



Análisis jerárquico aplicado a la determinación de la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal

Hierarchical analysis applied to the determination of the environmental fragility of the Carrizal River sub-basin

Análise hierárquica aplicada à determinação da fragilidade ambiental da sub-bacia do rio Carrizal

Lenin Francisco Moreira-Franco ^I

leninmoreirafranco@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8099-7765>

Carlos Francisco Ortega-Ordóñez ^{II}

car_francisco@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6956-8209>

Correspondencia: leninmoreirafranco@gmail.com

Ciencias Naturales
Artículo de investigación

***Recibido:** 30 de enero de 2021 ***Aceptado:** 15 de febrero de 2021 * **Publicado:** 01 de marzo de 2021

- I. Estudiante de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.
- II. Ingeniero Geografo y del Medio Ambiente, Prevención en Riesgos Laborales, Magister en Gestion Ambiental, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

Resumen

La determinación de la fragilidad ambiental permite identificar la capacidad intrínseca que poseen los diferentes elementos de un medio biofísico ante factores degradantes y de su capacidad de regeneración. Este estudio tuvo la finalidad de determinar la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal, mediante el método de Proceso de Análisis jerárquico (AHP), el cual crea un modelo de jerarquía que permite tener una visión general en la toma de decisiones complejas, reduciéndolo a una simple comparación por pares, utilizando tres criterios cruciales como la pendiente, geopedología, y cobertura y uso de la tierra, considerando cinco clases de fragilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta. El uso de herramientas de geoprocementos mediante la superposición ponderada permite cruzar los criterios de análisis de manera imparcial, dando como resultado las áreas con un nivel de fragilidad muy alta donde los suelos del orden entisol son usados para cultivos anuales, pastizales y áreas urbanas, las cuales son vulnerables a procesos erosivos, inundaciones y deslizamientos, determinando que la fragilidad ambiental de la subcuenca es de clase media.

Palabras Claves: Proceso de Análisis Jerárquico; fragilidad ambiental; Sistemas de Información Geográfica (GIS); análisis multicriterio.

Abstract

Determining environmental fragility allows us to identify the intrinsic capacity of the different elements of a biophysical environment in the face of degrading factors and their regenerative capacity. The purpose of this study was to determine the environmental fragility of the Carrizal River sub-basin, using the Hierarchical Analysis Process (AHP) method, which creates a hierarchy model that allows a general vision in making complex decisions, reducing it to a simple pairwise comparison, using three crucial criteria such as slope, geopedology, and cover and land use, considering five classes of fragility: very low, low, medium, high and very high. The use of geoprocessing tools through weighted overlay allows crossing the analysis criteria in an impartial way, resulting in areas with a very high level of fragility where soils of the entisol order are used for annual crops, grasslands and urban areas, the which are vulnerable to erosive processes, floods and landslides, determining that the environmental fragility of the sub-basin is middle class.

Keywords: Hierarchical Analysis Process; environmental fragility; Geographic Information Systems (GIS); multicriteria analysis.

Resumo

A determinação da fragilidade ambiental permite identificar a capacidade intrínseca que os diferentes elementos de um ambiente biofísico têm perante os fatores degradantes e a sua capacidade de regeneração. O objetivo deste estudo foi determinar a fragilidade ambiental da sub-bacia do rio Carrizal, utilizando o método Hierarchical Analysis Process (AHP), que cria um modelo de hierarquia que permite uma visão geral na tomada de decisões complexas, reduzindo-o a um simples par a par. comparação, usando três critérios cruciais como declividade, geopedologia e cobertura e uso do solo, considerando cinco classes de fragilidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. A utilização de ferramentas de geoprocessamento através de sobreposição ponderada permite cruzar os critérios de análise de forma imparcial, resultando em áreas com alto grau de fragilidade onde são utilizados solos da ordem entisol para culturas anuais, pastagens e áreas urbanas, os quais são vulneráveis a processos erosivos, inundações e deslizamentos de terra, determinando que a fragilidade ambiental da sub-bacia seja de classe média.

Palavras-chave: Processo de Análise Hierárquica; fragilidade ambiental; Sistemas de Informação Geográfica (SIG); análise multicritério.

Introducción

Para la gestión ambiental de una unidad hidrográfica o de un territorio, se requiere de herramientas y metodologías que faciliten el análisis de los diferentes factores que determinan la calidad ambiental. Para ello se podría definir a la fragilidad ambiental como la capacidad intrínseca que poseen los diferentes elementos y condiciones de un medio físico a soportar cambios y alteraciones, basándose en su capacidad de asimilación y velocidad de regeneración. Según Ross (1994), el medio ambiente se analiza bajo el prisma de la Teoría de Sistemas, que asume que en la naturaleza los intercambios de energía y materia se procesan a través de relaciones en equilibrio dinámico. Este equilibrio, sin embargo, es frecuentemente alterado por intervenciones humanas, generando estados de desequilibrios temporales o incluso permanentes.

Dependiendo de las condiciones medioambientales que presente una sistema biofísico en afrontar los impactos ya sean de origen antropogénicos o naturales, se determina por la resiliencia, la cual, según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), se define como la capacidad de un sistema y sus componentes para absorber y recuperarse de los efectos de un evento (IPCC, 2001), y la resistencia la cual es la cantidad de cambio que puede soportar un sistema sin que cambie con ello su estado (IPCC, 2012).

En el Ecuador actualmente se vive una delicada situación en lo que respecta al manejo integrado de las cuencas hídricas, entre los que tenemos un alto nivel de deforestación debido al incremento de la frontera agrícola y ganadera, y al mal uso de las tierras cultivables (Analuisa et al., 2019).

Uno de los problemas que presenta la subcuenca del río Carrizal, producto de las actividades antrópicas, es que las zonas de bosque natural han disminuido un 14%, debido al aumento de la frontera agrícola y ganadera (Corral & Macías, 2015), donde la cobertura vegetal de alta estabilidad hidrológica es la arboricultura tropical y bosque intervenido, el pasto cultivado y vegetación arbustiva no favorece la retención hídrica, al contrario la escorrentía y erosión del suelo serán de mayor proporción, (Lucas, 2019). Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) la subcuenca presenta una morfología susceptible a inundaciones y deslizamientos; el 47.2% del área poseen un nivel entre alto y máximo de amenaza de sequía, un 19.5% del área están expuestos a inundaciones y el 6.6 % del área están bajo amenaza máxima de deslizamientos. Por tal situación la subcuenca Río Carrizal ha sido objeto de diversos estudios principalmente por el aprovechamiento hídrico en la generación de energía eléctrica en el abastecimiento de agua potable y riego, que generan cambios en la morfología de los afluentes de la subcuenca (PNUD, 2009).

La investigación tuvo como objetivo determinar la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal aplicando el análisis jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty (1980) el cual es un proceso de elección basado en la lógica de comparación por pares de diferentes factores que influyen en la toma de decisiones organizando y comparando jerárquicamente entre sí, y un valor de importancia relativa (peso) atribuyendo a la relación entre estos factores ya que la escala predefinida que expresa la intensidad con la que un factor predomina sobre otro, en relación con la toma de decisiones (Silva & Nunes, 2009).

Haciendo uso de herramientas de geoprocésamiento permite identificar el nivel de fragilidad ambiental mediante el análisis y mapeo de los criterios de cobertura vegetal, suelo y la pendiente del terreno.

Materiales y métodos

Unidad de análisis

La subcuenca del Río Carrizal, cuenta con un área de 1.359,35 km², ubicada al centro noreste de la provincia de Manabí, entre los cantones Bolívar, Chone, Junín, Pichincha, Rocafuerte, Sucre, Portoviejo y Tosagua, con las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) 17 sur Este: 607640; Norte: 9902754, la cual cuenta con una red hídrica aproximada de 668 km. Esta se encuentra en el subsistema hidrográfico Chone, limitada con las subcuencas al norte con Arenas Menores y Río Chone, al sur con Río Chico y Río Portoviejo, al este con Río Daule y al oeste con Estero Bachillero y Estero Pajonal. Tiene una temperatura entre 24-26 C⁰ con un clima tropical seco y precipitación anual de 106,05 mm. La subcuenca se encuentra a una altitud que va desde los 10 m.s.n.m. y 500 m.s.n.m, esta se caracteriza por las grandes planicies y tierras productivas utilizadas para cultivos agrícolas y pecuarias, es una de las más grandes de la provincia de Manabí, además de presentar una alta productividad tiene una gran importancia por servir de estabilizador a zonas de alta biodiversidad, el Río Carrizal nace en las zonas montañosas del cantón Bolívar. Dentro de la subcuenca encontramos la presa y embalse “La Esperanza” sobre el curso del Río Carrizal y Membrillo, que tiene el propósito de abastecer de agua para riego, consumo y generación de energía eléctrica.

Anexo 4: Mapa de ubicación geográfica de la Subcuenca del Río Carrizal



Elaboración: Propia.

Materiales

Para la elaboración e identificación del nivel de fragilidad ambiental en las subcuenca del Río Carrizal se requirió de información vectorial cartográfica temática de geopodología del Ecuador de escala 1:25.000 del año 2009-2015, obtenida del geoportall SIGTIERRAS (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica) desarrollado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, acuacultura y pesca (MAGAP), para el proceso de teledetección se hizo uso de imágenes (raster) obtenidas del satélite Landsat 8, sensor OLI TIRS, capturada el 15 de julio del 2019 y el modelo digital de elevación (DEM), ambos con resolución de 30 metros descargadas del geoportall Earth Explore del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las herramientas utilizadas para procesar la información son los programas ArcGIS 10.5 para el geoprocesamiento y cartografía de la información vectorial y raster, el programa de teledetección y análisis de imágenes ENVI 5.3 y el programa Microsoft Excel 2019 para desarrollar el modelo matemático por medio de matrices y formulas.

Método

Para determinar la fragilidad ambiental el estudio se basó en la metodología empírica de la fragilidad propuesta por Ross (1994), la cual se basa en el principio de que la naturaleza tiene una funcionalidad intrínseca entre sus componentes físicos y bióticos. Los procedimientos operativos para su construcción requieren, en un primer momento, estudios básicos de relieve, suelo, geología,

clima, uso del suelo y cobertura vegetal, generando un producto que expresa los diferentes grados de fragilidad que tiene el medio ambiente debido a sus características genéticas. En nuestro estudio usaremos como elementos la pendiente, la geopedología y la cobertura vegetal y uso de la tierra.

Proceso de jerarquía analítica (ahp)

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), presentado por Thomas Saaty (1980), es una herramienta eficaz para hacer frente a la toma de decisiones complejas, y puede ayudar al responsable de la toma de decisiones a establecer prioridades y tomar la mejor decisión. Al reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones por pares y luego sintetizar los resultados, el AHP ayuda a capturar aspectos subjetivos y objetivos de una decisión. Además, el AHP incorpora una técnica útil para comprobar la consistencia de las evaluaciones del responsable de la toma de decisiones, reduciendo así el sesgo en el proceso de toma de decisiones (Saaty T. L., 1980).

En su apéndice matemático, esta se presenta en cuatro axiomas:

Axioma 1: La condición recíproca es una relación local entre pares de elementos: $a_{ij} = 1/a_{ji}$, necesario para asegurarse de que, como perturbaciones de las relaciones, a_{ij} y a_{ji} se pueden aproximar por proporciones de una escala de relación que son a su vez recíprocas. Es una condición necesaria para la consistencia.

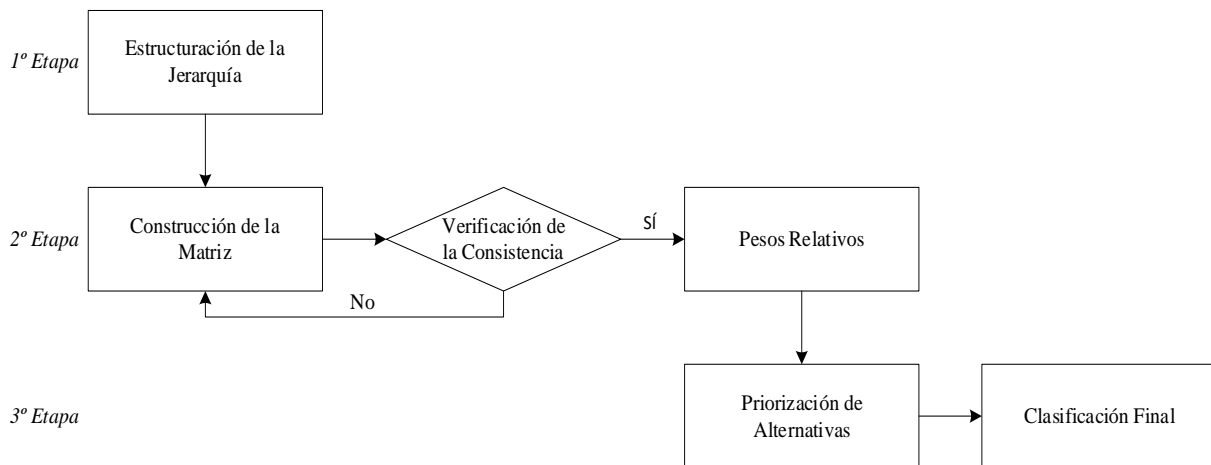
Axioma 2: La homogeneidad es también una condición local en cada a_{ij} . Para asegurar la coherencia en las comparaciones emparejadas, los elementos deben ser del mismo orden de magnitud, lo que significa que nuestras percepciones al compararlos, deben ser casi del mismo orden de magnitud.

Axioma 3: El Principio de Composición Jerárquica se relacionan con sistemas de reaprovechamiento. Aquí hay que caracterizar la dependencia entre los elementos, dando un criterio para este propósito.

Axioma 4: Las expectativas son creencias sobre el rango de alternativas derivadas del conocimiento previo, de un conjunto finito de alternativas, debe asegurar de que sus ideas estén adecuadamente representadas para que el resultado coincida con estas expectativas; es decir, todos los criterios están representados en la jerarquía (Saaty T. L., 2006).

Esquema del modelo AHP (Analytic Hierarchy Process)

Figura 1: Representación gráfica de las etapas de la aplicación del método AHP

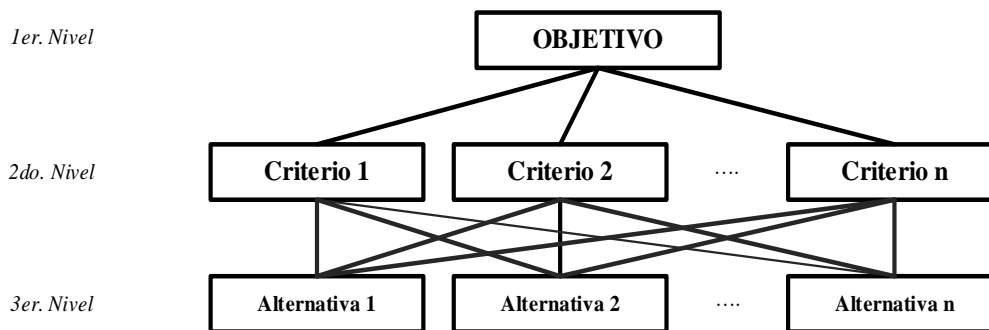


Fuente: (Silva & Nunes, 2009)

Estructura de jerarquía de decisiones

Una jerarquía es una representación de un problema complejo en una estructura multinivel cuyo primer nivel es el objetivo seguido sucesivamente por niveles de factores, criterios, subcriterios, hasta un nivel inferior de alternativas. Una jerarquía también es una manera conveniente de descomponer un problema complejo en busca de explicaciones de causa-efecto en pasos que forman una cadena lineal, (Saaty T. L., 1994).

Figura 2: Modelo de la estructura Jerárquica



Fuente: Adaptado de Carvalho & Mingoti (2005)

Juicio y comparaciones

Un juicio o comparación es la representación numérica de una relación entre dos elementos que comparten un pariente en común. El conjunto de todos esos juicios se puede representar en una

matriz cuadrada en la cual el conjunto de elementos se compara con sí mismo. Cada juicio representa la dominancia de un elemento de la columna de la izquierda sobre un elemento de la fila de arriba, usando la escala 1-9 de la (Tabla 1). Si el elemento de la izquierda es menos importante que el elemento de la parte superior de la matriz, entramos el valor recíproco en la posición correspondiente de la matriz (Saaty T. L., 1998).

Tabla 1: Escala fundamental de evaluación o juicios.

Intensidad de Importancia		Definición	Explicación
Escala numérica	Reciprocidad		
1	1/1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo.
3	1/3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	1/5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	1/7	Importancia muy fuerte o demostrada	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad.
9	1/9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es el orden más alto de afirmación.

Fuente: (Saaty T. L., 2008)

Para calcular las ponderaciones para los diferentes criterios, el AHP comienza a crear una matriz de comparación por pares. La matriz A es una matriz real $n \times n$, donde n es el número de criterios de evaluación considerados. Cada entrada a_{ij} de la matriz A representa la importancia del criterio i en relación con el criterio j. Si $a_{ij} > 1$, entonces el criterio i es más importante que el criterio j, mientras que si $a_{ij} < 1$, entonces el criterio i es menos importante que el criterio j. Si dos criterios tienen la misma importancia, entonces la entrada a_{ij} es 1, (Saaty T. L., 1980).

Formula 1: Matriz recíproca de juicios

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{i1} & 1/a_{2i} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

La anterior matriz satisface la propiedad recíproca de $a_{ij} = 1/a_{ji}$, donde a_{ij} son valores reales positivos, i es el índice que representa la fila y j la columna. Estas características hacen que la matriz se desafíe como positiva recíproca. Se percibe que la diagonal de la matriz es todo unitario, después de todo cada atributo en comparación con sí mismo es igual a la unidad (Saaty T. L., 1990). De acuerdo con la Metodología de Saaty (1990), los valores de a_{ij} son calculados dividiendo W_m/W_n por las sumatorias de la columna en cuestión:

Formula 2: Construcción y sumatoria de la matriz de comparación pareada

$$A_w = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ \frac{1}{W_2/W_1} & W_2/W_2 & \vdots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{W_m/W_1} & \frac{1}{W_m/W_2} & \dots & W_m/W_n \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = \frac{\sum W_m/W_1}{\sum W_m/W_1} \quad a_{12} = \frac{\sum W_m/W_2}{\sum W_m/W_1} \quad \dots \quad a_{1n} = \frac{\sum W_m/W_n}{\sum W_m/W_1}$$

Dónde:

W_m = Peso referido a la línea.

W_n = Peso que hace referencia a la columna.

Posteriormente, estos valores se normalizan, donde la suma de cada fila de la matriz encontrada (A_w) se divide por el orden de la matriz n , encontrando así el valor del peso procesado P_n de cada factor de ponderación (Fórmula 3). La suma de estos resultados debe ser 1,0.

Formula 3: Procesamiento de pesos

$$\sum a_{1n}/n = P_1$$

$$\sum a_{2n}/n = P_2$$

⋮ ⋮

$$\sum a_{mn}/n = P_n$$

Comprobación de la consistencia

Cuando se realizan muchas comparaciones por pares, por lo general pueden surgir algunas incoherencias. El AHP incorpora una técnica eficaz para comprobar la consistencia de las evaluaciones (Saaty T. L., 1980). El cálculo del λ_{max} indica el valor máximo del valor propio, y se obtiene mediante la (Fórmula 5):

Formula 4: Calculo del λ_{max}

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{w_i}$$

Donde:

[Aw] es la matriz resultante del producto de comparación emparejado por la matriz de los pesos a procesar (w_i).

El índice de consistencia (CI) se obtiene calculando anteriormente la λ_{max} escalar como el promedio de los elementos del vector cuyo elemento i es la relación del elemento j del vector Aw al elemento correspondiente del vector W y n es el número de criterios o alternativas de la matriz de comparación pareada (Formula 5).

Formula 5: Cálculo del índice de consistencia

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

El cálculo de la relación de consistencia (CR) se obtiene por la (Fórmula 6). Una toma de decisiones perfectamente coherente siempre debe obtener CR=0, pero se pueden tolerar pequeños valores de incoherencia (Saaty T. L., 1980).

Formula 6: Calculo de la relación de consistencia

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,10$$

Cuando la consistencia ha sido calculada, el resultado se compara con aquellos del mismo índice de una matriz recíproca aleatoria de una escala desde 1 hasta 9, con recíprocos forzados. Este índice se llama índice aleatorio (R.I). La siguiente (Tabla 2) da el orden de la matriz (primera fila) y el valor promedio del R.I (segunda fila):

Tabla 2: Valores del índice aleatorio para matrices cuadradas

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Índice aleatorio de consistencia</i>	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

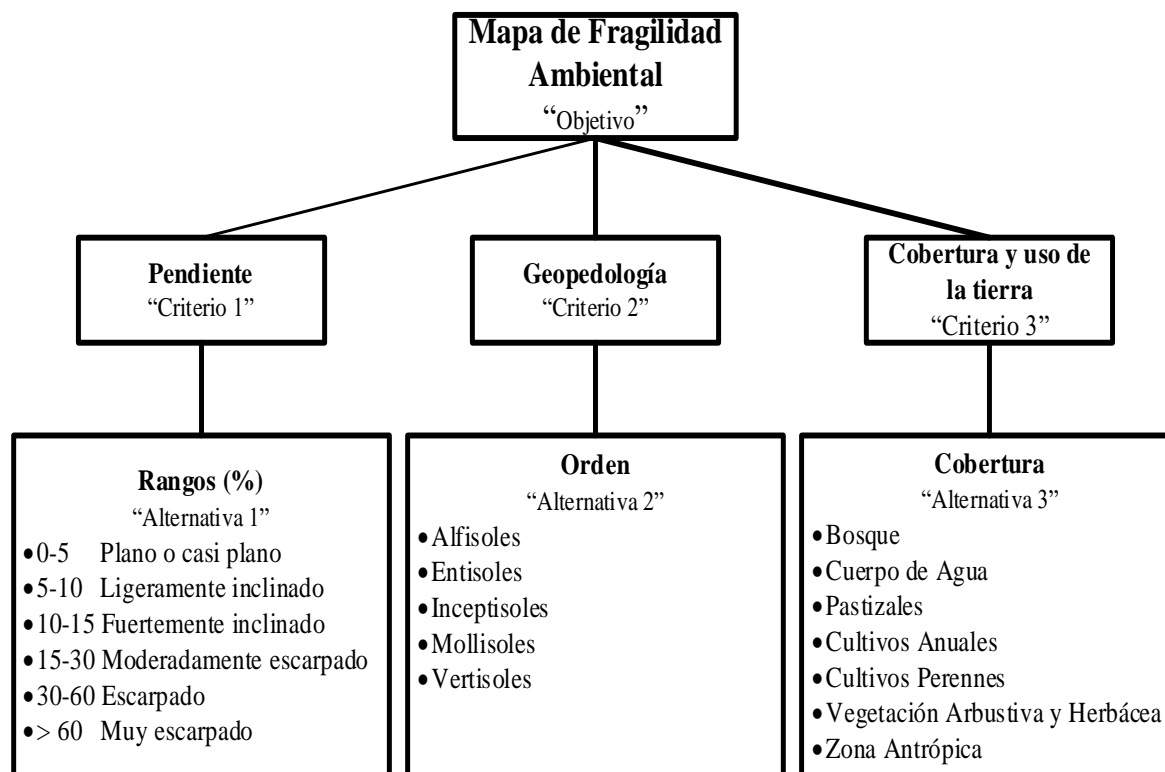
Fuente: (Saaty T. L., 1980)

La relación de C.I con el promedio R.I para la misma matriz de orden se llama relación de consistencia (C.R). Una relación de consistencia de 0,10 o menos es evidencia positiva para un juicio informado (Saaty T. L., 1980).

Resultados

Para obtener la fragilidad ambiental, fue necesario el desarrollo y definición de tres criterios, tales como: pendiente, geopedología y cobertura vegetal y uso de la tierra, para lo cual se estructuró el árbol de jerarquía el cual se define su influencia mutua entre otros grupos o criterios. En el primer nivel, es el objetivo principal el cual se define la fragilidad ambiental, en el segundo nivel los criterios que determinan las clases de fragilidad en la subcuenca y en el tercer nivel las alternativas o características de cada criterio, estructurando el siguiendo el modelo jerárquico (Figura 3):

Figura 3: Estructura jerárquica de los criterios y alternativas



Elaboración: Propia.

Una vez que definidos los criterios y alternativas en el árbol jerárquico, se realizan las comparaciones pareadas utilizando los valores de la escala fundamental de evaluación de la tabla 1, la cual tiene la finalidad de determinar la importancia relativa en cada criterio y alternativas entre sí mismos donde los juicios dados a la pendiente se evalúan en función de la estabilidad e inestabilidad del tipo de relieve, a la geopedología que se evalúa en función del nivel susceptibilidad a la erosión, y la cobertura y uso de la tierra se analiza en función de la capacidad de regeneración y protección hacia el suelo (Bolaños, 2014).

Tabla 3: Matriz de comparaciones pareadas de criterios

Criterios	Cobertura y uso de la tierra	Geopedología	Pendiente
Cobertura y uso de la tierra	1	3	5
Geopedología	1/3	1	3
Pendiente	1/5	1/3	1

Elaboración: Propia.

Los juicios dados entre la comparación pareada en la tabla 3, indican que la cobertura y uso de la tierra tiene un valor de 3 que indica una importancia moderada en relación con la geopedología y su valor recíproco de 1/3, entre la cobertura y uso de la tierra tiene un valor de 5 que indica una importancia fuerte entre la pendiente con un valor recíproco de 1/5 y la geopedología tiene un valor de 3 que indica una importancia moderada en relación a la pendiente y con una reciprocidad 1/3, el valor 1 indica igual importancia entre criterio.

Criterio pendiente

La pendiente determina el grado de inclinación del terreno e indica respectivamente el potencial de ocurrencia de procesos erosivos, los riesgos a deslizamiento y suministro de sedimentos por lo que a mayor inclinación mayor fragilidad (Kawakubo et al, 2005). Para desarrollar la matriz de comparación pareada es necesario describir el tipo de rangos y geomorfologías (ver anexo 1) de pendiente que son menos susceptible a procesos degradantes.

Tabla 4: Matriz de comparaciones pareadas de las alternativas del criterio pendiente

Rangos	0-5%	5-10%	10-15%	15-30%	30-60%	>60%
Plano o casi plano (0-5%)	1	3	3	5	7	9
Ligeramente inclinado (5-10%)	1/3	1	3	5	5	7
Fuertemente inclinado (10-15%)	1/3	1/3	1	3	5	7
Moderadamente escarpado (15-30%)	1/5	1/5	1/3	1	3	5
Escarpado (30-60%)	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3
Muy escarpado (> 60%)	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1

Elaboración: Propia.

El rango de pendiente plano o casi plano tiene una importancia moderada de 3 en relación a al rango de ligeramente inclinado y su reciprocidad 1/3, Fuertemente inclinado tiene una importancia muy fuerte de 7 en comparación a muy escarpado, con una reciprocidad de 1/7 y plano o casi plano tiene una extrema importancia de 9 en relación a muy escarpado, con una reciprocidad de 1/9.

Criterio geopedología

La Geopedología corresponde a la integración entre geomorfología y pedología como sustrato, que soporta ecosistemas terrestres y que hace parte del ambiente (Castro & Agualimpia, 2017). La fragilidad o erosionabilidad del suelo corresponde a la vulnerabilidad del suelo a la erosión (Kawakubo et al, 2005). Para ejecutar la evaluación en la matriz de comparación pareada y obtener su importancia fue necesario definir las alternativas del orden de los suelos por medio de metadatos del mapa de geopedología escala 1:25.000 y memoria del orden de los suelos (ver anexo 2).

Tabla 5: Matriz de comparaciones pareadas de las alternativas del criterio de geopedología

Orden	Alfisoles	Entisoles	Inceptisoles	Molisoles	Vertisoles
Alfisoles	1	3	3	1/7	3
Entisoles	1/3	1	1/3	1/9	1/7
Inceptisoles	1/3	3	1	1/5	1/3
Molisoles	1/7	9	5	1	5
Vertisoles	1/3	7	3	1/5	1

Elaboración: Propia.

Los suelos del orden alfisoles tiene una importancia moderada de 3 en comparación con los suelos entisoles con su reciprocidad de 1/3, los inceptisoles tiene una importancia moderada de 3 en relación a los suelos entisoles con una reciprocidad de 1/3 y los suelos molisoles tienen una importancia fuerte de 5 en comparación con los suelos vertisoles con su reciprocidad de 1/5.

Criterio cobertura y uso de la tierra

La vegetación juega un papel primordial en la protección del suelo contra la erosión, por lo que distintas coberturas vegetales proveen distintos grados de protección de tal manera que pueda controlar en gran parte la erosión. Los suelos bajo vegetación permanente como bosque natural y cultivos perennes son menos susceptibles a la erosión que los suelos bajo cultivos anuales (Fernández, 1995). El mapa de cobertura y uso de la tierra se realizó a partir de fotointerpretación de imágenes obtenidas del satélite Landsat 8 identificando las coberturas que existen dentro de la subcuenca (ver anexo 3), las cuales fueron de análisis en la matriz de comparación pareada.

Tabla 6: Matriz de comparaciones pareadas de las alternativas del criterio de cobertura vegetal y uso de la tierra

Coberturas	BS	VA	PZ	CA	CP	CAG	AA
Bosque (BS)	1	5	5	7	3	5	9
Vegetación Arbustiva y Herbácea (VA)	1/5	1	1/3	5	1/7	5	5
Pastizales (PZ)	1/5	3	1	5	1/5	5	5
Cultivos Anuales (CA)	1/7	1/5	1/5	1	1/7	1/3	3
Cultivos Perennes (CP)	1/3	1/7	5	7	1	5	7
Cuerpos de Agua (CAG)	1/5	1/5	1/5	3	1/5	1	3
Áreas Antrópica (AA)	1/9	1/5	1/5	1/3	1/7	1/3	1

Elaboración: Propia.

El bosque tiene una importancia muy fuerte de 7 en comparación con cultivos anuales con una reciprocidad de 1/7, los cultivos perennes tienen una importancia fuerte de 5 en relación a los cuerpos de agua con reciprocidad de 1/5 y pastizales con una importancia moderada de 3 en comparación con la vegetación arbustiva y herbácea con una reciprocidad de 1/3.

A partir de la matriz de comparación pareada de los criterios y factores, se normalizo la matriz para obtener sus pesos los cuales muestran la importancia e influencia en la fragilidad ambiental, estos pesos necesitan ser verificados tanto de los criterios del segundo nivel y las alternativas del tercer nivel jerárquico si sus matrices son consistentes, para ellos es necesario obtener el λ_{max} que indica el valor máximo, índice de consistencia (CI) y calcular la relación de consistencia (CR), valor resultante que debe ser menor o igual a 0,1. La relación de consistencia muestra la coherencia que existe entre los criterios.

Tabla 7: Resumen de pesos procesados y consistencia de los criterios

Criterios de Análisis	Pesos Procesados		Consistencia
	Peso	Porcentajes	
Pendiente	0,1062	11%	$\lambda_{max}= 3,0387$
Geopedología	0,2605	26%	$CI= 0,0194$
Cobertura vegetal y uso de la tierra	0,6333	63%	$CR= 0,0372$

Elaboración: Propia.

Los pesos obtenidos presentados en la tabla 7, muestra al criterio de cobertura vegetal y uso de la tierra con un peso ponderante del 63% que tiene mayor importancia en brindar estabilidad y protección a la subcuenca, a diferencia del criterio de geopedología con un peso del 26% que se considera el nivel de resistencia de este factor es dependiente del tipo de protección que le brinde la cobertura vegetal y la geomorfología del terreno, el criterio de pendiente con una ponderación menor con el 11% porque dependiendo de los otros factores tanto de vegetación o tipo de suelo se ve reflejado en su nivel de incidencia en la fragilidad.

Tabla 8: Resumen de pesos procesados y consistencia de las alternativas de cada criterio

Criterios de Análisis	Alternativas	Pesos Procesados		Consistencia
		Pesos	Porcentaje	
Rangos de pendientes en porcentajes				
Pendiente	0-5 %	0,4052	41%	$\lambda_{max}=6,4557$ $CI= 0,0911$ $CR= 0,0729$
	5-10 %	0,2584	26%	
	10-15 %	0,1692	17%	
	15-30 %	0,0907	9%	
	30-60 %	0,0497	5%	
	> 60 %	0,0268	3%	
Orden de suelos				
Geopedología	Alfisoles	0,2487	25%	$\lambda_{max}=5,2916$ $CI= 0,0729$ $CR= 0,0657$
	Entisoles	0,0617	6%	
	Inceptisoles	0,1046	10%	
	Molisoles	0,3991	40%	
	Vertisoles	0,1859	19%	
Tipos de cobertura				
Cobertura vegetal y uso de la tierra	Bosque	0,3945	39%	$\lambda_{max}=7,7589$ $CI= 0,1265$ $CR= 0,0937$
	Cuerpos de Agua	0,0590	6%	
	Cultivos Perennes	0,2119	21%	
	Cultivos Anuales	0,0391	4%	
	Pastizales	0,1548	15%	
	Vegetación Arbustiva y Herbácea	0,1158	12%	
	Áreas Antrópicas	0,0250	5%	

Elaboración: Propia.

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos donde se distinguen las consistencias de las ponderaciones, los de mayor valor son aquellos que son beneficiosos o tienen mejor resistencia

ante factores degradantes. Las alternativas del criterio de pendiente que obtuvieron mayor valor ponderante es el rango de 0-5% con el 41% y en menor valor el rango >60% con 3% de ponderación. En la geopedología las alternativas del orden de los suelos que tiene mayor importancia son los molisoles con un peso del 40% y el entisol con una importancia menor del 6%. Los tipos de cobertura vegetal y uso de la tierra que mayor importancia tiene son los bosques con un peso de un 39% y las áreas antrópicas con una importancia menor del 5%.

Una vez se obtuvieron los pesos, se reclasificaron las alterativas de cada criterio mediante una escala de nivel de fragilidad ambiental donde muy bajo representa la ponderación más alta y muy alto la ponderación de menor importancia, con la finalidad de darle homogeneidad a los criterios, para poder reclasificar las alternativas de cada criterio es necesario convertir la información de tipo vector a raster por medio de las herramientas de conversión del programa ArcGIS 10.5.

Tabla 9: Nivel de fragilidad de las alternativas de cada criterio

Crterios de Análisis	Alternativas	Nivel de Fragilidad	Área %
Rangos de pendientes en porcentajes			
Pendiente	0-5 %	Muy Bajo	25,32
	5-10 %	Muy Bajo	11,38
	10-15 %	Bajo	12,71
	15-30 %	Medio	24,98
	30-60 %	Alto	21,80
	> 60 %	Muy Alto	3,81
Orden de suelos			
Geopedología	Alfisoles	Bajo	2,13
	Entisoles	Muy Alto	3,84
	Inceptisoles	Alto	66,76
	Molisoles	Muy Bajo	20,74
	Vertisoles	Medio	3,90
Tipos de cobertura			
Cobertura vegetal y uso de la tierra	Bosque	Muy Bajo	27,22
	Cuerpos de Agua	Alto	1,87
	Cultivos Perennes	Bajo	12,86
	Cultivos Anuales	Muy Alto	20,17
	Pastizales	Medio	28,51
	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Medio	7,13
	Áreas Antrópicas	Muy Alto	2,24

Elaboración: Propia.

Siguiendo los resultados de la tabla 9, encontramos que el relieve predominante de la subcuenca es de pendientes de 0-5% de clase plano o casi plano ocupando el 25,32% del área con una fragilidad muy baja, el 24,98% del área es ocupada por pendientes de 15-30% de tipo moderadamente escarpado de una fragilidad media, el 21,80% del área con una pendiente escarpada entre 30-60%, con una fragilidad alta y en menor influencia pendientes muy escarpadas >60% con una fragilidad muy alta.

La geopedología predominante son los suelos del orden Inceptisoles representan el 66,76% del área la cual tiene una fragilidad alta, los molisoles representan el 20,74% con una fragilidad muy baja y los entisoles representan el 3,84% de la subcuenca, los molisoles al ser suelo mejor desarrollados favorecen el desarrollo radicular y principalmente se forman bajo coberturas de bosques a diferencia de los demás suelos que tienen poco desarrollo edafogénicos y están bajo coberturas de matorrales o vegetación de herbáceas.

La protección hidrológica de la vegetación de la subcuenca hidrográfica del río Carrizal corresponde a una importancia media, las coberturas con importancia hídrica moderadamente mala son cultivos de ciclo corto, vegetación arbustiva y pasto cultivado, la arboricultura tropical y Bosque Intervenido con una protección hidrológica buena al aportar al ciclo hidrológico por retención, almacenamiento y regulación (Lucas, 2019). Las coberturas vegetales y uso de la tierra con fragilidad muy alta son las áreas urbanas con un área 2,24% y los cultivos anuales con un área de 20,17%, la cobertura de bosques tiene una fragilidad muy baja con un área de 27,22%.

Por medio del geoprocésamiento realizado en el programa ArcGIS 10.5, se utilizó la herramienta Overlay “Weighted Overlay”, el cual toma los tres criterios de análisis en formato raster se superponen asignándoles los pesos de cada uno, por lo que se identifican las áreas de mayor o menor fragilidad dependiendo de las características que se evaluaron de cada alternativa entre criterios, para poder calcular las áreas de influencia es necesario utilizar las herramientas de conversión de raster a vector, calculando el área en hectáreas y en porcentajes, (Tabla 10).

Tabla 10: Porcentajes del nivel de fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal

Nivel de fragilidad ambiental	Áreas en Hectáreas	Áreas en Porcentajes
Muy Baja	13352,13	9,83%
Baja	38171,7	28,10%
Media	52021,89	38,29%

Análisis jerárquico aplicado a la determinación de la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal

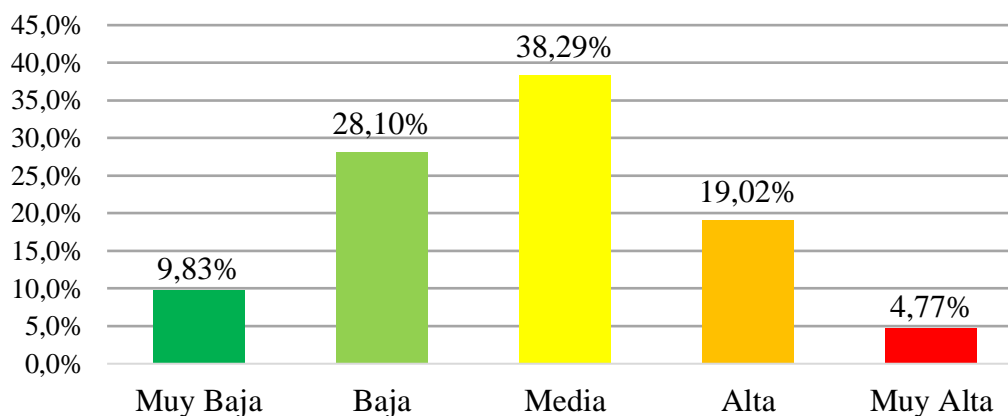
Alta	25838,37	19,02%
Muy Alta	6477,39	4,77%

Fuente: ArcGis 10.5.

Elaboración: Propia.

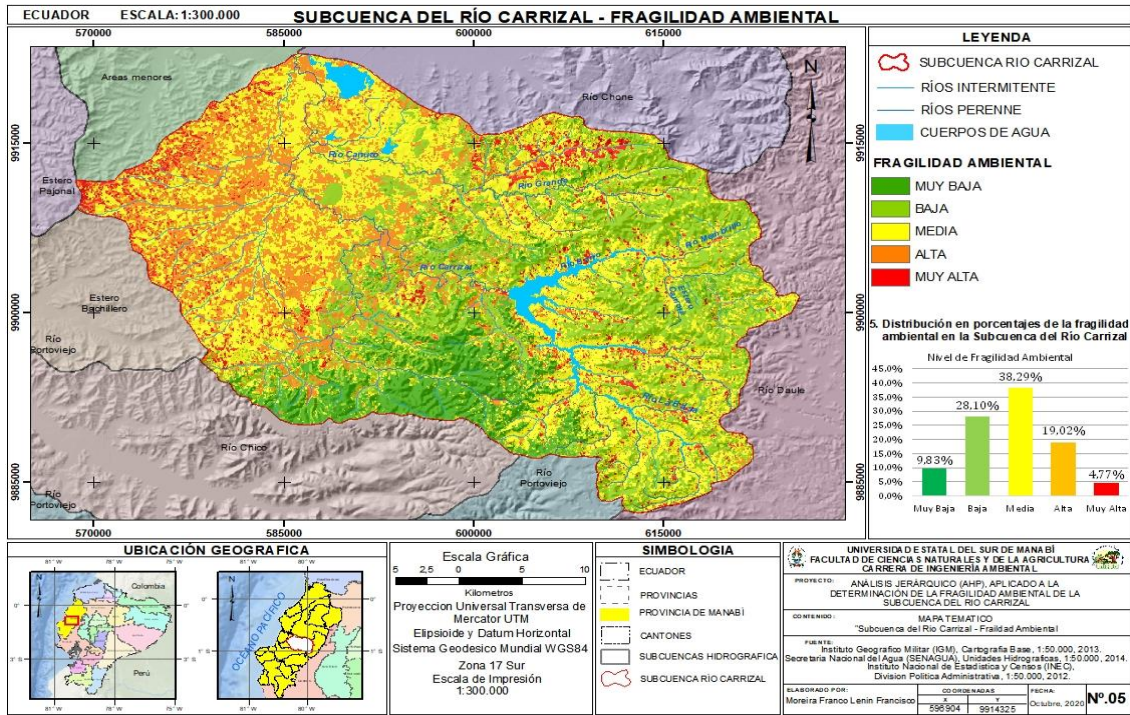
Como resultado se obtuvo el mapa de fragilidad ambiental, en el cual se puede observar la distribución espacial de la fragilidad predominante, donde las zonas de nivel muy bajas corresponden a un área del 9,83% distribuidas en zonas de cobertura boscosas además de estar en pendientes escarpadas, la fragilidad baja con un área de 28,10% en zonas con pendientes escarpadas y con una cobertura boscosa, la fragilidad media es la más predominante con un 38,29% del área, la cual se distribuye en zonas de poca pendiente y cerca de los efluentes hídricos de la zona baja y media de la cuenca, la fragilidad de nivel alta tiene un área de 19,02% distribuida en zonas con presencia de cultivos anuales, con pendientes ligeramente inclinadas, las zonas con una fragilidad muy alta comprenden un área del 4,77% debido a que al estar en áreas con pendientes poco pronunciadas destinadas a cultivos de ciclo corto.

Gráfico 1: Nivel de fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal



Elaboración: Propia.

Anexo 8: Mapa de fragilidad ambiental de la subcuenca Río Carrizal



Elaboración: Propia.

Discusiones

Mediante la aplicación del método de análisis jerárquico de Thomas Saaty, propuesta para la determinación de la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal, se clasifico los niveles de fragilidad a cada criterio identificando las zonas donde son más vulnerables a ser degradadas de acuerdo a sus características. Los criterios de análisis se evalúan de manera imparcial por lo que es requerido conocer y clasificar debidamente cada alternativa que se interrelacionan con el ambiente para tener mejores resultados. La relación de consistencia (CR) es de gran importancia al implementar este método, por lo que muestra el grado de error de la inconsistencia al momento de ejecutar las comparaciones y asignaciones de pesos a cada juicio.

Como hemos visto anteriormente la metodología empírica de la fragilidad propuesta por Ross (1994) requiere, en un primer momento, estudios básicos de relieve, suelo, geología, clima, uso del suelo y cobertura vegetal, generando un producto que expresa los diferentes grados de fragilidad que tiene el medio ambiente debido a sus características genéticas. Para determinar la fragilidad de la subcuenca se utiliza tres factores como la pendiente, la cobertura vegetal y el tipo de formación de suelo, estos dependiendo de su desarrollo e incidencia de un factor entre otro, se logrando conocer las zonas que tiene una resistencia o resiliencia ante las alteraciones ambientales.

El uso de las herramientas de sistemas de información geográfica permitió el cruce de los criterios utilizados para realizar un análisis empírico de la fragilidad donde muy baja se da por estar en pendientes escarpadas con geoformas de colina altas y laderas de mesetas, están bajo cobertura de bosques que brinda una buena estabilidad hidrológica y protección a los suelos del orden molisoles que tienen una fertilidad alta que favorecen el desarrollo de la vegetación, por ser ricos en materia orgánica, buen drenaje y profundidad efectiva, lo que reduce la susceptibilidad a deslizamientos y a procesos erosivos. La fragilidad media debido a los suelos del orden vertisol e inceptisoles ambos son poco desarrollados, pero con la diferencia de que tienen una profundidad efectiva moderada y alta fertilidad, comprendida entre relieves colinados y mesetas, bajo coberturas de pastizales y vegetación arbustiva, tienen una ligera susceptibilidad a procesos erosivos y deslizamiento de masa. La parte baja de la subcuenca se encuentra entre niveles de fragilidad entre alta y muy alta, que pesar de estar en pendientes planas con geoforma de llanuras y valles fluviales, son utilizadas para cultivos anuales y pastizales que generan alteran las propiedades físicas en los suelos de tipo vertisoles, entisoles e inceptisoles, lo que los convierte en zonas vulnerables ante procesos erosivos, sedimentación, y a inundaciones periódicas.

Conclusiones

El uso de herramientas de sistemas de información geográfica y la aplicación del método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), mostro ser efectivo para realizar un análisis empírico de la fragilidad ambiental. Por medio del uso de técnicas de geoprocésamiento y utilizando los pesos procesados obtenidos en las matrices de comparación pareada de cada criterio y alternativa, se clasificaron en cinco niveles de fragilidad ambiental, en muy baja, baja, media, alta y muy alta. Con la información obtenida del tipo pendiente, suelo y cobertura vegetal y uso de la tierra que presenta la subcuenca, se logró evaluar e identificar por medio del uso de la escala fundamental propuesta por Thomas Saaty, que las pendientes muy escarpadas, los suelos del orden entisoles, y las coberturas de cultivos anuales y áreas antrópicas dieron como resultado una fragilidad muy alta, debido a que estas áreas demuestran que tienen poca resistencias y tendencia a degradarse con facilidad ante perturbaciones antrópicas o naturales, llegando a determinar que la subcuenca del Río Carrizal tiene una fragilidad media.

Referencias

1. Analuisa, I., Moreira, G., Medina, D., & Muñoz, J. (2019). Reforestación de las cuencas hídicas del sitio Mosquito. *Revista San Gregorio*.
2. Bolaños, Y. (2014). *DIAGNÓSTICO SOCIOECONÓMICO DEL PARQUE NACIONAL MALINCHE BAJO EL CRITERIO DE CUENCAS HIDROLÓGICAS*. Universidad Autónoma de México, Centro Universitario UNAM Tenancingo, Tenancingo.
3. Carvalho, G., & Mingoti, S. (2005). *Manual do Usuário: programas para realização da análise hierárquica*. UFMG. Instituto de Ciências Exatas.
4. Castro, C., & Agualimpia, Y. (2017). Implementación del mapa de geopedología como base para la delimitación de unidades de ecosistemas a nivel nacional en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 175-185. Obtenido de <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.74>
5. Corral, G., & Macías, S. (2015). *INFLUENCIA DEL USO DE SUELO EN EL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CARRIZAL, CASO JULIÁN Y SEVERINO*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ, Calceta. Obtenido de <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/198/1/TMA65.pdf>
6. FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
7. Fernández, D. C. (1995). *Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas*. San José. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P36-1946.pdf>
8. IPCC. (2001). *Glosario de términos*. Obtenido de <https://archive.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>
9. IPCC. (2012). *Glossary of Terms*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Obtenido de https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Annex_Glossary.pdf
10. Kawakubo, F. S., Morato, R. G., Campos, K. C., & Luchiari, A. y. (2005). Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005,

- 2203-2210. Obtenido de <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.16.10/doc/2203.pdf>
11. Lucas, K. (Junio de 2019). Relación entre la protección hidrológica y la cobertura vegetal de a subcuenca hidrográfica del carrizal. Revista de Ciencias Agropecuarias“ALLPA”. Obtenido de <https://publicacionescd.ulead.edu.ec/index.php/allpa/article/view/59/130>
12. MAE - MAGAP, M. d. (2015). Protocolo metodológico para la elaboración del mapa uso y cobertura de la tierra 2013-2014, Escala 1:100.000 . Ecuador.
13. MAE. (2013). Modelo de Unidades Geomorfológicas para la Representación Cartográfica de Ecosistemas en el Ecuador Continental. (C. Rafael, R. Mónica, L. Gabriela, & G. Raúl, Edits.) Quito: Ministerio del Ambiente.
14. MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. (2015). MANUAL DE IDENTIFICACIÓN DE GEOFORMAS. SIGTIERRAS.
15. MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca; IEE, Instituto Espacial Ecuatoriano. (2009 - 2015). Mapa Geopedológico del Ecuador continental - escala 1:25.000. SIGTIERRAS.
16. MAGAP, Ministerios de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. (2017). Memoria explicativa del Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador. Quito, Ecuador: SIGTIERRAS.
17. PNUD. (2009). Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute,. Quito: Manthra. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Ruben_Basantes/publication/261798786_Estudio_de_vulnerabilidad_actual_a_los_riesgos_climaticos_en_el_sector_de_los_recursos_hidricos_en_las_cuencas_de_los_Rios_Paute_Jubones_Catamayo_Chone_Portoviejo_y_Babahoyo/links/0
18. Ross, J. (1994). ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. Revista Do Departamento De Geografia(8), 63-74. doi:<https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
19. Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill.

20. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process (Vol. 48). European Journal of Operational Research.
21. Saaty, T. L. (1994). Fundamental of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process (Vol. VI). RWS Publications.
22. Saaty, T. L. (1998). Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos. En E. Martínez, & M. Escudey (Edits.), Evaluacion y Decision Multicriterio. Reflexiones y Experiencias (págs. 17 - 46). Universidad de Santiago.
23. Saaty, T. L. (2006). Fundamentals of Decision Making ; the Analytic Hierarchy Process, Pittsburgh, PA : RWS 3. Pittsburgh, PA 15213: Publications, 4922 Ellsworth Avenue.
24. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. (Vol. I). International journal of services sciencies.
25. Silva, C. A., & Nunes, F. d. (2009). Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 5435-5442. Obtenido de
<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.14.19.56/doc/5435-5442.pdf>