de las capas 1:50.000 y se estableció el tamaño de celda de 16 metros, que es el mínimo elemento que se puede visualizar. Con el fin de reducir los cálculos matemáticos de la lógica difusa, Padilla (2006) propone que para el análisis las variables estén en un rango de [0,1], por lo que fueron normalizadas a través de la herramienta Raster Calculator del Spatial Analyst y se aplicó la siguiente fórmula:

$$N = \frac{V_o - vm}{V_M - vm} \quad (14)$$

Donde:

Vo. Es el raster original

vm. Es el valor mínimo del raster

Vm. Es el valor máximo del raster

Una vez realizada la normalización, se transformó en radianes, considerando que en el caso 2 y el caso 3 el rango de las funciones va de 0 a $\pi/2$, para esta operación se utilizó la siguiente fórmula:

$$R = N * 1.5707963268 \quad (15)$$

Donde R representa los radianes y N es el raster normalizado.

Finalmente se procedió a aplicar las probabilidades a cada raster según los casos estudiados.

Si la variable corresponde al caso 2 se aplicó:

$$P = \text{sen}(R) \quad (16)$$

Si la variable corresponde al caso 3 se aplicó:

$$P = \text{cos}(R) \quad (17)$$

Con el fin de realizar el análisis estadístico se tomó puntos de comprobación en campo de forma aleatoria, los puntos en la zona de prioridad crítica de conservación se dio el valor de 1. Y los puntos que se tomó en la zona de prioridad baja se dio el valor de 0.

Para los cálculos estadísticos de aplicó:

$$V = [V_{med} - V_{calc}]^2 \quad (18)$$

Donde:

V: Valor de ajuste

Vmed: Es el punto tomado en campo

Vcalc: Es el valor en el modelo

Finalmente, a cada variable jerarquizada, se le dio distintos pesos para poder comparar la importancia de cada variable jerarquizada y dar la consistencia requerida para seleccionar las áreas críticas de conservación.

RESULTADOS

La información geográfica recolectada corresponde a datos en formato shapefile con escala 1:50000 y 1:25000, con sistema de referencia geofísico mundial de 1984 (WGS84), coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) 17S. Los modelos se realizaron en escala 1:50.000 donde cada pixel tiene 16 metros. Para realizar la zonificación de áreas para conservación fue necesario establecer a que caso de lógica difusa pertenece cada variable.

En la Figura 5 se muestra un resumen del proceso que se aplicó a cada variable, se determinó que el caso 2 es el apropiado para las variables zonas urbanas y sistema vial, ya que, si la zona a ser conservada se encuentra lejos de presiones antrópicas, la zona tendrá mayor posibilidad para su manejo y cuidado.

Para las variables: páramo, sistema hídrico, uso de suelo, textura de suelo, captaciones de agua, concesiones y altura se determinó que el caso 3 es el apropiado, ya que estas variables son esenciales para cuidado, y la cercanía a las mismas proporcionaría mayor importancia para la conservación de la zona.

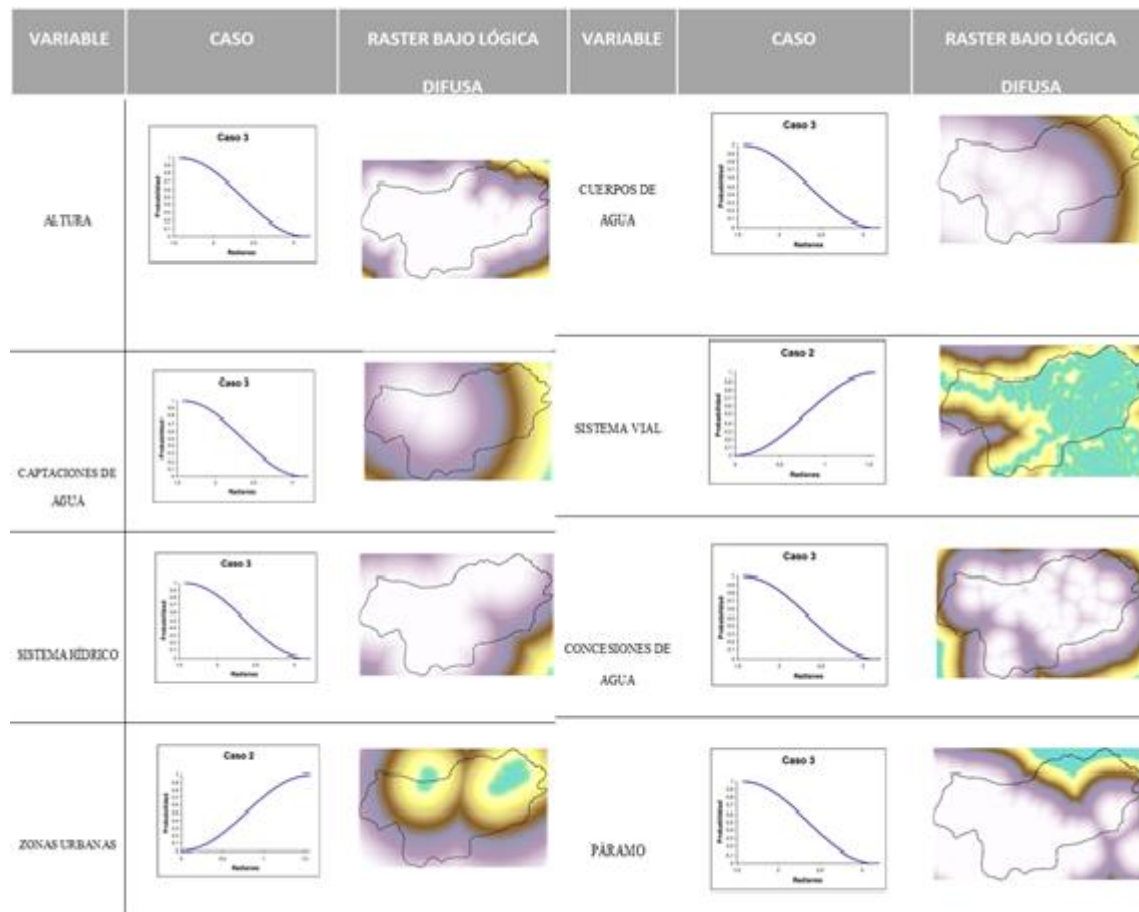


Figura 5. Procedimiento para cada variable

Para la variable textura de suelo se realizó una clasificación de acuerdo a la permeabilidad y contenido de materia orgánica de cada tipo de suelo existente en la cuenca hidrográfica del río Carchi. Como se puede observar en la tabla 16 la mayor jerarquización tiene los suelos andisoles y los molisoles que representan los suelos más permeables, seguido de los suelos inceptisoles e entisoles que son suelos jóvenes en evolución y se empleó el método Saaty de ponderación (Figura 6).

Para la variable uso de suelo se realizó una clasificación de acuerdo a la conservación como el principal componente de jerarquía en la cuenca del río Carchi. Como se puede observar en la Figura 7 la mayor jerarquización tiene los suelos con uso de conservación y protección, mientras que los suelos con fines agrícolas y pecuarios tienen una jerarquización baja, ya que representan presiones para cuidado del medio.

Ponderación orden de suelo por Saaty

ORDEN DE SUELO	JERARQUIA	PONDERACION
ANDISOLES	10	0.3704
ENTISOLES	4	0.1481
INCEPTISOLES	5	0.1852
MOLISOLES	8	0.2963
		1

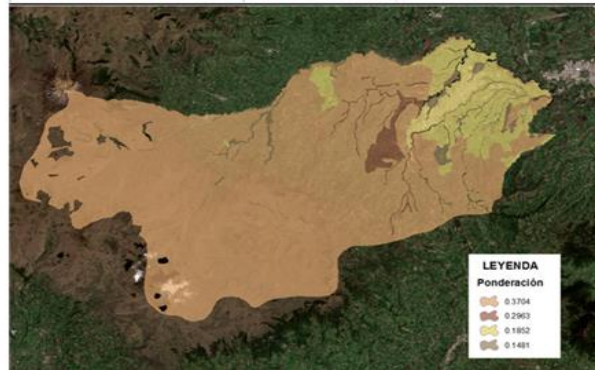


Figura 6. Orden de Suelo en la cuenca del Río Carchi

Ponderación usos de suelo por Saaty

USO DE SUELO	JERARQUIA	PONDERACION
AGRÍCOLA	5	0.1515
AGROPECUARIO MIXTO	3	0.0909
CONSERVACIÓN Y PRODUCCIÓN	7	0.2121
CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN	10	0.3030
PECUARIO	2	0.0606
PROTECCIÓN O PRODUCCIÓN	6	0.1818
		1

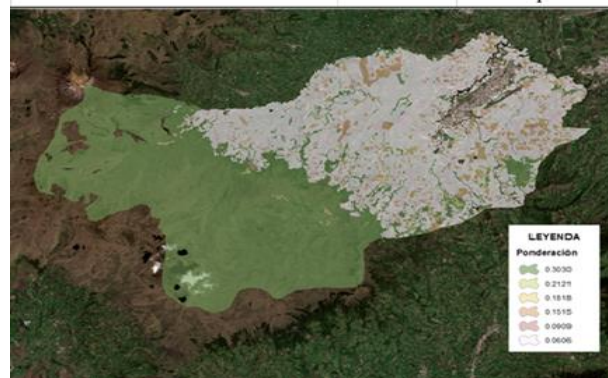


Figura 7. Ponderación Uso de Suelo

Modelos Generados

Para generar el modelo 1 se asignó el mismo peso a todas las variables, esto significa que, al promediar las 10 variables, cada una obtiene el 10% de importancia. Con la herramienta Raster Calculator utilizado en ArcGis se sumó las variables que se utilizaron y se dividió para el número total (Tabla 1), como se indica en la siguiente fórmula:

$$\text{Modelo1} = (\text{Zona urbana} + \text{puntos de captacion} + \text{concesiones} + \text{sistema vial} + \text{altura} + \text{sistema hidrico} + \text{cuerpos de agua} + \text{paramo} + \text{orden de suelo} + \text{uso de suelo})/10 \tag{19}$$

Tabla 1. Modelo 1 de variables de selección del área crítica

VARIABLES	JERARQUÍA	PONDERACIÓN
ALTURA	9	0.1216
PARAMO	10	0.1351
SISTEMA VIAL	4	0.0541
SISTEMA HIDRICO	9	0.1216
ZONA URBANA	4	0.0541
PUNTOS DE CAPTACION	9	0.1216
CUERPOS DE AGUA	8	0.1081
USO DE SUELO	7	0.0946
ORDEN DE SUELO	7	0.0946
CONCESIONES DE AGUA	7	0.0946

En la figura 8 se muestra el modelo 1 aplicado a la cuenca hidrográfica del Río Carchi.

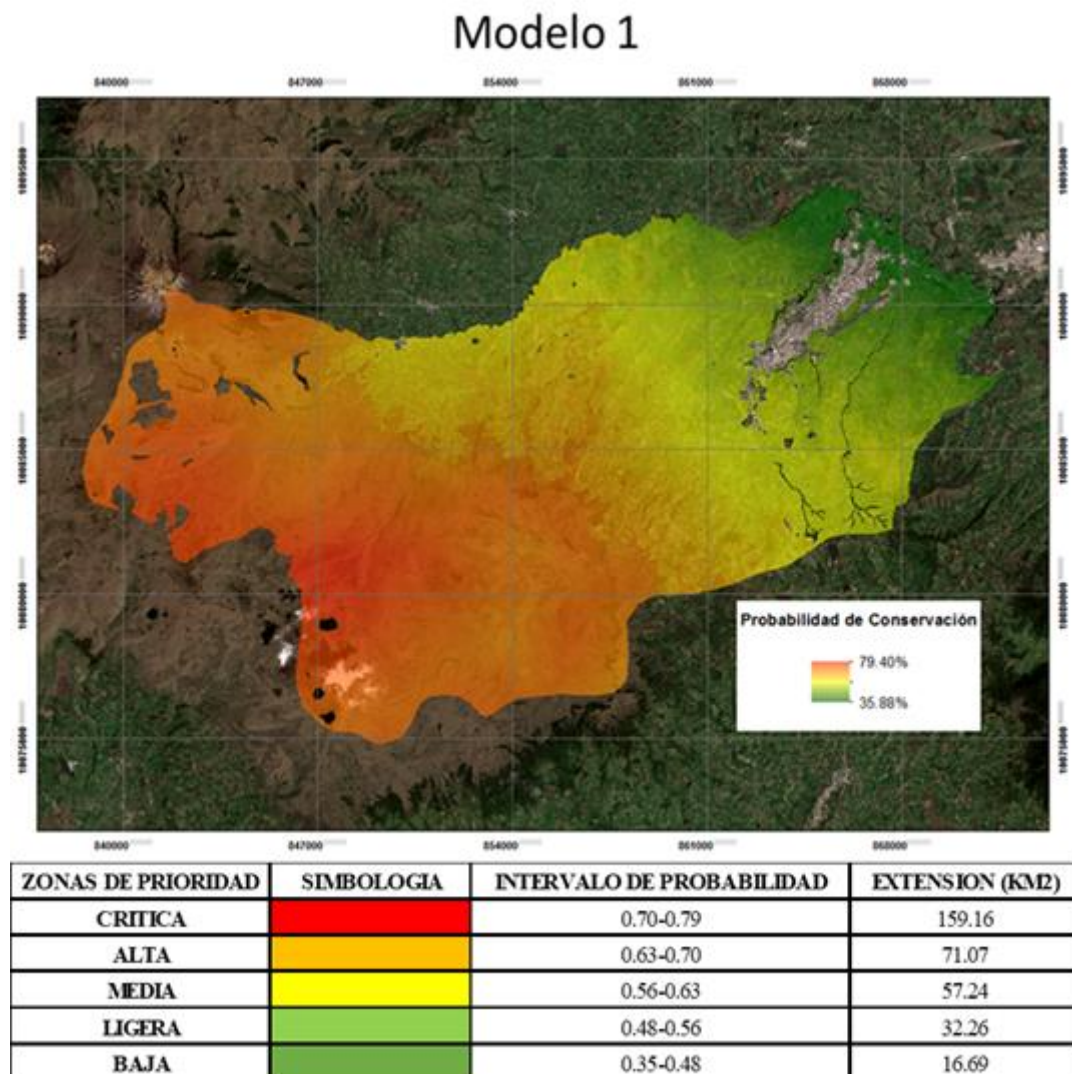


Figura 8. Modelo 1 en la cuenca del Río Carchi

De acuerdo al modelo 1 que corresponde al promedio de las variables, la probabilidad de conservación varía de 35.40% a 79.88%

Para generar el modelo 2 se utilizó el método de jerarquías de Saaty, para iniciar se dio valores del 1 al 10 a cada variable según el criterio del autor. En la siguiente tabla se muestra la ponderación dada.

Con la herramienta Raster Calculator se multiplicó cada variable por su ponderación, luego se sumó las variables alcanzando un valor del Coeficiente de Consistencia de 0 como se indica en la siguiente fórmula:

$$\text{Modelo 2} = 0.0541 * \text{Zona urbana} + 0.1216 * \text{puntos de captacion} + 0.0946 * \text{concesiones} + 0.0541 * \text{sistema vial} + 0.1216 * \text{altura} + 0.1216 * \text{sistema hidrico} + 0.1081 * \text{cuerpos de agua} + 0.1351 * \text{paramo} + 0.0946 * \text{orden de suelo} + 0.0946 * \text{uso de suelo} \quad (20)$$

En la figura 9 se muestra el modelo aplicado a la cuenca hidrográfica del Río Carchi.

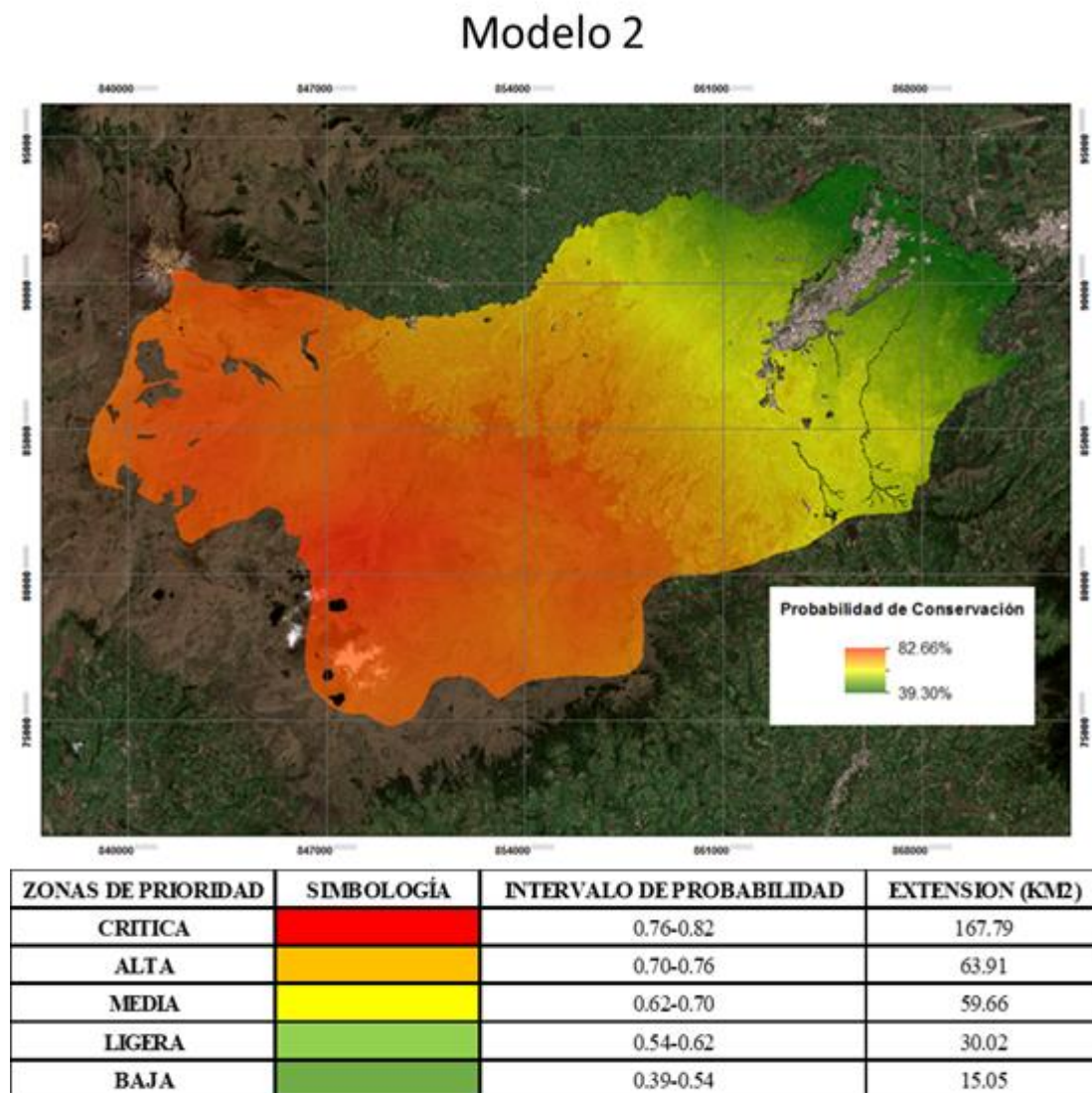


Figura 9. Modelo 2 en la cuenca hidrográfica del río Carchi.

En el modelo 2 del modelo desarrollado por la metodología de Satty la probabilidad de conservación varía de 39.30% a 82.66%.

Análisis Estadístico

Se realizó el análisis estadístico en los modelos con el fin de analizar y conocer el ajuste de acuerdo a las zonas propuestas.

Análisis-Modelo1

En el modelo 1 la V_{med} tomada en campo tiene el valor de 1 en la zona de interés crítico de conservación, y la V_{calc} en el modelo tiene el valor de 0.79. Al realizar el cálculo estadístico tenemos como resultado un valor de ajuste de: 0.041

Análisis- Modelo 2

En el modelo 2 la V_{med} tomada en campo tiene el valor de 1 en la zona de interés crítico de conservación, y la V_{calc} en el modelo tiene el valor de 0.82. Al realizar el cálculo estadístico tenemos como resultado un valor de ajuste de: 0.032

Zonas de conservación

Para la cuenca hidrográfica del río Carchi se establecen zonas de acuerdo a la prioridad e importancia para conservar en 5 categorías: crítica, alta, media, ligera y baja (Figura 10)

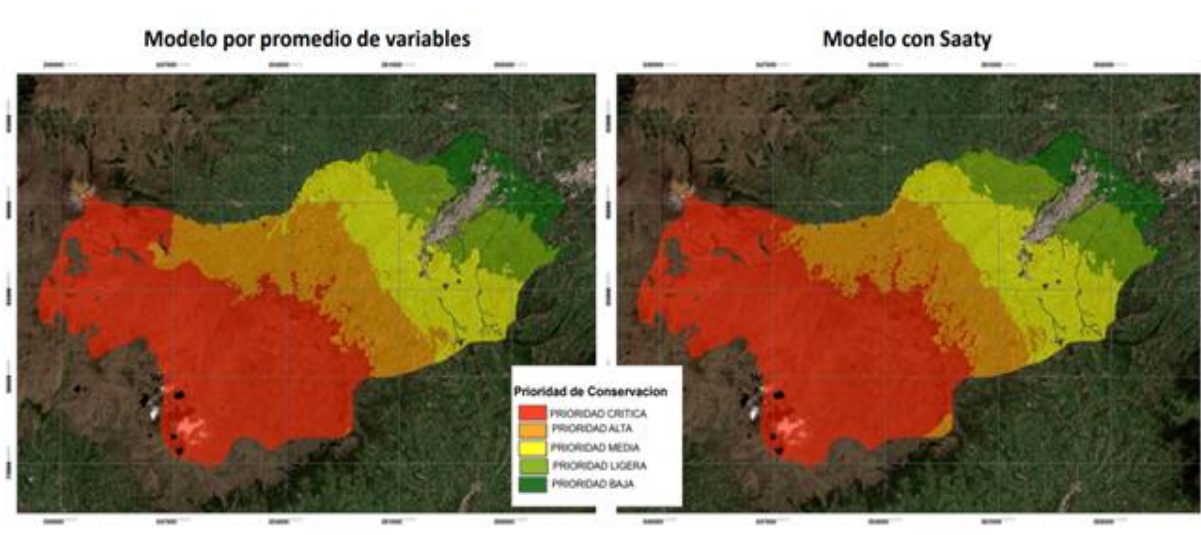







Figura 10. Modelos de la cuenca del río Carchi






Se obtuvo que en el modelo 1 (Tabla 2), la zona de prioridad crítica de conservación corresponde a 159.16km², la zona de prioridad alta corresponde a 71.01km², la zona de prioridad media son 57.24km², la zona de prioridad ligera 32.26km² y la zona de prioridad baja 16.69km².

Tabla 2. Resultados de Modelo 1

ZONAS DE PRIORIDAD	SIMBOLOGÍA	INTERVALO DE PROBABILIDAD	EXTENSIÓN (Km ²)
CRÍTICA		0.70-0.79	159.16
ALTA		0.63-0.70	71.07
MEDIA		0.56-0.63	57.24
LIGERA		0.48-0.56	32.26
BAJA		0.35-0.48	16.69

En el modelo 2 (Tabla 3), la zona de prioridad crítica de conservación corresponde a 167.79 km², la zona de prioridad alta corresponde a 63.91 km², la zona de prioridad media son 59.66 km², la zona de prioridad ligera 30.02 km² y la zona de prioridad baja 15.05 km².

Tabla 3. Resultados de Modelo 2

ZONAS DE PRIORIDAD	DE	SIMBOLOGÍA	INTERVALO DE PROBABILIDAD	DE	EXTENSIÓN (Km ²)
CRÍTICA			0.76-0.82		167.79
ALTA			0.70-0.76		63.91
MEDIA			0.62-0.70		59.66
LIGERA			0.54-0.62		30.02
BAJA			0.39-0.54		15.05

Áreas protegidas existentes

Se cruzaron los modelos generados con la capa de áreas protegidas con el objetivo de conocer el estado de conservación en cuanto al manejo y protección del medio ambiente en la cuenca hidrográfica del río Carchi (Figura 11).

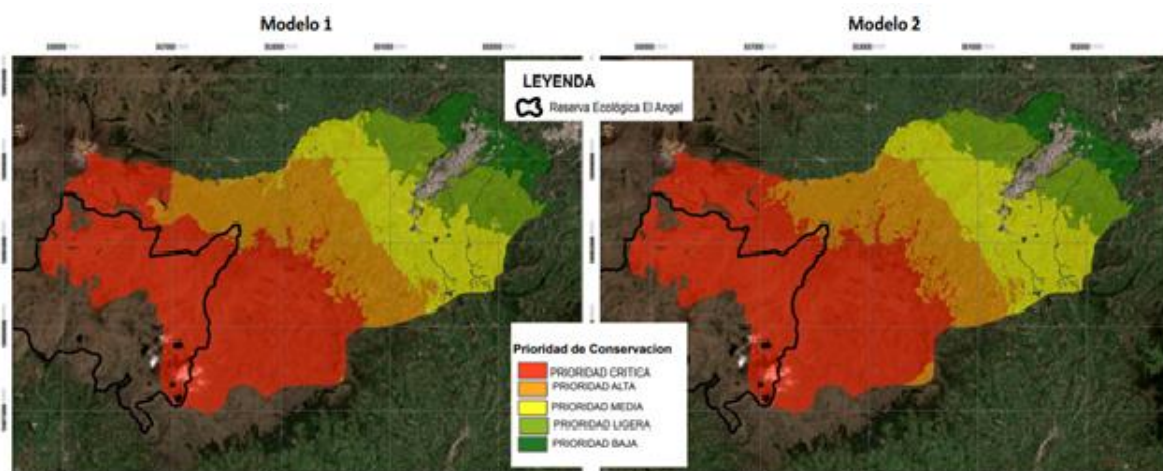


Figura 11. Áreas protegidas en la cuenca del río Carchi

En la cuenca hidrográfica del Río Carchi existe la Reserva Ecológica del Ángel dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) del Ministerio del Ambiente (Ver figura 23), el área que corresponde la reserva ecológica se traslapa en los dos modelos principalmente con la zona de prioridad crítica de conservación y en menor área con la zona de prioridad alta.

La Reserva Ecológica el Ángel tiene un área total de 15002,70 Ha; el área que ocupa en la zona de prioridad crítica es de 10650,00 Ha. El área que se propone para conservación es de 6109,5 Ha

Cobertura Vegetal

La agricultura es considerada como la actividad que provoca mayor impacto ambiental, por lo que es importante visualizar las zonas agrícolas en los modelos generados para conocer la presión de esta actividad en las áreas de conservación (Figura 12).

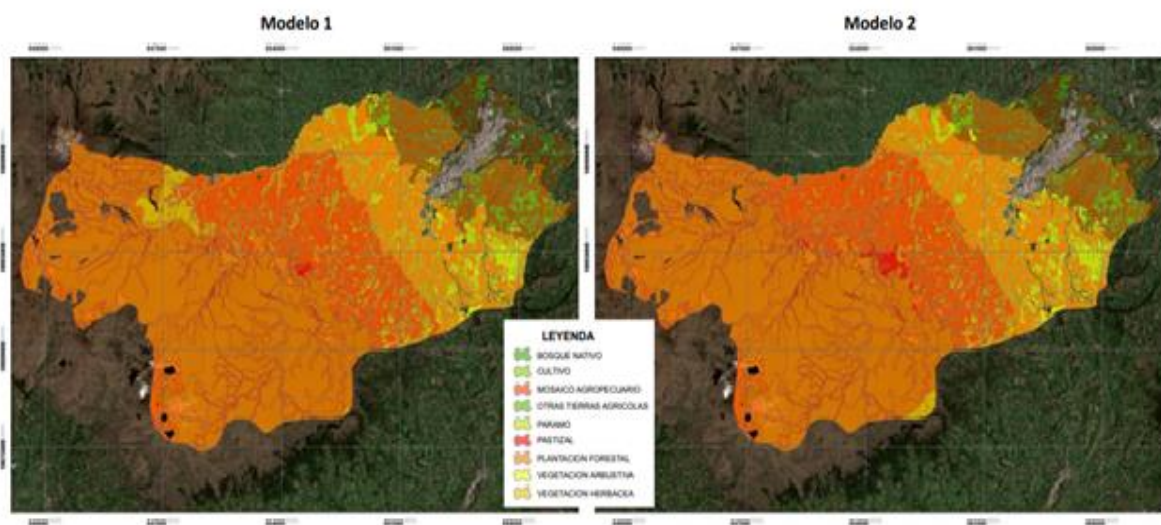


Figura 12. Cobertura vegetal en la cuenca hidrográfica del río Carchi

En relación a la cobertura vegetal se estableció que en la cuenca hidrográfica del río Carchi existe una gran cantidad de presiones que provienen de la actividad agrícola (Figura 24).

Con un enfoque más directo en las zonas de prioridad crítica y la zona de prioridad alta se analizó que en la zona de prioridad crítica, la cobertura principal es páramo con un porcentaje de: 88.56% seguido de vegetación arbustiva 8.8%.

En la zona de prioridad alta de conservación la principal cobertura es los pastizales con un porcentaje de 73.40% seguido de paramo con 7.58% y cultivos 7.50%.

Suelo con uso pecuario

La actividad ganadera figura como una de los sectores más perjudiciales para el recurso hídrico, y el daño a gran escala del suelo. Se traslaparon los modelos generados con el shape de uso pecuario para saber el estado y la presión de las zonas de conservación (Figura 13).

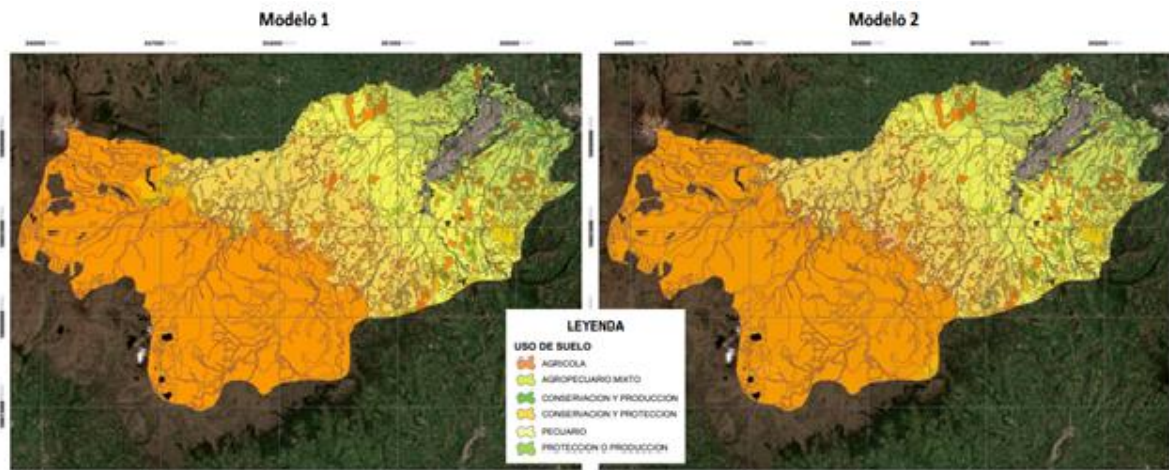


Figura 13. Uso de suelo en la cuenca hidrográfica del río Carchi

En la zona de prioridad crítica el 97.37% está destinado para la conservación seguido de valores mínimos: 1.58% destinado a uso pecuario y 1.05% destinado a agricultura. En la zona de prioridad alta el 73.40% tiene uso pecuario, el 16.72% está destinado para conservación y protección y el 7.61% uso agrícola (Ver figura 14).

Centros poblados

En la figura 14 se muestra el traslape de los modelos generados con los centros poblados existentes en la cuenca hidrográfica del río Carchi. Algunas de las poblaciones están dentro del área crítica de conservación estimada.

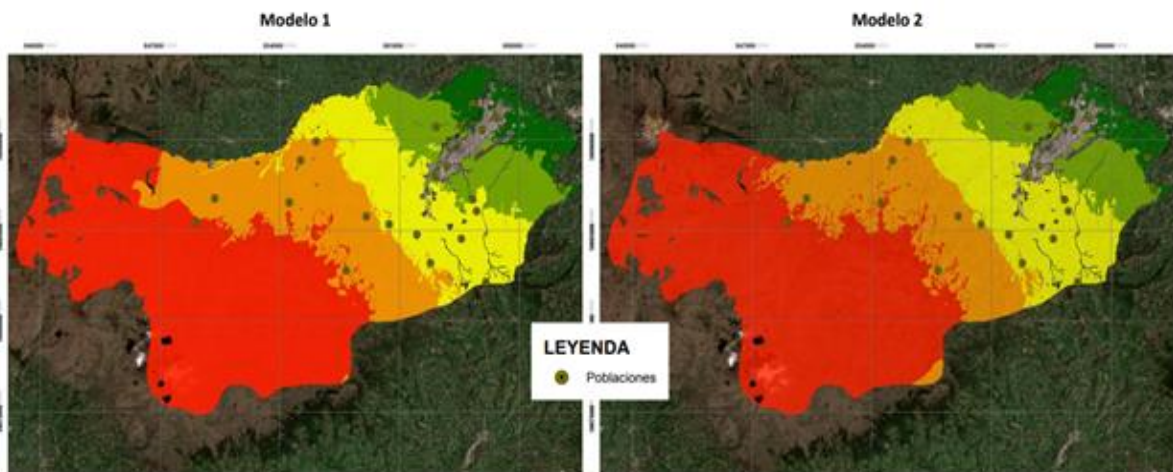


Figura 14. Poblaciones en la cuenca del río Carchi

Se determinó que el número de centros poblados que se encuentran en la zona de conservación crítica son 2 y en la zona de conservación alta son 4. Mientras que los otros centros poblados se encuentran en zonas de interés media, ligera y baja para conservación (Figura 14).

DISCUSIÓN

La metodología de Lógica Difusa permitió obtener zonas con diferentes probabilidades para su cuidado, a partir de distancias y criterios basados en aspectos ambientales y geográficos. Según el análisis estadístico el modelo que tuvo un mejor ajuste corresponde al modelo realizado con lógica difusa; fundamentando este resultado a la proximidad de los datos de acuerdo a las distancias, como también la jerarquización de acuerdo a la importancia que tienen las variables.

Las zonas que tienen la mayor probabilidad para ser conservadas son las ubicadas en zonas altas de la cuenca hidrográfica del río Carchi, cerca de la reserva ecológica El Ángel y cerca de cobertura vegetal de páramo, pues este ecosistema representa el hábitat de fauna y flora endémica, además este ecosistema provee servicios ambientales irremplazables.

Se recomienda que la información geográfica para el modelamiento se encuentre en el mismo sistema cartográfico de referencia para que no existan inconvenientes.

Para realizar la metodología de lógica difusa se recomienda tener criterios de expertos en el tema para un mejor manejo de la información.

Se recomienda que las entidades administrativas del cantón Tulcán, realicen estudios de acuerdo a las 6.000 ha propuestas, para posteriormente poder declararlas como bosques de protección o corredores cuyo fin sea la conservación y el cuidado del páramo, a su vez generen estrategias para cuidar y mantener la extensión de la cobertura vegetal.

Los pobladores de la comuna la esperanza de la parroquia de Tufiño debe planificar que no se realicen actividades de ganadería o pastoreo en las zonas de interés propuestas, ya que estas actividades afectan a la flora y fauna endémicas de este ecosistema.

REFERENCIAS

- Aguilar, H., y Álvarez, R. (2002). Valoración económica de bienes ambientales. *Semestre Económico*, 5 (9): 1-12.
- Arroyabe, M., Gómez, C., Gutiérrez, M. E., Múnera, D. P., Zapata, P. A., Vergara, I. C., Andrade, L. M., y Ramos, K. C. (2006): Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 5: 45-57.
- Basán Nickisch, M., Sánchez, L., Tosolini, R., Tejerina Díaz, F., y Jordan, P. (2018). Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano. *Aqua Lac*, 10 (1): 15-25. <https://doi.org/10.29104/PHI-2018-AQUALAC-V10-N1-02>.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortíz, E., Cárdenas, A., y Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA*. Quito.
- Biswas, A. K. and Tortajada, C. (2019). Water quality management: a globally neglected issue. *International Journal of Water Resources Development*, 35 (6): 913-916. DOI: 10.1080/07900627.2019.1670506.
- Bocco, M., Syago, S., y Tártara, E. (2002). Modelos multicriterio: una aplicación a la selección de alternativas productivas. *Agricultura técnica*, 62 (3): 450-462. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000300010>.
- Boelens, R. (2008). Water rights arenas in the Andes: Upscaling networks to strengthen local water control. *Water Alternatives* 1 (1): 48- 65
- Buytaert, W., Célleri, R., de Bièvre, D., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., and Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos, *Earth Science Reviews*, 79 (1-2): 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.
- Camacho, M. (2013). Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación. *Revista Anales*, 1 (372): 78-92.

- Campoblanco, H., y Gomero, J. (2000). La importancia de los ríos en el entorno ambiental. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas, Metalúrgica y Geográfica*, 3 (5): 57-63. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v3i5.2539>.
- Capriles, J. M., Santoro, C. M., y Dillehay, T. D. (2016). Harsh Environments and the Terminal Pleistocene Peopling of the Andean Highlands. *Current Anthropology*, 57 (1): 99-100. DOI: 10.1086/684694.
- Célleri, R., and Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29 (4): 350-355. <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.00007>.
- Conaf. (2013). Los humedales y la importancia de conservarlos. Fondo Conjunto de Cooperación Chile-México, Santiago, Chile.
- Corrales, S. M. (2015). Las concesiones de agua: una revisión con criterios de equidad y eficiencia. Tesis de maestría, Universidad del Valle, Colombia.
- CSIC. (2006). Cambio Global: impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Colección Divulgación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, España.
- Custodio, M., y Chávez E. (2019). Quality of the aquatic environment of high Andean rivers evaluated through environmental indicators: a case of the Cunas River, Peru. *Revista chilena de ingeniería*, 27 (3): 396-409.
- ESRI. (2016). Aplicar lógica difusa a rasters de superposición. ArcGis for Desktop, Redlands, California.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Tulcán. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Tulcán. Diagnostico Tulcán.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Carchi. 2016. Creación del Área de Conservación y Uso Sustentable de la Cordillera Oriental del Carchi. Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Carchi/CONDESAN-Proyecto EcoAndes. Tulcán.
- Guhl, E. (1982). El papel de la geografía en las ciencias humanas. *Revista Colombiana de Sociología*, 2 (1): 81-128.
- Hofstede, R. (2011)., Los Servicios del Páramo y la Evaluación de Ecosistemas del Milenio. En: P. Mena Vásquez, J. Campaña, A. Castillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso, G. Medina, N. Ochoa y D. Ortiz (Eds.). Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA. Quito. pp. 315-330.
- Isch, E. (2012). Agua: el gobierno incumple con la Constitución (Política Pública). *Revista de Análisis Político*, 13: pp. 88-91.
- Khatri, N. and Tyagi, S. (2015). Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science*, 8 (1) 23-39. <http://dx.doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>.
- Klimaszyk, P., and Goldyn, R. (2020). Water quality of freshwater ecosystems in a temperate climate. *Water*, 12: 2643. doi:10.3390/w12092643.
- León, P., Tapia, E., y Rodríguez, F. (2017). Valor económico del almacenamiento de carbono en los páramos de la reserva ecológica El Ángel. *Revista Geoespacial*, 14 (1): 65-82.
- Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos -Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 27(104): 319-341.
- Malagón D. y Pulido, C. (2000). Suelos del Páramo Colombiano. Colombia Diversidad Biótica III, La región de vida paramuna. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales.
- Malagon. D., Pulido, C., y Llinas, R. (1991). Génesis y taxonomía de los andisoles Colombianos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Science Journal*, 61 (13): 2295-2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>.
- Medina, G., Mena, P. y Josse, C. (Eds.). (1999). El Páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1. GTP/Abya Yala. Quito.

- Moreta, M., Castillo, L., y Benalcázar, W. (2018). 11 provincias del Ecuador se integran a favor del páramo. *El Comercio, Actualidad, Ecuador*. Compañía Anónima El Comercio, 10 de abril de 2018. Recuperado en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuadorprovincias-agua-paramo-humedales.html>.
- Padilla, O. (2006). Fundamento teórico para modelización de variables ambientales mediante operadores difusos. *Revista Geoespacial*, 4: 56-62.
- Pietersen, K. (2006): Multiple criteria decision analysis (MCDA) a tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa. *Water SA*, 32 (2): 119-128. DOI: 10.4314/wsa.v32i2.5242.
- Prakash, T. N. (2003). Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy multicriteria decision making. Institute for geo information science and earth observation, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- Quispe-Coica, A., Fernández, S., Acharte Lume, L., and Pérez-Foguet, A. (2020). Status of water quality for human consumption in high-Andean rural communities: Discrepancies between techniques for identifying trace metals. *Multidisciplinary Scientific Journal*, 3: 162-180. doi:10.3390/j3020014.
- Rivera, D., y Vargas, O. (1991). El páramo un ecosistema frágil. *Ciencia y Tecnología*, 5 (12): 143-166.
- Rodríguez-Espinosa, F., Galárraga, R., Salazar-Córdova, R., Narváez, N., y Ananganó, P. (2018). Beneficios económicos de la conservación de las áreas protegidas andinas. *Revista Geoespacial*, 15 (2): 112-126.
- Rodríguez, F., Southgate, D., and Haab, T. (2009a). Is better drinking water valued in the Latin American countryside? Some evidence from Cotacachi, Ecuador. *Water International*, 34: 325-334. doi/abs/10.1080/02508060903114665
- Rodríguez, F., Galárraga, R., Salazar, R., y Narváez, N. (2009b). Ecuador y los objetivos del Milenio: inversiones para la conservación del agua. *Letras Verdes*, #: 23-25.
- Ruiz, D. M., Martínez Idrobo, J. P., Otero Sarmiento, J. D., y Figueroa Casas, A. (2017). Effects of productive activities on water quality for human consumption in an Andean basin, a case study. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33 (3): 361-375. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.03.01.
- Squeo, F. A., Rada, F., Azocar, A., y Goldstein, G. (1991). Freezing tolerance and avoidance in high tropical Andean plants: Is it equally represented in species with different plant height? *Oecologia*, 86: 378-382.
- Tkach, R., & Simonovic, S. (1997). A New Approach to Multi-criteria Decision Making in Water Resources, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1 (1): 25-44.
- Vargas, O., Reyes, S., Gómez, P., y Díaz, J. (2010). Guías técnicas para la restauración ecológica de ecosistemas. Grupo de Restauración Ecológica. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 92 p.
- Vega, E., y Martínez, D. (2000). Productos económicamente sustentables y servicios ambientales del páramo. Serie Páramo 4.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., and Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resource Research*, 43: W07447. doi:10.1029/2006WR005653.