



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE METODOLOGÍAS DE
ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA PROYECTOS QUE
REQUIERAN LICENCIAMIENTO, CASO DE ESTUDIO
HIDROELÉCTRICA ESCUELA DE MINAS**

Valentina Arango Gil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



Análisis comparativo entre metodologías de zonificación ambiental para proyectos que
requieran licenciamiento, caso de estudio hidroeléctrica escuela de minas

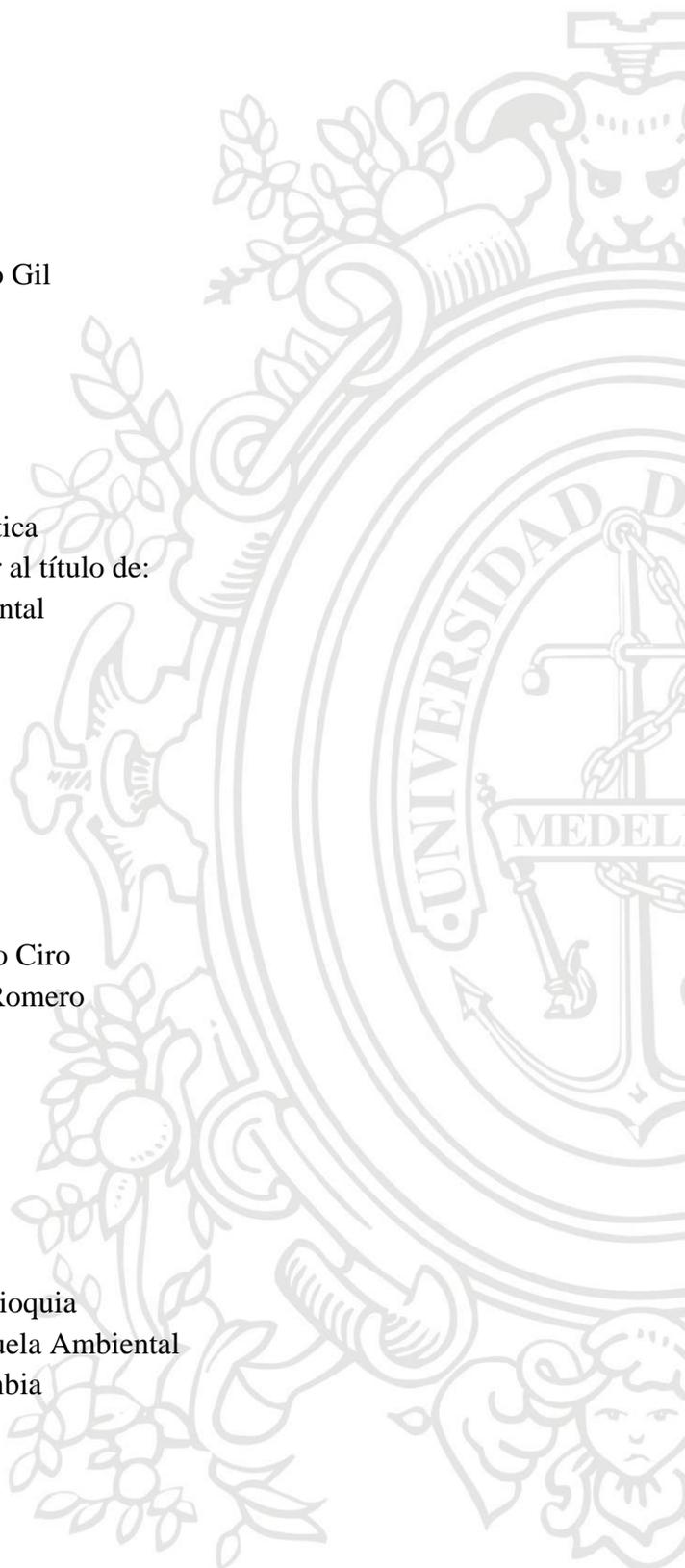
Valentina Arango Gil

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesores

Margarita Jaramillo Ciro
Alejandro Becerra Romero

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2019.



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA PROYECTOS QUE REQUIERAN LICENCIAMIENTO, CASO DE ESTUDIO HIDROELÉCTRICA ESCUELA DE MINAS

Resumen

La zonificación ambiental es una herramienta para la planificación territorial, delimitación de áreas protegidas, proyectos de infraestructura, entre otros, que integra la información de la caracterización ambiental de línea base y establece, de acuerdo con la normatividad ambiental vigente y propiedades de los componentes ambientales, su susceptibilidad ante fenómenos naturales y antrópicos, a fin de identificar zonas del área de interés con diferentes grados de sensibilidad ambiental (ANLA, 2018).

Este informe abarca una recopilación de métodos existentes para zonificación ambiental, donde se seleccionaron 3 metodologías de calificación en términos de sensibilidad y 4 de cruce cartográfico del software ArcGis 10.7. Al caso de estudio “Hidroeléctrica Escuela de Minas” se aplicaron 4 metodologías seleccionadas (M1-A, M2-B, M2-C, M3-D), con el fin de realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos y así tener una visión más amplia de posibles metodologías para aplicar en futuros proyectos que maneje la empresa Pi Épsilon S.A.S.

Para este análisis, se utilizan los mapas y figuras de porcentaje de área, por medio (biótico, abiótico y socioeconómico) y por zonificación final. De acuerdo con lo anterior, se obtuvieron muchas diferencias entre las metodologías, pero también se encontraron similitudes, más que todo entre la metodología 1-A con la 3-D y entre la 2-B con la 2-C.

De acuerdo a los resultados, para realizar una zonificación ambiental es necesario hacer un análisis profundo respecto a la calificación de los componentes, y también a la hora del cruce cartográfico, debido a la gran complejidad que se presenta a la hora de cuantificar los sistemas ambientales.

1. Introducción

A través del tiempo, los conflictos por uso del suelo, la falta de planificación territorial y la disposición inadecuada de sitios vulnerables, han sido fuente de graves daños ambientales y sociales. Como solución a esto, se han venido implementado varios instrumentos de planificación territorial con el fin de prevenir conflictos sociales y alteraciones a los recursos naturales principalmente. Dentro de estos instrumentos, se encuentra la zonificación ambiental, la cual es la localización geográfica y la cuantificación de la sensibilidad o vulnerabilidad de un área en específico como resultado de un análisis integral de todos los aspectos involucrados (Concesión Túnel Aburrá-Oriente S.A. (CTAO), 2013).

Para llevar a cabo una zonificación ambiental, existen varias metodologías, las cuales se seleccionan dependiendo del objetivo del proyecto y la caracterización del área de estudio. Estas metodologías se pueden dividir en tres pasos principales: definición de los medios a caracterizar, selección de criterios de calificación de los diferentes componentes ambientales (Sensibilidad, vulnerabilidad, importancia, etc.) y técnicas de superposición de mapas usando sistemas de información geográfica.

Actualmente, existen múltiples proyectos a los cuales se les aplica la zonificación ambiental al área de estudio, con el fin de obtener la licencia ambiental para ejecutarlo. Uno de los sectores que más proyectos realiza en Colombia es el eléctrico, donde, gran parte corresponden a centrales hidroeléctricas. Esto se debe principalmente, a que en el país existe un recurso hídrico abundante que facilita la ejecución de estos proyectos, por lo que el sector eléctrico se ha concentrado en la energía hidráulica (Osorio, 2017).

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (2018), describió una metodología muy general para el capítulo de zonificación ambiental, por lo tanto, depende de la entidad encargada del proyecto, decidir qué método utilizar para cada etapa de la zonificación. Para ejecutarla, se realiza una serie de suposiciones y sesgos que pueden alterar los resultados finales y, por ende, la toma de decisiones político-administrativas. Por esta razón, en este trabajo se pretende realizar un análisis comparativo entre diferentes metodologías existentes, utilizando como caso de estudio el Proyecto “Hidroeléctrica Escuela de Minas” desarrollado por la empresa Hidralpor S.A.S. y por Pi Épsilon S.A.S en el municipio de Marinilla, Antioquia.

2. Objetivos

General:

Comparar diferentes metodologías de zonificación ambiental para el licenciamiento de proyectos, disponiendo la hidroeléctrica Escuela de Minas como modelo de estudio.

Específicos:

- Seleccionar metodologías para la calificación de los medios y componentes para llevar a cabo la zonificación ambiental del caso de estudio.
- Determinar las metodologías más adecuadas para superposición cartográfica para zonificación del caso de estudio.
- Analizar las diferentes metodologías de zonificación ambiental aplicadas al caso de estudio.

3. Marco Teórico

3.1. Zonificación ambiental (ZA)

Se define como la caracterización del territorio en subzonas a partir de criterios ambientales, por lo que se considera como una síntesis de los diagnósticos físico, biótico y socioeconómico. Este tipo de zonificación busca, a través de la optimización de los usos del territorio en unidades específicas, garantizar una oferta adecuada de bienes y servicios ambientales que respondan a los objetivos de manejo (Suarez, 2016).

En Colombia, la ZA se utiliza como herramienta para muchos instrumentos de planificación, tales como Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH), Planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA), y en la delimitación de áreas protegidas dentro del Sistema Nacional De Áreas Protegidas (SINAP). Además, la ZA es fundamental para estudios ambientales como el diagnóstico ambiental de alternativas (DAA) y estudio de impacto ambiental (EIA); los cuales son un requisito obligatorio para la toma de decisiones de los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental (ANLA, 2019). Como lo exige la autoridad ambiental, la información requerida para la zonificación ambiental se obtiene de los resultados de la caracterización ambiental del área donde se desarrollará el proyecto (línea base), de una visión global de las condiciones de los ecosistemas y recursos naturales que allí se encuentran, de las restricciones legales vigentes, y de los resultados de la evaluación ambiental, que determinan los diferentes impactos que se generan con la realización de un proyecto determinado (Pijao S.A.S, 2016).

En la Metodología para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales (2018) adoptada por la Resolución 1402 del 25 de julio de 2018, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se presenta una metodología para la zonificación ambiental donde se señala que, a partir de los elementos identificados en la caracterización del área de estudio, y en el proceso de evaluación de alternativas, se debe:

- Establecer unidades espaciales de acuerdo con la sensibilidad o susceptibilidad de daño de los componentes del ambiente ante el desarrollo del proyecto, obra o actividad.
- Elaborar mapas de zonificación para cada uno de los medios caracterizados (abiótico, biótico y socioeconómico), donde se identifiquen y definan las áreas o unidades con diferentes grados de sensibilidad o susceptibilidad ambiental.
- Utilizar un software de procesamiento geoespacial para realizar el cruce o superposición de información de los mapas de cada medio para obtener la zonificación ambiental final del área de estudio, donde se sintetizan espacialmente las condiciones ambientales actuales más relevantes y la sensibilidad ambiental.

Además, la descripción de la metodología utilizada debe incluir los atributos relevantes de los componentes tenidos en cuenta en la zonificación, criterios para la ponderación y la calificación cualitativa y cuantitativa de la sensibilidad ambiental de los atributos de cada componente dentro de la zonificación ambiental, el modelo de procesamiento de información geográfica, el análisis de los resultados, y las áreas obtenidas por cada categoría de sensibilidad ambiental, tanto para los mapas por cada medio, como para la zonificación ambiental final, y su porcentaje de participación al área de influencia.

La sensibilidad ambiental se define como el grado de fragilidad, vulnerabilidad o susceptibilidad de las unidades físicas, bióticas o sociales existentes en el área de influencia, las cuales, a través de un trabajo interdisciplinario de especialistas, se logran precisar de acuerdo a los registros cualitativos y cuantitativos de la línea base ambiental (Suarez, 2016). También, se mide en el nivel de resiliencia y reversibilidad que tienen los diferentes componentes de los sistemas ambientales ante cualquier perturbación externa (Pijao S.A.S, 2016).

Para analizar de manera íntegra la sensibilidad ambiental, se hace fundamental el uso de nuevas tecnologías como los sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos, etc., y técnicas como la evaluación multicriterio, análisis cartográfico, etc., para obtener un modelo de la realidad y facilitar la toma de decisiones. Los modelos espaciales en el entorno de los sistemas de información geográfica, suministran la consideración simultánea de múltiples variables y sus interacciones, con el fin de comprender el funcionamiento del territorio como un todo y, fundamentalmente, ayuda a la evaluación y planificación de este (Romero, 2002).

Actualmente existen varias formas de hacer una zonificación ambiental en términos de sensibilidad, pero cada metodología es diferente dependiendo del tipo de proyecto y las características del territorio. Además, la zonificación ambiental se puede dividir en dos partes principales, la calificación de la sensibilidad y el cruce de los mapas temáticos por medio de sistemas de información geográfica. Para llevar a cabo cada una de estas, es necesario definir métodos de acuerdo con las necesidades del proyecto. Algunas de estas metodologías son:

3.2. Metodologías para la calificación de la sensibilidad ambiental

3.2.1. Metodología 1 (Modificado de Pi Épsilon, 2015)

Esta metodología se adaptó de la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales (ANLA, 2018).

Definición de mapas temáticos y atributos

Para determinar la sensibilidad ambiental de la zona en estudio se requiere la estructuración de una serie de atributos que permitan a través de una representación funcional, describir el comportamiento del ambiente en términos de la importancia, fragilidad y vulnerabilidad. Para ello se selecciona una

serie de mapas temáticos, los cuales fueron elaborados en la caracterización ambiental, y que representan espacialmente el comportamiento de los atributos más relevantes en el área de influencia del proyecto. Seguidamente, se califican los atributos o mapas temáticos en tres niveles de sensibilidad: alta, media y baja (Figura 1)



Figura 1. Niveles de sensibilidad Ambiental de la metodología 1.

Fuente: Pi épsilon, 2015

Agrupación de atributos

Los atributos son las unidades definidas en las diferentes variables, los cuales se agrupan según su nivel de sensibilidad a partir de su importancia, fragilidad y vulnerabilidad. Una vez definida la calificación de los atributos en términos de sensibilidad se agrupan estos por categoría (todos los de alta, todos los de media y todos los de baja) y por medio (biótico, abiótico y socioeconómico).

Superposición de la información y generación de mapas de sensibilidad ambiental por medio

Usando sistemas de información geográfica, donde se utiliza cruce y superposición de los mapas temáticos, se generan mapas intermedios de sensibilidad ambiental según la categoría de esta para los medios abiótico, biótico, socioeconómico, y se utiliza la agrupación anterior. Para llevar a cabo los cruces cartográficos, es necesario utilizar la matriz de cruce de sensibilidad (*Tabla 1*)

Tabla 1. Matriz de decisión para cruce de mapas temáticos.

Mapa temático n_i	Mapa temático n_{i+1}		
	Alta	Media	Baja
Alta	Sensibilidad alta	Sensibilidad alta	Sensibilidad media
Media	Sensibilidad alta	Sensibilidad media	Sensibilidad baja
Baja	Sensibilidad media	Sensibilidad baja	Sensibilidad baja

3.2.2. Metodología 2 – Asignación de pesos (Modificado de CTAO S.A. (2013) y Pi Épsilon (2017))

Consiste en asignar pesos a los diferentes componentes de los medios (biótico, abiótico y socioeconómico (*Figura 2*)), de acuerdo con las características del lugar y al criterio de expertos en cada área. Este método depende del objetivo para el cual se esté haciendo la zonificación, de modo que es muy específico de cada proyecto. Por esta razón, no están establecidos pesos estándares para la aplicación de esta metodología, si no que cada caso tiene pesos diferentes y consistentes con toda la caracterización del área.

En esta metodología, la cual se modifica de dos autores, parte de un análisis interdisciplinario con el equipo técnico para calificar los componentes, logrando la integración de la información temática reflejados en los mapas de zonificación.

Se definen cuatro escalas cualitativas de importancia: Muy alta, alta, media y baja, de acuerdo con el grado de importancia de los criterios definidos y caracterizados para los componentes físico, biótico y socioeconómico, a su vez, se definen las variables de calificación (amenaza, calidad del recurso hídrico – ICA, disponibilidad del recurso hídrico, conflicto de uso, áreas protegidas, especies de fauna y flora amenazadas o endémicas, coberturas vegetales, conectividad ecológica, calidad hidrobiológica – BMWP, infraestructura vial, equipamientos sociales, densidad poblacional, actividades productivas, organización social y demanda del recurso hídrico), las cuales permitieron determinar la sensibilidad del área estudiada.

Estas variables también se califican en Muy alto (4), alto (3), medio (2) y bajo (1) y la suma ponderada de los atributos seleccionados corresponde a la clasificación final del componente para la sensibilidad de acuerdo con los porcentajes que se definen por un grupo de expertos que participan en la caracterización ambiental. El resultado final de la sensibilidad ambiental comprende los mapas individuales de sensibilidad por componentes, que a su vez se unen para generar un mapa único de sensibilidad ambiental del proyecto de acuerdo con la suma ponderada.

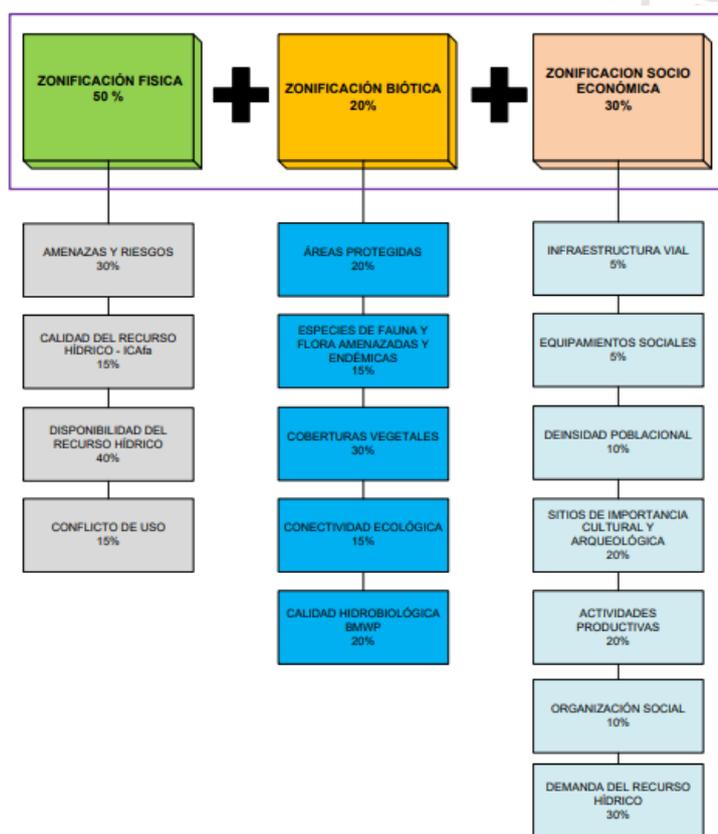
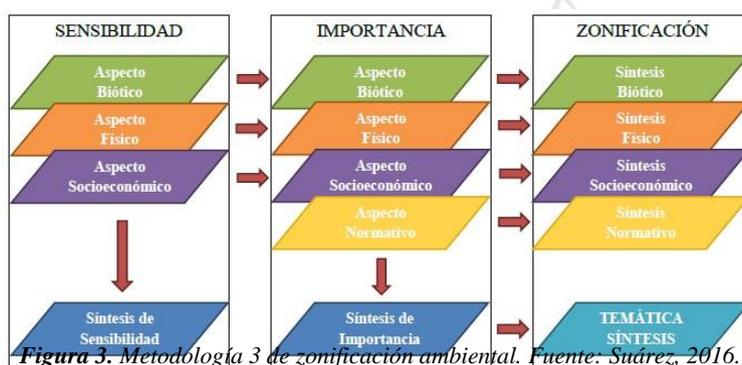


Figura 2. Esquema de evaluación y ponderación de las diferentes zonificaciones para la obtención de la zonificación ambiental general. **Fuente:** CTAO S.A., 2013

3.2.3. Metodología 3 – Importancia/Sensibilidad (Modificado de Suárez et. al, 2016)

Esta metodología se desarrolló para un caso de estudio en específico, y se basó en los términos de referencia del tipo de proyecto utilizado, empleando el criterio de sensibilidad ambiental, física y social, en directa relación con los posibles niveles de recuperación de cada elemento reconocido, y el criterio de importancia, entendido como la escala de valoración con la que se realice tal reconocimiento.

Estos aspectos se califican con debida proporción partiendo del criterio de expertos los cuales dan un valor cuantitativo a la realidad, teniendo en cuenta de manera intrínseca los factores cualitativos que se pueden encontrar interrelacionados y dar un grado de sensibilidad o de importancia, para poder dar un valor a las unidades ya sea de sensibilidad o de importancia se deben tener en cuenta la resiliencia que tiene una unidad existente al entorno.



La interacción entre los factores de sensibilidad e importancia permite diferenciar la potencialidad de distintas zonas del área de influencia para el desarrollo del proyecto, lo cual en conjunto con el conocimiento previo que se tiene del área, permite establecer el resultado de la zonificación ambiental en términos de la aptitud del entorno hacia el proyecto, según la relación sensibilidad e importancia (S/I) de cada uno de sus elementos.

Con base en lo anterior, se formula la cualificación de la susceptibilidad en términos de una escala de niveles cuyas fronteras están determinadas por la capacidad de recuperación de los elementos al ser intervenidos y así mismo, las posibilidades de manejo de los potenciales efectos que la intervención genere sobre el medio receptor. A continuación, se presenta la clasificación de los diferentes grados de sensibilidad e importancia de la metodología:

Sensibilidad Ambiental

- **Muy Baja Sensibilidad:** Corresponden a aquellos elementos del sistema que poseen capacidad de retornar a su estado original ante una intervención y que por ende tienen una alta resistencia a sufrir cambios recuperándose en el corto plazo de forma natural.
- **Baja Sensibilidad:** Corresponden a aquellos elementos del sistema que poseen una alta capacidad de retornar a su estado original ante una intervención y que tienen una buena resistencia a sufrir cambios. Su recuperación se da por mecanismos naturales en el largo plazo y se requiere implementar acciones de prevención.
- **Moderada o Media Sensibilidad:** Corresponden a aquellos elementos del sistema que poseen una capacidad media de retornar a su estado original ante una intervención y que tienen una resistencia moderada a sufrir cambios. Su recuperación se da en el corto plazo implementando acciones de mitigación y/o en el largo plazo implementando medidas de prevención.
- **Alta Sensibilidad:** Corresponden a aquellos elementos de los componentes del sistema que poseen una baja capacidad de retornar a su estado original ante una intervención y que por ende tienen una baja resistencia a sufrir cambios recuperándose en el largo plazo mediante la implementación

de acciones de mitigación, o acciones de recuperación y/o rehabilitación en el corto plazo. Se reconocen en esta categoría:

- ✓ Áreas de recuperación ambiental tales como áreas erosionadas, de conflicto por uso del suelo o contaminadas.
 - ✓ Áreas de riesgo y amenazas tales como áreas de deslizamientos e inundaciones.
 - ✓ Resguardos y territorios colectivos de comunidades étnicas minoritarias, y reservas campesinas
- **Muy Alta Sensibilidad:** Corresponden a aquellos elementos del sistema que poseen una muy baja capacidad de retornar a su estado original ante una intervención y que por ende tienen una baja resistencia a sufrir cambios recuperándose en el largo plazo mediante la implementación de acciones de restauración o rehabilitación, o que no es posible su recuperación. Se reconocen en esta categoría:
 - ✓ Áreas de especial significado ambiental como áreas naturales protegidas, ecosistemas sensibles y rondas de cuerpos de agua.
 - ✓ Corredores biológicos, presencia de zonas con especies endémicas, amenazadas o en peligro crítico, áreas de importancia para cría, reproducción, alimentación y anidación y, zonas de paso de especies migratorias.
 - ✓ Áreas de importancia social tales como asentamientos humanos, de infraestructura física y social y de importancia histórica y cultural.
 - ✓ Los especialistas de cada área evaluarán y darán un valor de sensibilidad teniendo en cuenta los criterios expuestos anterior mente.

Nivel De Sensibilidad	Valor
Muy Alta	5
Alta	4
Media (Moderada)	3
Baja	2
Muy Baja	1

Figura 4. Niveles de sensibilidad ambiental. Fuente: Suárez, 2016.

Importancia

Se define como el grado de utilidad de las unidades físicas, bióticas o sociales, entendida esta utilidad como la capacidad de prestación de bienes y/o servicios ambientales, sociales, económicos y culturales (p.e. potencial arqueológico) por parte de los diferentes elementos del sistema hacia el entorno.

A partir del concepto de importancia, se califica empleando la misma metodología de juicio de especialistas temáticos en cada área.

A continuación, se presenta la clasificación de los diferentes niveles de importancia tenidos en cuenta en el análisis de zonificación:

- **Baja Importancia** Corresponde a aquellos elementos que presentan un bajo potencial de generación de bienes y/o servicios ambientales y/o sociales, y que durante una intervención sobre alguno de estos elementos no se compromete la capacidad de oferta a corto plazo. Los mecanismos de recuperación se pueden dar de forma natural con resultados a mediano plazo, requiriendo únicamente medidas de prevención.

- **Moderada Importancia** Corresponde a aquellos elementos que presentan un potencial medio de generación de bienes y/o servicios ambientales y/o sociales, y que durante una intervención sobre alguno de estos elementos se compromete de forma moderada la capacidad de oferta de los recursos. Los mecanismos de recuperación se pueden dar de forma natural con resultados a largo plazo o por medio de medidas de prevención y/o mitigación a corto plazo.
- **Alta importancia** Corresponde a aquellos elementos que presentan un alto potencial de generación de bienes y/o servicios ambientales y/o sociales, y que durante una intervención sobre alguno de estos elementos se compromete de forma importante la capacidad de oferta de los recursos. Las medidas de recuperación a implementar comprenden actividades de restauración con resultados a largo plazo.

Nivel De Importancia	Valor
Alta	4
Media (Moderada)	3
Baja	2

*Figura 5. Niveles de importancia.
Fuente: Suárez, 2016.*

Seguidamente, se aplica la matriz de correlación de sensibilidad e importancia como se muestra en la Figura 6.

Importancia	Sensibilidad				
	Muy Alta	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Alta	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baja
Media	Alta	Moderada	Moderada	Baja	Baja
Baja	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Muy Baja

Figura 6. Matriz Correlación Sensibilidad e Importancia.

3.3. Metodologías de superposición cartográfica

La mayoría de los análisis espaciales en sistemas de información geográfica (SIG), utilizan seis operaciones fundamentales: Superposición Topológica de Mapas, generación de corredores (buffers), extracción de Información, fusión de información y las dos operaciones de base de datos relacional (unión y relación). La superposición Topológica crea nuevas capas de información, con la combinación de sus atributos, mediante la superposición de dos capas de entrada. La información de cada capa de entrada se combina para crear nuevas capas de salida, nuevos mapas. De la misma manera, los atributos de cada capa de información se combinan, desde las dos capas de entrada, para describir cada capa de información de salida. A menudo es necesaria la manipulación de múltiples capas de datos para conseguir el objetivo de la operación de superposición. Esto se hace mediante un proceso, en el que dos capas de entrada se combinan para formar una capa intermedia, la cual se combina entonces con una tercera capa para formar otra capa intermedia, y así hasta que se consiga la capa resultante deseada mapa. (Universidad de Alcalá, 2015; Suarez, 2016).

El análisis de superposición de ArcGis (Esri, 2016) incluye un grupo de metodologías aplicadas en la selección de sitios óptimos o en el modelado de adecuación. Es una técnica para la aplicación de una escala común de valores en diversas entradas que son distintas entre sí para generar un análisis integrado. Los modelos de adecuación identifican las mejores ubicaciones, o las preferidas para un fenómeno específico. Los tipos de problemas que trata el análisis de adecuación incluyen:

- Dónde ubicar un nuevo complejo de viviendas

- Cuáles son los mejores hábitats para los ciervos
- Dónde es más probable que se produzca un crecimiento económico
- Cuáles son las ubicaciones más propensas a avalanchas de lodo

Además, es posible que los factores del análisis no tengan la misma importancia entre sí. Tal vez, el coste del terreno sea más importante al momento de elegir una ubicación que la distancia a las líneas de servicios. Su tarea es determinar cuál es el factor más importante.

Incluso con un único ráster, debe priorizar los valores. Algunos de los valores de un ráster en particular pueden ser ideales para su propósito (por ejemplo, las pendientes de 0 a 5 grados), mientras que otros pueden ser buenos, malos e incluso, inaceptables.

A continuación, se enumeran los pasos generales para realizar un análisis de superposición:

1. Defina el problema.
2. Divida el problema en submodelos.
3. Determine las capas significativas.
4. Reclasifique o transforme los datos que están dentro de una capa.
5. Pese las capas de entrada.
6. Agregue o combine las capas.
7. Analice.

Los pasos del 1 al 3 son comunes para la resolución de casi todos los problemas espaciales y son especialmente importantes en el análisis de superposición (Esri, 2016).

Existen varios enfoques para realizar el análisis de superposición. Cada uno de ellos implementa alguna variante en los pasos del análisis de superposición general. Los tres enfoques principales disponibles son: Superposición ponderada, Suma ponderada y Superposición difusa. Cada enfoque tiene diferentes premisas y suposiciones básicas. La elección del enfoque más adecuado depende del problema de superposición que se intenta resolver. Estas herramientas se encuentran dentro del conjunto de herramientas “Análisis espacial” (Esri, 2016).

3.3.1. Superposición ponderada:

Superpone varios rásteres con una escala de medición común y pondera cada uno según su importancia. Cuando las capas de criterios de entrada están en sistemas de numeración distintos con rangos diferentes, cada celda de cada criterio se debe reclasificar con una escala de preferencia común como 1 a 10, siendo 10 el más favorable, para combinarlas en un único análisis. Una preferencia asignada en la escala común implica la preferencia del fenómeno para el criterio. Los valores de preferencia están en una escala relativa. Es decir, una preferencia de 10 es dos veces una preferencia de 5. Los valores de preferencia no sólo deben asignarse en relación con los otros valores dentro de la capa, sino que también deben tener el mismo significado entre las capas. Por ejemplo, si a la ubicación para un criterio se le asigna una preferencia de 5, tendrá la misma influencia en el fenómeno que una preferencia de 5 en un segundo criterio.

Los criterios de entrada se multiplican por los pesos y después se suman. La herramienta combina los siguientes pasos:

- Reclasifica los valores en los rásteres de entrada en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo, o algo similar a una escala unificadora.
- Multiplica los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia de los rásteres.
- Suma los valores de celda resultantes para producir el ráster de salida

Los rásteres de salida se pueden ponderar según la importancia y sumar para producir un ráster de salida.

Pasos para ejecutar la herramienta Superposición Ponderada.

1. Seleccionar una escala de evaluación
2. Agregar rásteres de entrada
3. Establecer los valores de escala
4. Asignar los pesos a los rásteres de entrada
5. Ejecute la herramienta Superposición Ponderada

3.3.2. Suma ponderada

Existen dos diferencias importantes entre suma ponderada y superposición ponderada: La herramienta Suma ponderada no re-escala los valores clasificados a una escala de evaluación y admite valores enteros y de puntos flotantes, mientras que la herramienta Superposición ponderada sólo acepta rásteres enteros como entrada.

Al no re-escalar los valores clasificados a la escala de evaluación, el análisis mantiene la resolución. Por ejemplo, en un modelo de adecuación, si hay 10 criterios de entrada que se reclasificaron en una escala de 1 a 10 (siendo 10 el más favorable) y no se asignaron pesos, los valores en la salida de Suma ponderada pueden variar de 10 a 100. Para la misma entrada, Superposición ponderada normalizará el rango de análisis reclasificado de 10 a 100 con la escala de evaluación; por ejemplo, nuevamente a la escala de 1 a 10. Mantener la resolución del modelo en Suma ponderada puede resultar útil si desea identificar sólo las ubicaciones más favorables o una cantidad específica de sitios.

En general, los valores de los rásteres continuos se agrupan en categorías. Por ejemplo, los distintos valores de pendiente se pueden agrupar en plana, moderada, empinada y muy empinada. Cada valor de pendiente se puede asignar a una de estas categorías y a la categoría se le puede asignar un valor de reclasificación que identifique la preferencia para la clase en relación con el criterio del análisis de superposición. La herramienta Reclasificar permite reclasificar ese tipo de rásteres.

La herramienta Superposición ponderada se utiliza más comúnmente para el modelado de adecuación y se debe utilizar para garantizar que se sigan las metodologías correctas. La herramienta Suma ponderada resulta útil si desea mantener la resolución del modelo o si se requiere una salida de puntos flotantes o pesos decimales.

Suma ponderada multiplica los valores de campo designados para cada ráster de entrada por el peso especificado. Después, suma (agrega) todos los rásteres de entrada para crear un ráster de salida.

Los pasos para ejecutar la herramienta Suma ponderada son los siguientes (Esri, 2016):

1. Agregar rásteres
2. Seleccionar el campo (el que se utilizará en el análisis de superposición)
3. Asignar pesos para los rásteres de entrada
4. Ejecutar la herramienta

3.3.3. Calculadora Ráster

Dentro del conjunto de herramientas “Análisis Espacial” de ArcGis existe otra herramienta para hacer superposición de mapas, la cual es Álgebra de mapas, que sirve para ejecutar todas las herramientas, los operadores y las funciones de Spatial Analyst para realizar análisis geográficos.

Dentro del álgebra de mapas, se encuentra la herramienta “Calculadora Ráster”, la cual Construye y ejecuta una expresión simple de Álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python en una interfaz similar a una calculadora. Con esta herramienta se pueden sumar, restar, y hacer operaciones booleanas con las capas en formato ráster (Esri, 2018).

3.3.4. Intersección

A parte de estas herramientas de análisis espacial, existe otra herramienta para combinar mapas, dentro del conjunto “Herramientas de análisis”, llamada “intersección”, la cual se encuentra dentro del

conjunto de Superposición. Esta contiene las herramientas para superponer varias coberturas con el fin de combinar, borrar, modificar o actualizar entidades espaciales en una cobertura nueva.

Cuando se superpone un conjunto de entidades a otro se crea nueva información. Hay cinco tipos de operaciones de superposición. Todos conllevan la unión de dos conjuntos de entidades existentes en un conjunto único de entidades para identificar las relaciones espaciales entre las entidades de entrada. La herramienta intersectar, calcula la intersección geométrica de dos coberturas. Solo las entidades del área común a ambas coberturas se conservarán en la cobertura de salida.

- Es preciso que la cobertura de intersección tenga una topología de polígono.
- La cobertura de entrada, la cobertura de intersección y la cobertura de salida deben tener nombres diferentes, incluso en espacios de trabajo diferentes.
- Los puntos de etiqueta se generan en cada polígono de cobertura de salida al utilizar la opción POLY. Los nuevos Id. de usuario de polígono se configuran con el valor interno del polígono menos uno.
- Los sistemas de ruta de la cobertura de entrada se mantendrán en la cobertura de salida al utilizar la opción LINE. Sin embargo, no se permite utilizar INTERSECT en las propias rutas y secciones.
- Las subclases de región, tanto de la cobertura de entrada como de la cobertura de intersección, se mantienen con la opción POLY. Las subclases con nombres y esquemas de atributos idénticos se incorporan. La extensión de la cobertura de salida recorta las regiones de salida.
- Las anotaciones se copian de la cobertura de entrada y se guardan en la cobertura de salida.
- La precisión de las coordenadas de la cobertura de salida se determina mediante el entorno Precisión de coberturas derivadas.
- Los archivos de proyección se compararán para detectar similitudes con el nivel de comparación especificado en el entorno Comparar proyecciones.
- La cobertura de salida hereda los elementos de la tabla de atributos de punto, los puntos de relevancia y el contenido del modelo de datos de archivo de proyección de la cobertura de entrada.

Cuando la cobertura de entrada contiene datos lineales que pertenecen a gráficos planares diferentes, los datos se mantendrán en la cobertura de salida. Por ejemplo, con los arcos coincidentes o colineales, como los arcos que representan cables de servicios a diferentes niveles o una carretera que sigue un río, se conservarán los segmentos de línea coincidentes o colineales. Sin embargo, se pueden insertar vértices adicionales. En el caso de los arcos de intersección, como una carretera que pasa sobre un río, no se insertarán nodos en la intersección aparente (Esri, 2018).

4. Metodología

4.1. Zona de estudio

Para realizar la comparación de las metodologías, se seleccionó el proyecto “Hidroeléctrica Escuela de Minas”. Este proyecto se encuentra ubicado en la Región del Oriente Antioqueño en jurisdicción del municipio de Marinilla a 47 km al Este del municipio de Medellín (Figura 7). Geográficamente el área del proyecto se ubica en la cuenca del río Negro, Subregión del Valle de San Nicolás (Cornare, 2014).

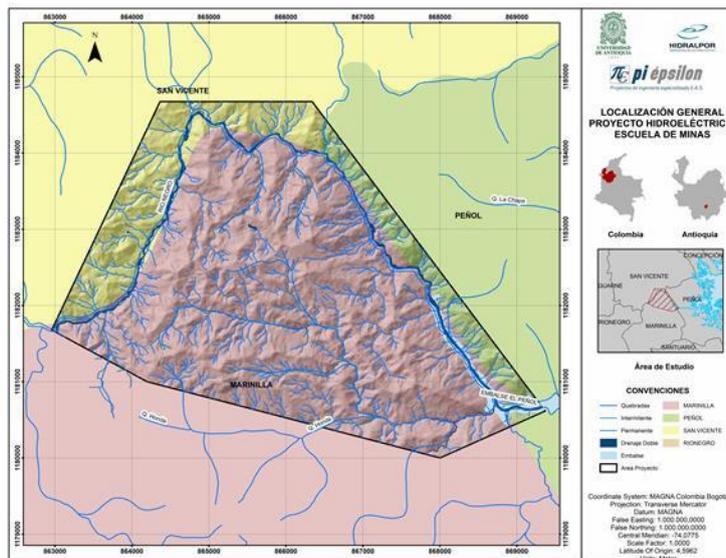


Figura 7. Localización del área del proyecto Hidroeléctrica Escuela de Minas.

Para determinar la sensibilidad ambiental de la zona en estudio se requiere la estructuración de una serie de atributos que permitan a través de una representación funcional, describir el comportamiento del ambiente en términos de su sensibilidad ambiental. Para ello se seleccionó una serie de mapas temáticos (Anexo 1), que representan espacialmente el comportamiento de los atributos más relevantes en el área de influencia del proyecto (Pi épsilon, 2012).

4.2. Selección de metodologías para calificar la sensibilidad ambiental

Se realizó una revisión y compilación de 15 formas de llevar a cabo una zonificación ambiental, usadas en diferentes estudios ambientales en el país, las cuales fueron autorías de varias empresas y adaptadas a proyectos particulares. Estas metodologías difieren en la tipología del proyecto, objetivo, características del territorio, entre otras variables.

Seguidamente, con el fin de seleccionar las metodologías que se aplicarán al caso de estudio, se clasificaron de acuerdo con los medios y componentes utilizados, a los criterios de calificación y al método estadístico implementado para la superposición de mapas (ponderación, suma vectorial, cualitativamente, entre otros) (Anexo 1).

Finalmente, se hizo una selección de las metodologías más pertinentes para implementar en el caso de estudio, basándose en el cumplimiento de los siguientes criterios:

- Metodología que permita identificar y definir las áreas o unidades con diferentes grados de sensibilidad ambiental, debido a que así lo estipula la metodología para estudios ambientales (ANLA, 2018)
- Metodología que haya sido aplicada para al menos los tres medios que especifica los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA – en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica (medio biótico, abiótico y socioeconómico) (ANLA, 2018).
- Metodología que haya sido aplicada a casos afines al del caso de estudio, es decir, proyectos que requieran licencia ambiental, preferiblemente hidroeléctricas.

4.3. Determinación de metodologías de superposición cartográfica

Se hizo una revisión y análisis de información bibliográfica referente a los diferentes métodos de superposición de mapas por medio del software ArcGis. Posteriormente, se seleccionaron los más pertinentes para aplicar a la zonificación ambiental, de acuerdo a las siguientes pautas, basadas en el instructivo de superposición de ArcGis (2016):

- Tipo de capa de entrada
- Requerimientos de capas con pesos o importancia asignada
- Tipo de análisis de conjuntos utilizado (Unión, intersección, entre otros)
- Posibilidad de aplicación a las metodologías anteriormente seleccionadas para calificación de medios y componentes

4.4. Construcción y aplicación de metodologías al caso de estudio

4.4.1. Construcción de metodologías a partir de las determinadas para calificación y cruce

A partir de las metodologías seleccionadas en los pasos anteriores, se tuvo en cuenta los siguientes criterios para saber cuál método de cruce se podía aplicar a cuál método de calificación:

- Tipo de variables (cualitativas o cuantitativas)
- Requerimiento de operaciones matemáticas
- Existencia de pesos para ponderación

Además, se le aplicaron varios métodos de superposición a un mismo método de calificación de sensibilidad, y viceversa, debido a que cumplían con los criterios para la aplicación y con el fin de poder comparar los diferentes métodos.

4.4.2. Aplicación de metodologías al caso de estudio

Primero que todo se organizó la información cartográfica que se tenía del proyecto, seguidamente se procedió a calificar la sensibilidad de cada componente, definidos para el área de estudio de cada metodología.

Finalmente, se hizo el cruce de los mapas temáticos a través del software ArcGis versión 10.7 de acuerdo a las diferentes metodologías construidas anteriormente.

4.5. Comparación de las metodologías aplicadas

De acuerdo con el porcentaje de área que cada método delimitó, se hizo una comparación y análisis de los resultados, detectando las fortalezas y debilidades de cada metodología, incluyendo el tiempo de aplicación, inconvenientes a la hora de llevarla a cabo, posibles sesgos de los resultados, entre otras características de las metodologías aplicadas.

5. Resultados y análisis

5.1. Metodologías para calificar la sensibilidad ambiental

Para la selección de metodologías de calificación de los medios y los componentes, se realizó una matriz donde se describieron las características más relevantes de cada una de las encontradas (Anexo 2), y a partir de esta, se seleccionaron los siguientes métodos de calificación (resaltadas de color azul claro en el Anexo 2):

1. Metodología de calificación cualitativa con base a la sensibilidad alta, media y baja. (Modificada de Pi épsilon, 2015)
2. Metodología de calificación cuantitativa con asignación de pesos a los diferentes componentes y medios (Modificada de CTAO S.A. (2013) y Pi Épsilon (2017)).
3. Metodología de calificación cualitativa de sensibilidad versus importancia de los atributos. (Modificado de Suárez et. al, 2016)

5.2. Metodologías de superposición cartográfica

De acuerdo a la matriz de clasificación de los criterios descritos en la metodología, se seleccionaron los siguientes métodos de superposición de mapas, las cuales pertenecen a la caja de herramientas del software ArcGis (Anexo 3):

- A. Intersección
- B. Superposición ponderada
- C. Suma ponderada
- D. Calculadora ráster

5.3. Construcción y aplicación de las metodologías al caso de estudio

5.3.1. Construcción de metodologías a partir de las seleccionadas para calificación y cruce

Las metodologías de calificación de los componentes y medios se combinaron con las de cruce cartográfico, con el fin de formar las metodologías finales de zonificación ambiental. Los cruces de éstas se muestran en la Figura 8, donde los números hacen referencia a las metodologías de sensibilidad ambiental, y las letras a las de cruce cartográfico. A las metodologías se les asignó el nombre de M1-A, M2-B, M2-C y M3-D.

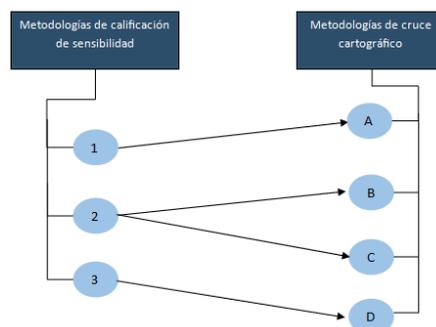


Figura 8. Combinación de metodologías

5.3.2. Aplicación de metodologías al caso de estudio

5.3.2.1. Metodología 1 – A

La definición de rangos de sensibilidad ambiental por atributos para la metodología de calificación 1, se encuentra en el Anexo 4.

A partir de dichos rangos de calificación, se generaron los mapas intermedios de sensibilidad ambiental (biótico, abiótico y socioeconómico) (Anexo 5), en los cuales se observan cambios notables respecto a la distribución de la sensibilidad en cada uno de los medios, esto se debe a que en cada medio se califican atributos diferentes y están delimitados en zonas diferentes.

En la zonificación final de la metodología 1-A (Anexo 6) se visualiza que las rondas hídricas y algunas zonas que se observan con sensibilidad alta en lo biótico (Figura 9), permanecen con sensibilidad alta, debido a que la metodología permite resaltar los atributos legales, poniéndole más peso a la hora de aplicar la matriz de decisión (Tabla 1), en este caso las rondas hídricas y los nacimientos que se encuentran en el polígono de estudio. Respecto al medio abiótico (Anexo 5), se puede observar que gran parte del mapa tiene sensibilidad media, posiblemente debido a que la intersección que se hizo fue para todos los atributos (8 específicamente) y no se analizó capa por capa antes de hacer el cruce, es decir, si se considera que un componente es más importante que otro en cierto sentido y tiene una sensibilidad alta, va a predominar la sensibilidad alta en esa área.

Respecto a la sensibilidad del medio socioeconómico, se ve que gran parte se encuentra en sensibilidad alta, debido a que hay gran cantidad de predios pequeños, los cuales son más susceptibles a cambios por cualquier perturbación externa.

La zonificación final de esta metodología (Anexo 6), dio alta en las zonas cercanas al río (rondas hídricas), y medio en la mayoría del mapa, debido a que, en los mapas intermedios, la sensibilidad media predomina. Lo anterior tiene sentido porque las zonas cercanas al río y a las quebradas afluentes, son más susceptibles a cambios por causa de alguna perturbación externa, tanto natural como antrópica.

5.3.2.2. Metodología 2 – B

La definición de rangos de sensibilidad ambiental por atributos para la metodología de calificación 2, se encuentra en el Anexo 7. Además, se encuentran los porcentajes de ponderación con los que se cruzó los mapas temáticos (Anexo 8).

La sensibilidad del medio abiótico de la metodología 2-B (Anexo 9), dio como resultado una mayor área de sensibilidad media, otras de sensibilidad baja y muy pocas para sensibilidad alta. Lo cual pudo deberse a la falta de datos de sensibilidad que había en algunas capas, y por cuestiones de la metodología de cruce, donde se hizo la suposición de que aquello que estuviera en cero (no había calificación de la sensibilidad), la sensibilidad era baja (valor de 1 en las celdas del ráster), por lo tanto, como se hizo un promedio ponderado, ocasionó que los valores de calificación final bajarán. Respecto al mapa del medio biótico, se observa que los colores están entre naranja y rojo, lo cual significa que tiene una sensibilidad alta y muy alta. Como se muestra en la Tabla 6, el porcentaje de ponderación del componente legal es mayor que los demás, así mismo tiene calificación de sensibilidad “muy alta” en las rondas hídricas, retiros de nacimiento de agua y suelos de protección; los cuales son delimitados legalmente y tienden a alterarse fácilmente frente a cualquier perturbación externa.

En cuanto al medio socioeconómico del Anexo 9, se puede decir que no hay atributos restrictivos como comunidades étnicas ni resguardos indígenas, por lo tanto, la sensibilidad no es tan alta.

Además, las concesiones mineras no estaban dentro del polígono de estudio. Sin embargo, los predios existentes eran muy pequeños, por ende, la sensibilidad en estas zonas era alta.

La zonificación final de la metodología 2-B (Anexo 10), muestra unas zonas con sensibilidad alta, entre ellas el río, y otras zonas relacionadas con la sensibilidad biótica. Lo anterior se explica con el porcentaje de ponderación del medio biótico, el cual fue mayor que el del medio abiótico y socioeconómico (Anexo 8). Además, la sensibilidad media también predominó en los mapas intermedios, fruto de las características de todos los atributos involucrados (Anexo 1).

5.3.2.3. Metodología 2 – C

La definición de rangos de sensibilidad y los porcentajes de ponderación son los mismos de la metodología anterior (Anexo 7 y 8 respectivamente), debido a que comparten el mismo método de calificación de la sensibilidad.

En el mapa de sensibilidad ambiental del medio abiótico del Anexo 11, se observa que hay una zona marcada de sensibilidad media y otra zona de sensibilidad baja, posiblemente porque, como se explicó anteriormente, algunas capas solo tenían calificación para ciertas zonas del área de estudio, entonces el resto se deduciría era sensibilidad baja; otra razón puede ser por los porcentajes de ponderación. En cuanto al medio biótico, se ve que el río tiene una sensibilidad muy alta, algunas zonas sensibilidad alta, y la mayoría sensibilidad media, lo cual se puede explicar también por porcentajes de ponderación asignados y las características del medio expuestas anteriormente.

En el medio socioeconómico, se observan zonas con sensibilidad baja y otras con sensibilidad media, lo cual puede estar relacionado con las características socioeconómicas y no por la metodología.

En la Anexo 12, se puede ver que la zonificación final de la metodología 2-C, posee niveles de sensibilidad desde el alto hasta el bajo, teniendo gran mayoría de las áreas en el medio (amarillo) y muy pocas en el alto (naranja), lo cual se explica con las características del territorio, y debido a que esta metodología de cruce es una suma ponderada, y cuando existan varios cruces con extremos, la sensibilidad tenderá al medio.

5.3.2.4. Metodología 3 – D

La definición de rangos de sensibilidad ambiental por atributos para la metodología de calificación 3, se encuentra en el Anexo 13.

En esta metodología, se modificó la parte de calificación de la importancia, debido a que la definición original de esta hace referencia a la capacidad de prestación de bienes y/o servicios ambientales, sociales, económicos y culturales; lo cual implicaba un análisis diferente y más profundo de cada atributo. Por lo tanto, se optó por calificar la importancia de acuerdo al área de influencia directa (importancia alta) e indirecta (importancia media o moderada) para cada medio, delimitada de acuerdo a la metodología del ANLA (2018). La importancia más baja se les dio a las áreas que no tenían calificación de sensibilidad o estaban por fuera del área de influencia directa o indirecta del proyecto.

En el medio abiótico (Anexo 14) se observa claramente, que en el área de influencia directa hay una sensibilidad/importancia alta (área donde se encuentra el Río Negro y área donde estará ubicado el túnel de conducción y las demás construcciones del proyecto). La zona con sensibilidad/importancia media es el área de influencia indirecta de este medio, y donde hay nivel bajo es la parte “menos” importante o con menos posibilidades de ser afectadas por el proyecto.

Las áreas de influencia directa e indirecta para el medio biótico son diferentes que las del abiótico. Las rondas hídricas, los nacimientos y las zonas donde hay flora o fauna amenazada, son el área de influencia directa del proyecto, y en este caso tienen una sensibilidad/importancia media y el Río, una

sensibilidad/importancia alta. Las demás zonas para este medio se encuentran calificadas con nivel “muy baja”, lo cual puede ser que en esas zonas no se encontró presencia de biodiversidad o atributos legales que influyeran en el promedio de calificación.

Respecto al medio socioeconómico, se observa que, en general tiene un nivel de sensibilidad/importancia medio, por lo explicado anteriormente para las demás metodologías. Una pequeña área tiene una sensibilidad muy baja (cola del embalse del Peñol), ya que no había calificación para ninguna de las capas existentes para este medio.

En esta metodología, los niveles de calificación van desde muy bajo a muy alto, pero en ninguno de los mapas intermedio hay un nivel “muy alto”, posiblemente porque hay más atributos con calificaciones “muy bajo” que “muy alto”, y eso hace que el promedio tienda a bajar y no a subir.

En la zonificación ambiental de la metodología 3-D (Anexo 15), se observa que las zonas con sensibilidad/importancia alta, hace alusión a las áreas más involucradas en el proyecto, como lo es el Río, algunas quebradas afluentes y algunos nacimientos. Sin embargo, en general se puede contemplar que, el mapa se encuentra con una sensibilidad/importancia media, y una pequeña área baja.

5.4. Comparación de metodologías aplicadas al caso de estudio

En el Anexo 16 es notorio como varía el porcentaje de área de acuerdo con los niveles de sensibilidad de las diferentes metodologías en el medio abiótico. La metodología 1-A (línea azul) y la 2-B (línea verde), tienen un comportamiento parecido, es decir, tienen porcentajes de áreas casi iguales en la sensibilidad baja, media y alta. Esto se puede afirmar con los mapas del medio abiótico (Anexo 5, 9, 11 y 14), donde estas dos metodologías poseen la misma delimitación de áreas dentro del polígono de interés. Lo anterior puede deberse a que en la M1-A, se hizo la intersección para los 8 componentes al mismo tiempo y se hizo una especie de promedio que dio como resultado la calificación final de sensibilidad. Igualmente, la metodología M2-C es la única que tiene un mayor porcentaje de área en sensibilidad baja, lo cual pudo generarse a que en la herramienta “suma ponderada” no se pueden poner los ceros (sin calificación) como unos (sensibilidad baja), por lo tanto, todo el promedio dio mucho más bajo que el de la metodología M2-B, quienes comparten la misma calificación de sensibilidad para los medios y componentes. Además, es posible advertir que la metodología 3-D es más equilibrada, es decir, tiene porcentajes de área no tan altos para los niveles de sensibilidad intermedios (alto, medio y bajo), sin embargo, tiene 0% en sensibilidad muy alta y un porcentaje muy pequeño para la sensibilidad “muy baja”.

Respecto a la sensibilidad para el medio biótico (Anexo 17) de todas las metodologías, se observa que ninguna tiene un comportamiento parecido a la otra, solo coinciden en el porcentaje de área para el nivel bajo, el cual es muy pequeño o no hay. Así mismo, es posible percibir que la metodología 2-B tiende a ser más alta que las demás, es decir, la mayoría del área con respecto al total del área de estudio es alta y el resto muy alta. Comportamiento que se ve puede ver explicado por los porcentajes de ponderación. También, se puede observar que, respecto a la sensibilidad media, la que más porcentaje de área tiene es la M2-C, seguida de la M1-A y la M3-D. Esta última, es la única que tiene dentro de sus niveles de calificación “muy baja”, y es el porcentaje de área más grande en esta metodología, lo cual puede explicarse por la cantidad de niveles que promedia (5 niveles) con relación a las demás metodologías que son 4 o 3.

Analizando los mapas de las cuatro metodologías de este medio (Anexo 5, 9, 11 y 14), se puede decir que la metodología M1-A y M3-D tienen las mismas áreas delimitadas, pero con diferente porcentaje de área para la sensibilidad media y alta, y con grandes diferencias en las sensibilidades más bajas. También, ocurre algo similar con la metodología 2-B y la 2-C, debido a que tienen la misma delimitación (diferente a las dos anteriores) pero difieren en la sensibilidad, es decir, las áreas que la M2-C tiene en sensibilidad “media”, M2-B las tiene en “alta” y las que M2-C las tiene en “alta”, M2-B las tiene en “muy alta”.

Según el Anexo 18, se puede observar que, para el medio socioeconómico, la sensibilidad alta y muy alta no tienen área definida o tienen un área muy pequeña para M2-B, M2-C y M3-D, es decir, para la mayoría de las metodologías, el medio socioeconómico tiene sensibilidad entre media y baja. La metodología M2-B y M3-D tienen un comportamiento similar, lo cual es posible visualizar en los mapas del medio socioeconómico, donde estas dos metodologías tienen áreas parecidas. Lo anterior, posiblemente, debido a que los porcentajes de ponderación de M2-B son los mismos para ambas dimensiones (Anexo 8) y en ambas metodologías se hizo un promedio de las calificaciones. Respecto a M1-A, es la única metodología que tiene un porcentaje de área grande para la sensibilidad alta, esto es porque varias áreas no tenían calificación y como en esta metodología no se hace un promedio, si no que se va evaluando por áreas, la mayoría quedaron altas por el atributo “estructura de la propiedad”.

En el Anexo 19, se puede ver que las cuatro metodologías tienen un comportamiento similar respecto al porcentaje de área. Con relación a la sensibilidad baja, se observa que la M1-A, la M2-B y la M3-D, tienen un porcentaje de área casi nulo, mientras que la M2-C tiene un 25% de área aproximadamente. Esto puede presentarse con base a lo mencionado anteriormente respecto al método de cruce; en la cual, se tenían en cuenta los ceros (áreas sin calificación de sensibilidad) para hacer el promedio, lo que hace que este baje en algunas celdas del ráster final, en este caso, a sensibilidad baja. Por otro lado, asociado a la sensibilidad media, se observa que el que más porcentaje de área tiene es la metodología 2-B, y la que menos tiene es la 2-C con un 74% aproximadamente, mientras que, en la sensibilidad baja, la que más porcentaje posee es M1-A con un 20%. Esta similitud en el comportamiento del porcentaje de áreas puede deberse a que a pesar de que la mayoría de los mapas temáticos dan un poco diferentes por causa de las metodologías, al fin y al cabo, todos son promedios y coinciden en el total de todos los atributos. Sin embargo, observando los mapas de zonificación final de las 4 metodologías (Anexo 6, 10, 12 y 15), se puede decir que difieren en la delimitación de las zonas de sensibilidad. La M3-D y la M1-A tienen áreas similares; y las M2-B y M2-C también tienen ciertas similitudes.

También, se puede decir que los resultados del medio biótico y la zonificación final tienen similitudes respecto a la delimitación de las áreas. Lo anterior pudo ser debido a que en las cuatro metodologías se le dio una calificación alta o muy alta para el componente legal dentro de este medio, además de tener un porcentaje alto de ponderación en la metodología 2 y una importancia alta en la 3.

En general, mientras más rangos tenga una metodología de calificación, mucho mejor, debido a que habrá mejor distribución de los resultados y se podrán calificar mejor los atributos. Sin embargo, en la metodología 3, que es donde más rangos de calificación hay, no se muestra que haya habido grandes distribuciones de la sensibilidad en los resultados finales, esto debido al cruce que hubo con la importancia, donde el rango solo iba de 2 a 4, por lo tanto, hacía que los datos se distribuyeran en este rango principalmente.

Conclusiones

En la metodología de calificación 1, la matriz de decisión no se cumple tal cual, debido a que, si una capa se considera más importante que otra en el análisis de zonificación, su calificación de sensibilidad tendrá más peso a la hora de hacer el cruce; esto dependerá de cada área de estudio y sus características físicas, bióticas y socioeconómicas.

A la hora de hacer el cruce cartográfico entre varias capas temáticas, es necesario tener en cuenta si se van a cruzar de a dos para aplicar la matriz de decisión que tiene cada metodología, o si por el contrario se van a cruzar todas al mismo tiempo. Debido a que las dos maneras generan resultados diferentes y el tiempo de aplicación es mayor en la primera opción. Para evitar sesgos, se sugiere aplicar la matriz de decisión e ir cruzando de a dos capas que tengan relación entre sí para poder analizar mejor a la hora de darles una calificación.

En general, para aplicar herramientas de superposición de mapas, es necesario tener datos en todo el polígono del área de estudio para todos los medios y componentes, debido a que el algoritmo interno de las herramientas, elimina las áreas que no están en común en todas las capas a superponer, lo cual ocasiona un sesgo en los resultados. Además, específicamente para la herramienta suma ponderada para zonificación ambiental, se recomienda no dejar ningún dato en 0, debido a que el modelo tiene en cuenta estos valores en el promedio, lo que ocasiona que disminuya lo que sería el resultado final y no se sabría con certeza si el área tiene la sensibilidad que arroja el resultado o es por falta de información en dicha área.

Es viable usar la herramienta calculadora ráster, en la cual se pueden hacer condicionales para que no tenga en cuenta las celdas con ceros, y haga el promedio con las que sí tienen valores mayores que 0. Esta herramienta se utilizó para la metodología 3, pero a pesar de esto, no se obtuvo mejores resultados con esta metodología, debido a que la calificación de los atributos fue diferente. Se podría hacer para la metodología 2 y así comparar mejor los resultados, analizando que tanto cambia el porcentaje de área de los niveles de sensibilidad, sin tener en cuenta los ceros. Además, una desventaja de la calculadora ráster, es que se debe invertir más tiempo a la hora de utilizarla, debido a que al realizar los condicionales, se debe hacer con mucha cautela para que no salgan errores a la hora de correr el modelo.

La metodología de asignación de pesos (M2) es muy útil, sin embargo, puede llegar a ser muy relativa, es decir, se deben elegir los pesos de ponderación de acuerdo con el criterio de expertos, teniendo en cuenta las características del lugar (tanto físicas y bióticas como socioeconómicas), y en general la importancia del atributo u componente en el sistema ambiental.

Finalmente, se concluye que la zonificación ambiental no es algo que pueda hacerse solo con promedios, debido a que muchas veces se debe entrar a analizar ciertas características antes de cruzar los atributos. Sin embargo, las herramientas de superposición ponderada y suma ponderada, se pueden utilizar siempre y cuando se analice muy bien a la hora de asignar los pesos, con el fin de obtener resultados más coherentes con las características del área de estudio. La calculadora ráster podría servir también en algunos casos, y utilizar los condicionales para zonas que tengan restricciones como áreas protegidas, nacimientos, etc., y que cuando el cruce cartográfico incluya estas áreas, se ponga la calificación de esta y no entre a competir con ninguna otra capa.

Referencias Bibliográficas

Alcaldía Municipal San Sebastián de Mariquita Tolima. (2002). *Plan de Ordenamiento Territorial San Sebastián de Mariquita Tolima 2002 - Zonificación*. Recuperado de: http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/M/mariquita_-_tolima_-_pot_-_2002/mariquita_-_tolima_-_pot_-_2002.asp

ArcGis (2016). Conceptos del conjunto de herramientas de Superposición. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-overlay-analysis.htm>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). Metodología para presentación y elaboración de estudios ambientales Recuperado de: <https://static1.squarespace.com/static/584873ef579fb33c12d56d14/t/5b670cc71ae6cf34101255d/1533480187007/Metodolog%C3%ADa+para+la+elaboracion+de+estudios+ambientales.pdf>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (ANLA) (2019). Recuperado de: <http://portal.anla.gov.co/estudio-impacto-ambiental>

- Concesión Tunel Aburrá-Oriente S.A. (CTAO) (2013). *Estudio de Impacto Ambiental Actualizado - Conexión Vial Aburrá - Oriente - Capítulo 6*. Recuperado de: http://www.cornare.gov.co/Audiencias_Publicas/Caracter_Ambiental/Tunel_de_Oriente/EIA-2013/capitulos/Capitulo_6.pdf
- Concesión Tunel Aburrá-Oriente S.A. (CTAO) (2013). *Estudio de impacto ambiental actualizado- conexion vial Aburra-Oriente. Capítulo 3*. Recuperado de: http://www.cornare.gov.co/Audiencias_Publicas/Caracter_Ambiental/Tunel_de_Oriente/EIA-2013/capitulos/Capitulo_3.1.pdf
- Confederación de empresarios de Andalucía (CEA) (2010). ¿Qué es un SIG? Recuperado de: <http://sig.cea.es/SIG>.
- Cornare (2014). Subregión Valles de San Nicolás. Recuperado de: <http://www.cornare.gov.co/corporacion/division-socio-ambiental/subregiones/151-subregion-valles-de-san-nicolas>
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2012). *Estudio de Impacto Ambiental Nueva Esperanza Capítulo 3.5 Zonificación Ambiental*. Recuperado de: [https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva Esperanza/CAP_3.5.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva_Esperanza/CAP_3.5.pdf)
- Environmental Systems Research Institute (Esri) (2016). *Conceptos del conjunto de herramientas de superposición*. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-overlay-analysis.htm>
- Environmental Systems Research Institute (Esri) (2016). *Conjunto de herramientas de superposición*. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-overlay-tools.htm>
- Environmental Systems Research Institute (Esri) (2017). ArcGis Resources. *Introducción a SIG*. Recuperado de: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>
- Environmental Systems Research Institute (Esri) (2018). *Calculadora Ráster*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/raster-calculator.htm>
- Environmental Systems Research Institute (Esri) (2018). *Calculadora Ráster*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/coverage-toolbox/intersect.htm>
- Escobar, M. E. (2016). Análisis de la sensibilidad ambiental por su importancia de las cuencas del municipio de Albania Guajira. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/15636>.
- Gobernación de Antioquia. (2013). *Estudio de Impacto Ambiental Actualizado - Conexión Vial Aburrá - Oriente - Capítulo 3*. Recuperado de: http://www.cornare.gov.co/Audiencias_Publicas/Caracter_Ambiental/Tunel_de_Oriente/EIA-2013/capitulos/Capitulo_3.1.pdf
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios (IDEAM) (2010). Guía para la ordenación y manejo de Cuencas Hidrográficas en Colombia. Bogotá.
- Maantay, J. (2001). Zoning, equity, and public health. *American Journal of Public Health*, 91(7), 1033.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2019). Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1451:plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-36>
- Montes Lira, P. F. (2001). El ordenamiento territorial como opción de políticas urbanas y regionales en América Latina y el Caribe. Cepal. Recuperado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5739/1/S01111024_es.pdf
- Ontivero, M., Martínez Vega, J., González Cascón, V. y Echavarría, P. (2008). PROPUESTA METODOLÓGICA DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL EN LA SIERRA DE ALTOMIRA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 251–280. Recuperado de: http://geofocus.rediris.es/2008/Articulo12_2008.pdf
- Osorio Rosado, C. A. (2017). Impactos ambientales de los proyectos hidroeléctricos en Colombia: el caso del Quimbo. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Derecho. Bogotá, Colombia
- Pi Épsilon S.A.S., EPM (2012). Diagnóstico Ambiental de Alternativas Proyecto Hidroeléctrico El Sireno. Capítulo 3: Caracterización Ambiental.
- Pi Épsilon S.A.S., Mincivil (2015). Estudio de Impacto Ambiental Hidroeléctrica Escuela de Minas. Capítulo 3. Caracterización del área de influencia del proyecto.
- Pijao, S.A.S. (2016). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA HIDROTOTARE*. Recuperado de: https://www.cortolima.gov.co/hidrototare/documentacion/EIA_Hidrototare.pdf
- Provoste, Y. (2005). Zonificación para la planificación territorial. Ministerio de Planificación. Gobierno de Chile. Santiago. 8pp.
- Rebolledo, R. (2009). *Modelo de sensibilidad ambiental basado en la valoración de relaciones espaciales*. 229–232. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281652536_MODELO_DE_SENSIBILIDAD_AMBIENTAL_BASADO_EN_LA_VALORACION_DE_RELACIONES_ESPACIALES
- Romero Calcerrada, R. (2002). Metodología para la planificación y desarrollo sostenible en espacios naturales protegidos europeos: las zonas de especial protección para las aves. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 1–32. Retrieved from http://geofocus.rediris.es/docPDF/articulo1_2002.pdf
- Sandia, L. A., & Henao, A. (1983). *SENSIBILIDAD AMBIENTAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Recuperado de: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal8/Nuevastecnologias/Sig/01.pdf>
- SINCHI, Instituto amazónico de investigaciones científicas. (2016). SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN Y EL ORDENAMIENTO AMBIENTAL DE LA ZRFA (zonificación de la reserva forestal de la Amazonía). Recuperado de: https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES_DIGITALES/Zonificación_Ambiental_y_Ordenamiento_de_la_Reserva_Forestal_de_la_Amazonia/1_Sistemas_General_Zonificación/1_SG1_Síntesis_Zonificación_y_Ordenamiento_ZRFA.pdf

Suarez Camargo, G., Anzola Espinosa, F., & Ramirez, G. (2016). *Leyenda Temática Para Zonificación Ambiental*. Recuperado de: [http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7863/1/LEYENDA TEMATICA PARA ZONIFICACION AMBIENTAL_GEORGE SUAREZ CAMARGO 20072025099.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7863/1/LEYENDA_TEMATICA_PARA_ZONIFICACION_AMBIENTAL_GEORGE_SUAREZ_CAMARGO_20072025099.pdf)

Tuleda SerranoLuz, M. L., Molina Ruiz, J., & Albajadejo, M. V. (2000). METODOLOGÍA PRÁCTICA DE APLICACIÓN DE UN PROYECTO SIG EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE CEHEGÍN (MURCIA). *Papeles de Geografía*, 51, 155–167. Recuperado de: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/47481/45501>

Valencia, F., Angel, H., & Hernández, R. (2013). *CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA ESTUDIOS AMBIENTALES DE PROYECTOS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA TERRESTRE* (Universidad de Manizales). Recuperado de: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/789>

Villegas, E., Cifuentes, A., Contreras, D., & Fenandez, L. (2015). Ordenamiento territorial como instrumento, para la zonificación ambiental a través de la Estructura Ecológica Principal, como apoyo a la formulación de los POTs y los POMCAS en Colombia.

Zulaica, L., Ferraro, R., & Fabiani, L. (2009). Índices de sensibilidad ambiental en el espacio periurbano de Mar del Plata. *Geograficando*, 5(5), 187–211. Recuperado de: <http://faud.mdpu.edu.ar/revistas/index.php/ia/article/view/138>

Anexos

Anexo 1. Mapas temáticos utilizados en la zonificación ambiental por medio y por componente

Componente	Mapa temático	Atributos
Medio abiótico		
Geomorfología	Pendientes	Unidades por rango de pendientes
Suelos	Vocación de uso de la tierra	Unidades de vocación de uso: agrícola, pecuario, forestal y agroforestal.
	Conflicto uso del suelo	Mapa de zonificación de los conflictos de uso del suelo en uso adecuado, sobreutilizado y subutilizado.
Geotecnia	Zonificación de aptitud geológica	Para el área de influencia directa se utilizará el mapa susceptibilidad geológica y geomorfológica. Unidades según aptitud: zonas aptas, zonas aptas con restricciones moderadas, zonas aptas con restricciones altas y zonas no aptas - inestabilidad
Amenazas naturales	Categorización de las amenazas por inundación, remoción en masa y avenidas torrenciales.	Unidades según grado de amenaza: alta, media y baja.
Agua	Índice de calidad del agua	Calidad del agua en el tramo del río afectado por el proyecto.
	Usos y usuarios del agua	Uso y usuarios del agua en las corrientes afectadas por el proyecto.
Agua Subterránea	Vulnerabilidad de los acuíferos	Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica estimado para condiciones naturales (línea base) y disponibilidad hídrica, según la recarga simulada para año normal.

Componente	Mapa temático	Atributos
		Vulnerabilidad alta, media y baja.
Paisaje	Calidad Visual del paisaje	Unidades según la calidad visual del paisaje: muy alta, alta, media y baja.
Aire	Calidad del Aire	Puntos de muestreo de calidad del aire (PM10) interpolados al área de influencia.
	Ruido Ambiental	Interpolación de los puntos de medición de ruido y calificación de acuerdo a la norma de cada uno (luego se puede hacer una superposición o promedio de todos (4 shapes))
Medio biótico		
Ecosistemas terrestres Componente legal	Estructura ecológica	<p>Determinantes ambientales (establecidos en la normatividad vigente):</p> <p>Sistema de áreas protegidas del nivel nacional, regional y local. Acuerdo 294 de 2013 de CORNARE.</p> <p>Áreas de especial importancia ecosistémica: páramos y subpáramos, nacimientos de aguas, rondas hidráulicas, zonas de recarga de acuíferos, humedales y reservas de fauna y flora.</p> <p>Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad.</p> <p>Corredores biológicos.</p> <p>Ronda hídrica (Acuerdos 251 de 2011)</p> <p>Suelos de Protección definidos en los PBOT de los municipios de Marinilla, San Vicente y El Peñol.</p>
Ecosistemas terrestres	Coberturas de la tierra y usos del suelo	Las coberturas clase 3 del mapa de Estudio Semidetallado de Coberturas Terrestres del departamento de Antioquia, con ajustes realizados en el presente estudio-
	Flora amenazada	Zonas donde se localiza fauna en algún grado de amenaza
	Fauna amenazada	Zonas donde se localiza fauna en algún grado de amenaza
	Diversidad Flora	Índice Shannon de 4 puntos en cobertura con vegetación secundaria o en transición
	Diversidad Fauna	Índice Shannon de Aves y Mamíferos por coberturas (2 shapes)
Ecosistemas acuáticos	Diversidad de especies	Tramo del río con alta diversidad de especies por grupo (índice Simpson)
Medio socioeconómico		
Dimensión cultural	Componente arqueológico	Áreas de reglamentación especial: Patrimonio cultural
	Componente étnico	Áreas de reglamentación especial: resguardos indígenas y comunidades negras.
Dimensión Demográfica	Densidad de población	Unidades según la densidad de población.
	Población en miseria	Unidades en Porcentaje de la población en miseria
Dimensión económica	Concesiones mineras	Polígonos de áreas tituladas y en solicitud
	Estructura de la propiedad	Tamaño predominante del predio por vereda

Anexo 2. Tabla de metodologías para calificar la sensibilidad ambiental

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados	Criterio de valoración	Método estadístico	Zonificación Final	
<p>SINCHI, I. amazónico de investigaciones científicas. (2016). SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN Y EL ORDENAMIENTO AMBIENTAL DE LA ZRFA. Recuperado de: https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES DIGITALES/Zonificación Ambiental y Ordenamiento de la Reserva Forestal de la Amazonia/1 Sistemas General Zonificación/1 SG1 Síntesis Zonificación y Ordenamiento ZRFA.pdf</p>	<p>La zonificación ambiental y ordenamiento de la Zona de Reserva Forestal de la Amazonia – ZRF - Síntesis de la metodología para la zonificación y el ordenamiento ambiental de la ZRFA</p>	<p>Físico-Biótico (Flora, fauna, suelo, agua)</p>	<p>índice de vegetación remanente, riqueza de especies, exclusividad de especies, singularidad de ecosistemas, stock de CO2 en bosques; riqueza de especies, especies amenazadas, especies endémicas, calidad de hábitat, especie paisaje Jaguar; carbono orgánico, fertilidad del suelo, susceptibilidad a la degradación del paisaje; densidad de drenajes, escasez.</p>	<p>Valor intrínseco del paisaje natural</p>	<p>Se asignan valores de ponderación</p>	<p>Primera versión de zonificación</p>	<p>Segunda versión de zonificación</p>
		<p>Valor social y productivo-valor patrimonial (predial, socio-económico)</p>	<p>Densidad poblacional, presencia institucional, composición y distribución poblacional, calidad de vida, participación ciudadana; accesibilidad, población económica activa, uso del suelo, carga de ganado; tamaño predios respecto a UAF, índice de concentración de la tierra, tenencia de la tierra; participación comunitaria, densidad lingüística, patrimonio mueble, patrimonio inmueble, patrimonio inmaterial, dependencia naturaleza-cultura.</p>	<p>Valor del paisaje cultural</p>	<p>Se asignan valores de ponderación</p>		
		<p>Conflictos ambientales, Presiones antrópicas, amenazas naturales</p>	<p>uso, ocupación; deforestación, praderización, degradación actual del paisaje, fragmentación; remoción en masa, susceptibilidad a la inundación, sismicidad.</p>	<p>Conflictos, presiones y amenazas</p>	<p>Se asignan valores de ponderación</p>		
		<p>Económico</p>	<p>Producción de madera, producción de productos forestales no maderables, pesquero, de fauna (ecoturismo), de uso agropecuario, regulación hídrica, de hidrocarburos, minero.</p>	<p>Potencialidades del Territorio</p>	<p>Se asignan valores de ponderación</p>		

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados			Zonificación Final	
<p>Ontivero, M., Martínez Vega, J., González Cascón, V. y Echavarría, P. (2008), PROPUESTA METODOLÓGICA DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL EN LA SIERRA DE ALTOMIRA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica, 251–280. Recuperado de: http://geofocus.rediris.es/2008/Articulo12_2008.pdf</p>	<p>Propuesta metodológica de zonificación ambiental en la sierra de altomira mediante sistemas de información geográfica</p>	<p>Valor del patrimonio natural</p>	<p>zonas de especial protección para aves, lugares de importancia comunitaria, hábitats de importancia comunitaria, montes de utilidad pública</p>	<p>Valor del territorio en función de las figuras de protección</p>	<p>Se asignan valores de 0 a 1, se suman todos los valores y se divide entre 4</p>	<p>(2*VTFF+VIP)/3</p>	<p>Mapa de usos de suelo+MPN</p>
			<p>Rareza o singularidad, representatividad, proximidad a la clímax, índice de diversidad de Simpson (SIDI), índice de entremezclado y yuxtaposición (II), índice de conectividad (CONNECT)</p>	<p>Valor intrínseco del paisaje</p>	<p>Valores de ponderación</p>		
<p>Valencia, F., Angel, H., & Hernández, R. (2013). CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA ESTUDIOS AMBIENTALES DE PROYECTOS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA TERRESTRE (Universidad de Manizales). Recuperado de: http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/789</p>	<p>Construcción de un modelo de zonificación ambiental para estudios ambientales de proyectos de exploración sísmica terrestre</p>	<p>Físico</p>	<p>Estabilidad geotécnica, hidrogeología superficial, pendiente</p>	<p>Sensibilidad Ambiental (sumatoria físico, biótico y socioeconómico) Muy alta (80-100), alta (60-80), moderada (40-60), baja (20-40), muy baja (0-20)</p>	<p>Se le asigna un valor de 1-9 y luego se suman</p>	<p>Mapas de cada uno</p>	<p>Manejo de la actividad de acuerdo a la sensibilidad ambiental (áreas de exclusión, áreas de intervención con restricción, áreas de intervención) Zonificación de la actividad.</p>
		<p>Biótico</p>	<p>Bosques, rastrojos, cultivos, pastos, suelos desnudos, construido</p>		<p>Se le asigna un valor de 1 a 50</p>	<p>Mapa de cobertura vegetal</p>	
		<p>Socio-Económico</p>	<p>Zonas de uso intensivo, de uso semintensivo, de bajo uso, calidad de vida, organización comunitaria, tenencia de la tierra</p>		<p>Se les asigna un valor de 1-9</p>	<p>Mapas zonas de uso, calidad de vida, organización comunitaria y de tenencia de la tierra.</p>	
<p>Normativo</p>	<p>Áreas de exclusión (restricción legal), áreas de intervención con restricción (restricción ambiental),</p>	<p>Aislamientos (restricciones)</p>	<p>Análisis de distancias mínimas al área e exclusión</p>	<p>Mapa de restricciones</p>			

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados			Zonificación Final
<p>(EPM), E. P. de M. (2012). Estudio de Impacto Ambiental Nueva Esperanza Capítulo 3.5 Zonificación Ambiental. Recuperado de: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva Esperanza/CAP_3.5.pdf</p>	<p>Estudio de Impacto Ambiental se formula para adelantar el trámite de licenciamiento del proyecto de transmisión eléctrica Nueva Esperanza línea 500 kV (NVAE-AM-EIA-500-001)</p>	<p>Medio físico, biótico y socioeconómico. Normativa</p>	<p>Condición económica, condición social, capacidad organizativa e institucional e interés arqueológico. Restricciones ambientales</p>	<p>Vulnerabilidad alta (fragilidad), vulnerabilidad media (importancia), vulnerabilidad baja (potencialidad)</p>	<p>Importancia=potencialidad+sensibilidad+fragilidad</p> <p>Alto Entre 17 y 24 Medio Entre 9 y 16 Bajo Entre 1 y 8</p>	<p>Mapas de importancia ambiental</p>
<p>Gobernación de Antioquia. (2013). Estudio de Impacto Ambiental Actualizado - Conexión Vial Aburrá - Oriente - Capítulo 3. Recuperado de: http://www.comare.gov.co/Audiencias_Publicas/Caracter_Ambiental/Tunel_de_Oriente/EIA-2013/capitulos/Capitulo_3.1.pdf</p>	<p>Estudio de impacto ambiental Conexión Vial Aburrá-Oriente 2013</p>	<p>Medio físico, biótico y socioeconómico</p>	<p>Variables de calificación: Zonificación física 50% (amenaza y riesgos 30%, calidad del recurso hídrico – ICA 15%, disponibilidad del recurso hídrico 40%, conflicto de uso 15%), biótica 20% (áreas protegidas 20%, especies de fauna y flora amenazadas o endémicas 15%, coberturas vegetales 30%, conectividad ecológica 15%, calidad hidrobiológica – BMWP 20%), Socioeconómica 30% (infraestructura vial 5%, equipamientos sociales 5%, densidad poblacional 10%, actividades productivas 20%, organización social 10% y demanda del recurso hídrico 30%).</p>	<p>Sensibilidad Ambiental, importancia para cada componente y restricciones legales</p>	<p>Método de ponderación: tres escalas cualitativas de importancia: alta, media y baja, de acuerdo con el grado de importancia de los criterios definidos y caracterizados para los componentes físico, biótico y socioeconómico, se establecen categorías dentro de la evaluación de la sensibilidad en los diferentes componentes.</p>	<p>11 Mapas de sensibilidad ambiental</p>
<p>Camargo, G. S., Espinosa, F. A., & Bogotá, D. C. (2016). Leyenda Temática Para Zonificación Ambiental. Recuperado de: http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7863/1/LEYENDA TEMATICA PARA ZONIFICACION AMBIENTAL_GEORGE SUAREZ CAMARGO 20072025099.pdf</p>	<p>Leyenda temática para zonificación ambiental</p>	<p>Abiótico (Físico), Biótico, Socioeconómico, Normativo</p>	<p>Técnica De Medidas De Extremas Medidas De Dispersión: Rango, Recorrido O Amplitud Total</p> <p>R = Máx - Mín</p> <p>Con el fin de medir el mayor o menor grado de separación de las observaciones, en una primera instancia se define el RANGEO (también denominado recorrido o amplitud total), como la diferencia existente entre los valores máximo y mínimo observados.</p>  <p>Ilustración 3. Ejemplo Máximos.</p>	<p>Evaluación de sensibilidad (muy alta, alta, moderada, baja, muy baja) (biótico, físico y socioeconómico)- correlación-> Síntesis de importancia (Alta, media, baja) (biótico, físico, socioeconómico y normativo)</p>	<p>función de máximos en el cruce de información, garantizando así que independientemente de la interrelación de los aspectos, los criterios con una calificación más relevante serán los que sobresalgan en la síntesis final</p>	<p>Mapa en términos de sensibilidad</p>

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados			Zonificación Final																													
			<table border="1" data-bbox="909 411 1225 603"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Importancia</th> <th colspan="5">Sensibilidad</th> </tr> <tr> <th>Muy Alta</th> <th>Alta</th> <th>Moderada</th> <th>Baja</th> <th>Muy Baja</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alta</td> <td>Muy Alta</td> <td>Alta</td> <td>Moderada</td> <td>Moderada</td> <td>Baja</td> </tr> <tr> <td>Medía</td> <td>Alta</td> <td>Moderada</td> <td>Moderada</td> <td>Baja</td> <td>Baja</td> </tr> <tr> <td>Baja</td> <td>Moderada</td> <td>Moderada</td> <td>Baja</td> <td>Baja</td> <td>Muy Baja</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="958 587 1176 603"><i>Tabla 11. Matriz de Correlación Sensibilidad e Importancia.</i></p>	Importancia	Sensibilidad					Muy Alta	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja	Alta	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baja	Medía	Alta	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Muy Baja	<p data-bbox="1256 296 1435 512">Importancia ambiental es considerada como su capacidad de ofrecer bienes y/o servicios ambientales, sociales, económicos y/o culturales hacia su entorno, ya sean de soporte, regulación o provisión.</p> <p data-bbox="1256 568 1435 719">Sensibilidad Ambiental: grado de fragilidad de los elementos del sistema y se manifiesta en el nivel de tolerancia, estabilidad o resiliencia</p>	No aplica	Mapa en términos de sensibilidad /importancia
Importancia	Sensibilidad																																		
	Muy Alta	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja																														
Alta	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baja																														
Medía	Alta	Moderada	Moderada	Baja	Baja																														
Baja	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Muy Baja																														
<p data-bbox="219 759 495 951">Alcaldía Municipal San Sebastián de Mariquita Tolima. (2002). Plan de Ordenamiento Territorial San Sebastián de Mariquita Tolima 2002 - Zonificación. Recuperado de: http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/M/mariquita_-_tolima_-_pot_-_2002/mariquita_-_tolima_-_pot_-_2002.asp</p>	<p data-bbox="521 823 719 887">Plan de Ordenamiento Territorial San Sebastián de Mariquita Tolima 2002</p>	<p data-bbox="750 839 878 871">Físico, biótico, socioeconómico</p>	<p data-bbox="909 775 1225 927">Unidades de especial significado ambiental, unidades de producción agropecuaria, de producción turística, de producción minera, de amenaza y riesgo, unidades urbanas, unidades de paisaje, uso y aprovechamiento de la tierra, sistemas de producción</p>	<p data-bbox="1256 743 1435 959">Unidades de especial significación ambiental, unidades de producción agropecuaria, unidades de producción turística, unidades de producción minera, unidades de amenaza y riesgo, unidades urbanas</p>	No se especifica	<p data-bbox="1704 839 2002 871">Tabla con zonas y unidades de manejo ambiental</p>																													
<p data-bbox="219 991 495 1142">Zulaica, L., Ferraro, R., & Fabiani, L. (2009). Índices de sensibilidad ambiental en el espacio periurbano de Mar del Plata. Geograficando, 5(5), 187–211. Recuperado de: http://faud.mdp.edu.ar/revistas/index.php/ia/article/view/138</p>	<p data-bbox="521 991 719 1142">Índices de sensibilidad ambiental en el espacio periurbano de Mar del Plata / Environmental sensitivity indexes in Mar del Plata's surrounding area</p>	<p data-bbox="750 1023 878 1110">Factores del medio natural, del medio socioeconómico</p>	<p data-bbox="909 1015 1225 1118">aguas superficiales, aguas subterráneas, geomorfología, suelos, vegetación; población: condiciones de vida, infraestructura. unidades de paisaje, uso de suelos dominantes,</p>	<p data-bbox="1256 1046 1435 1086">índice de sensibilidad ambiental</p>	<p data-bbox="1467 967 1659 1158">se valoran con escala cuantitativa (0-3), ISA= sumatoria de los índices parciales de sensibilidad ambiental. Luego metodología de ponderación (se le asignan porcentajes a cada componente)</p>	<p data-bbox="1691 1046 2018 1086">Mapa de sensibilidad ambiental del espacio periurbano de Mar del Plata</p>																													
<p data-bbox="219 1206 495 1334">Escobar, M. E. (2016). Análisis de la sensibilidad ambiental por su importancia de las cuencas del municipio de Albania Guajira. Recuperado de: http://hdl.handle.net/10654/15636.</p>	<p data-bbox="521 1190 719 1342">Análisis de la sensibilidad ambiental por su importancia de la cuenca alta del arroyo Jotomahana en el Municipio de Albania Guajira</p>	<p data-bbox="750 1238 878 1294">Abiótico, Biótico y socioeconómico</p>	<p data-bbox="909 1214 1225 1318">amenaza por deslizamiento, hidrogeología, pendientes; cobertura de la tierra, áreas protegidas; densidad poblacional, resguardos indígenas, uso actual</p>	<p data-bbox="1256 1238 1435 1294">Cruce entre importancia y sensibilidad</p>	<p data-bbox="1467 1238 1659 1294">Promedio por medio (biótico...), y luego las 3 (suma ponderada)</p>	<p data-bbox="1720 1254 1984 1278">Mapa de sensibilidad/importancia</p>																													

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados			Zonificación Final
Rebolledo, R. (2009). Modelo de sensibilidad ambiental basado en la valoración de relaciones espaciales. 229–232. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281652536_MODELO_DE_SENSIBILIDAD_AMBIENTAL_BASADO_EN_LA_VALORACION_DE_RELACIONES_ESPACIALES	Modelo de sensibilidad ambiental basado en la valoración de relaciones espaciales	físico+infraestructura, biótico, legal	Hidrogeografía, geología, geomorfología, vialidad; vegetación y uso de la tierra; normas, planes de ordenación, regulaciones y restricciones de uso.	Sensibilidad (en términos de vulnerabilidad y resiliencia (elasticidad, amplitud, maleabilidad, histéresis, amortiguación))	Valoración cuantitativa compleja	Mapa de sensibilidad ambiental
Calcerrada, R. (2002). Metodología para la planificación y desarrollo sostenible en espacios naturales protegidos europeos: las zonas de especial protección para las aves. GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica, 1–32. Recuperado de: http://geofocus.rediris.es/docPDF/articulo1_2002.pdf	Metodología para la planificación y desarrollo sostenible en espacios naturales protegidos europeos: las zonas de especial protección para las aves.	Físico-Biótico	Idoneidad y potencialidad constructiva (Litología, hidrología, geomorfología y geotecnia)	Valoración constructiva de los terrenos	No aplica	Mapa de idoneidad y potencialidad constructiva
			Factor pendiente, factor riesgo de erosión, factor suelo, factor deficiencia climática	Capacidad general de uso agrario del terreno		
			Factor clima (temperaturas y precipitación), factor suelo (profundidad, textura, drenaje, pH), factor lugar (altitud, posición fisiográfica)	Aptitud relativa del terreno para especies forestales		
			Factor relieve (altura, pendiente, orientación), Factor vegetación (estructura vertical de la vegetación, grado de cobertura, especies vegetales), factor clima (temperatura media anual, temperatura media anual de las máximas), Factor agua (red hidrográfica y embalses)	Capacidad general de uso turístico-recreativo del medio físico		
Tuleda SerranoLuz, M. L., Molina Ruiz, J., & Albajadejo, M. V. (2000). METODOLOGÍA PRÁCTICA DE APLICACIÓN DE UN PROYECTO SIG EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE CEHEGÍN (MURCIA). Papeles de Geografía, 51, 155–167. Recuperado de: https://revistas.um.es/geografia/articulo/view/47481/45501	Metodologías práctica de aplicación de un proyecto SIG en el término municipal Decehegín (Murcia)	Físico-Biótico	Altitudes (altitudes superiores de 500 M), pendientes % (pendientes inferiores del 10%), suelos(suelos aptos), Vegetación (vegetación apta). Proximidad de carreteras (carreteras con exclusión de 30m), proximidad de cauces (cauces con exclusión de 30m), proximidad del embalse de argos (pantano con exclusión de 300m)	Criterios que debe cumplir la zona urbanizable	No se especifica	Mapa de zonas aptas para establecer urbanizaciones

Fuente	Nombre del proyecto	Características del territorio	Componentes utilizados			Zonificación Final
Sandía, L. A., & Henao, A. (1983). SENSIBILIDAD AMBIENTAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. Recuperado de: http://observatoriageograficoamericualatina.org.mx/egal8/Nuevastechnologias/Sig/01.pdf	Sensibilidad ambiental y sistemas de información geográfica (áreas de protección de los recursos naturales potencialmente más frágiles y áreas de desarrollo)	Físico-Biótico	Relieve, Balance geomorfológico, Litología, sismicidad (riesgo sísmico), formación vegetal, dosel, densidad, intervención	Criterios de sensibilidad (valoradas en función de la fragilidad del elemento ante la acción del hombre)	Diferente calificación al nivel de fragilidad del elemento. Ponderación de los índices	Mapa de sensibilidad ambiental de la cuenca de interés
Pi Épsilon, Mincivil (2015). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico Escuela de Minas. Capítulo 3: Caracterización del área de influencia del proyecto.	Estudio de impacto ambiental de la Hidroeléctrica Escuela de Minas - Capítulo 3.5 Zonificación	Físico, biótico y socioeconómico	Pendiente, amenazas, zonificación de aptitud geológica, vocación de uso de la tierra, índice de calidad del agua, usos y usuarios del agua, calidad visual del paisaje, estructura del paisaje, estructura ecológica componente legal, unidades de coberturas vegetales, ecosistemas terrestres amenazados, diversidad de especies acuáticas, componente arqueológico, componente étnico, equipamientos, densidad de población, porcentaje de población en miseria, polígonos de áreas tituladas y en solicitud.	Sensibilidad ambiental	Cualitativo, sensibilidad alta, media y baja	Mapa de sensibilidad ambiental
Pi Épsilon S.A.S., EPM (2017). Diagnóstico Ambiental de Alternativas Proyecto Hidroeléctrico El Sireno. Metodología de Zonificación Ambiental.	Diagnóstico Ambiental de Alternativas Proyecto Hidroeléctrico El Sireno	Físico, biótico y socioeconómico	Abiótico (Pendiente, sectorización geotécnica, conflictos de uso del suelo, uso potencial del suelo, vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea, calidad del paisaje, calidad del agua, usuarios del agua), Biótico (áreas de conservación y protección ambiental, coberturas vegetales, especies endémicas o con algún grado de amenaza, diversidad de especies de flora y fauna, fragmentación del paisaje, conectividad, diversidad de especies acuáticas, presencia de especies de fauna íctica en amenaza), Socioeconómico (sitios de interés cultural, equipamientos, accesibilidad, necesidades básicas intrínsecas, nivel de escolaridad, actividad económica principal, producción agropecuaria, estructura de la propiedad, tenencia de la tierra).	Sensibilidad ambiental	Ponderación de atributos	Mapa de sensibilidad ambiental

Anexo 3. Selección de métodos de superposición de mapas

Nombre de la técnica	Descripción	Tipo de capa de entrada	¿Requiere asignar pesos?	Tipo de análisis de conjuntos utilizados	Posibilidad de aplicación a las metodologías de calificación
superposición ponderada (Ponderate)	<p>coloca los datos de entrada en una escala definida (la escala predeterminada es de 1 a 9), pesa los rásteres de entrada y los agrupa. Las ubicaciones más favorables para cada criterio de entrada se reclasificarán y se colocarán en los valores más altos, como el 9.</p> <p>En la herramienta Superposición ponderada, los pesos asignados a los rásteres de entrada deben ser igual al 100 por ciento. Las capas se multiplican por el multiplicador correcto y, para cada celda, se agrupan los valores resultantes. La Superposición ponderada presupone que los factores más favorables tienen como resultado los valores más altos en el ráster de salida; por lo tanto, identifica estas ubicaciones como las mejores</p>	Rásteres enteros	Si (1-10)	Los criterios de entrada se multiplican por los pesos y luego se suman	Si
Suma Ponderada	<p>Al utilizar la herramienta Suma ponderada, complementada con otras herramientas de Spatial Analyst, se puede realizar un análisis de superposición extra. Se deben reclasificar los valores de las capas de entrada antes de utilizar la herramienta Suma ponderada. A diferencia de los pesos de la herramienta Superposición ponderada, los pesos asignados a los rásteres de entrada pueden tener cualquier valor y no es necesario que se agreguen a una suma específica. Al sumar los rásteres de entrada, los valores de salida de la herramienta Suma ponderada son el resultado directo de la suma de la multiplicación de cada valor por los pesos. A diferencia de la Superposición ponderada, los valores no se vuelven a colocar en una escala definida; por lo tanto, mantiene la resolución de los atributos de los valores introducidos en el modelo. La Suma ponderada presupone que los factores más favorables tienen como resultado los valores más altos en el ráster de salida final; por lo tanto, identifica estas ubicaciones como las mejores</p>	Rásteres enteros o de puntos flotantes	Si	Multiplica los valores de campo designados para cada ráster de entrada por el peso específico, después suma todos los rásteres de entrada	Si

Superposición difusa	<p>El análisis de Superposición difusa está basado en la teoría de conjuntos. La teoría de conjuntos es una disciplina matemática que cuantifica la relación de pertenencia de fenómenos a conjuntos específicos. Por lo general, en la Superposición difusa, un conjunto corresponde a una clase. Los tres primeros pasos son iguales: defina el problema, divida el problema en submodelos y determine las capas significativas. Al igual que lo hace la Superposición ponderada y la Suma ponderada, el análisis de Superposición difusa reclasifica o transforma los valores de los datos en una escala común, pero los valores transformados definen si la posibilidad de pertenecer a un conjunto especificado, como el de los valores de pendiente, se transforma en la posibilidad de pertenecer al conjunto de adecuación favorable (de 0 a 1, donde 1 pertenece definitivamente al conjunto). En la Superposición ponderada y la Suma ponderada, los valores se encuentran en una escala de relación de preferencia, donde los valores más altos son más favorables, a diferencia de las posibilidades de pertenencia que tienen en la Superposición difusa. Debido a que los valores transformados representan las posibilidades de pertenencia a los conjuntos, en el análisis de Superposición difusa, no se pesan los rásteres de entrada. En el paso Agregue y combine del análisis de superposición general, la Superposición difusa difiere de la Superposición ponderada y de la Suma ponderada. El paso de combinación en el análisis de Superposición difusa cuantifica la posibilidad que tiene cada ubicación de pertenecer a conjuntos especificados de diversos rásteres de entrada.</p>	Ráster de pertenencia difusa	No	teoría de conjuntos, indica la fortaleza de la pertenencia a un conjunto	si
Raster Calculator	<p>Construye y ejecuta una expresión simple de Álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python en una interfaz similar a una calculadora. Con esta herramienta se pueden sumar, restar, y hacer operaciones booleanas con las capas en formato ráster.</p>	Ráster	No necesariamente (elección propia)	Suma, resta multiplicación y división	Si
Intersection	<p>calcula la intersección geométrica de dos coberturas. Solo las entidades del área común a ambas coberturas se conservarán en la cobertura de salida.</p>	Polígono	No	Intersección geométrica (multiplicación de las capas)	Si

Anexo 4. Rangos de calificación de sensibilidad ambiental por atributos, para la metodología 1

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad	
		Rango	Categoría
Pendiente	Áreas con mayor pendiente presentan una alta fragilidad por su inestabilidad, y con ello, mayor sensibilidad. Se establecen tres categorías para su evaluación.	Mayor del 75%	Alta
		Entre 25 y 75%	Media
		Entre 0 y 25%	Baja
Amenazas por remoción en masa	Áreas con mayor susceptibilidad a las amenazas naturales presentan una mayor fragilidad por su inestabilidad y representa un riesgo para el proyecto.	Amenaza alta	Alta
		Amenaza media	Media
		Amenaza baja	Baja
Zonificación de aptitud geológica y geomorfológica	Para el área de influencia directa se utilizará el mapa susceptibilidad geológica y geomorfológica.	Zonas no aptas - inestabilidad	Alta
		Zonas aptas con restricciones moderadas y zonas aptas con restricciones altas	Media
		Zonas aptas,	Baja
Amenazas por inundación	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta
		Amenaza media	Media
		Amenaza baja	Baja
Amenaza por avenidas torrenciales	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta
		Amenaza media	Media
		Amenaza baja	Baja
Uso potencial de la tierra	Áreas de importancia para el desarrollo socioeconómico local y regional, por su uso potencial económico de la tierra.	Agrícola	Alta
		Pecuaria y mixto (mosaicos pastos y cultivos)	Media
		Agroforestal y forestal	Baja
Conflictos de uso del suelo	Suelos en conflicto de uso del suelo por sobreutilización es más sensible a las intervenciones antrópicas y tienen menos capacidad de recuperación.	Suelos en conflicto por sobreutilización	Alta
		Suelos en conflicto por subutilización	Baja
		Suelos sin conflicto	Baja
Índice de calidad del agua –ICOMO. Mide la contaminación por materia orgánica.	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por calidad y potencial uso. Los valores altos indican aguas muy contaminadas y los bajos, poca contaminación. En términos de importancia para potenciales usos, los valores bajos presentan una mayor calidad.	Valores mayores a 0,6 entre captación y cola del embalse	Baja
		Valores entre 0,4 – 0,6. En la quebrada Honda es medio, antes de la captación y de la cola del embalse a la descarga.	Media
		Valores menores de 0,4	Alta
Usos y usuarios del agua	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por su uso doméstico y agropecuario.	Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen más de 10 usuarios o surte acueducto veredal o municipal.	Alta
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen entre 0 y	Media

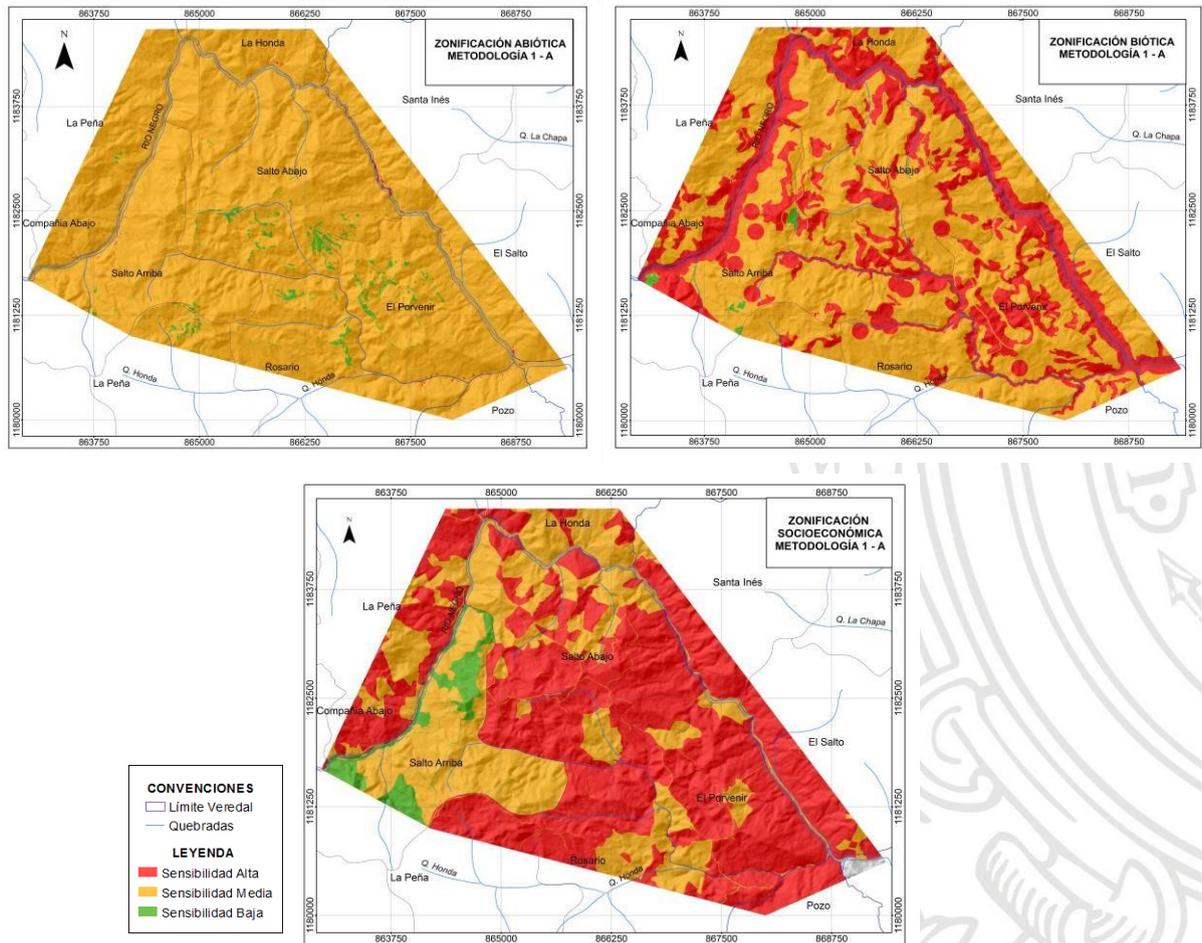
Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad	
		Rango	Categoría
		10 usuarios	
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que no abastecen ningún usuario.	Baja
Aguas subterráneas	Vulnerabilidad Actual de los acuíferos.	Vulnerabilidad Alta	Alta
		Vulnerabilidad Media	Media
		Vulnerabilidad Baja	Baja
Calidad visual del paisaje	Categorización de la calidad visual del paisaje. A mayor calidad mayor su importancia.	Calidad visual muy alta	Alta
		Calidad visual alta y media	Media
		Calidad visual baja	Baja
Calidad del aire	PM10 promedios en ug/Nm3. Según normativa cumplen cuando están por debajo de los 50 ug/Nm3.	>= 50 ug/Nm3	Alta
		40 - 50 ug/Nm3	Media
		< 40 ug/Nm3	Baja
Ruido Ambiental	Diurno Laboral y dominical subsector industrial	<70 dBA	Baja
		70-75 dBA	Media
		>75 dBA	Alta
	Diurno Laboral y dominical subsector Rural	<50 dBA	Baja
		50-55 dBA	Media
		>55 dBA	Alta
	Nocturno Laboral y Dominical subsector industrial	<65 dBA	Baja
		65-70 dBA	Media
		>70 dBA	Alta
	Nocturno Laboral y Dominical subsector Rural	<45 dBA	Baja
		45-50 dBA	Media
		>50 dBA	Alta
Estructura ecológica Componente legal	Áreas de alta importancia ambiental para la protección de los recursos naturales y que hacen parte de la estructura ecológica de la zona en estudio según lo establecido en la normatividad vigente.	Sistema de áreas protegidas del nivel nacional, regional y local. Acuerdo 294 de 2013 de CORNARE.	Alta
		Áreas de especial importancia ecosistémica: páramos y subpáramos, nacimientos de aguas, rondas hidráulicas, zonas de recarga de acuíferos, humedales y reservas de fauna y flora. Ronda hídrica (Acuerdos 251 de 2011).	Alta
		Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad.	Alta
		Corredores biológicos.	Alta
		Suelos de Protección definidos en los PBOT.	Alta
Unidades de coberturas del mapa de coberturas realizado con base al	Las áreas con mayor naturalidad son de gran importancia ambiental, local y regional, ya que juegan un papel importante en el mantenimiento de las	Bosques: natural denso, natural fragmentado, de galería o ripario, e inundable, y vegetación esclerófila, de páramo, subpáramo rupícola y	Alta

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad	
		Rango	Categoría
nivel 3 del Estudio Semidetallado de Coberturas Terrestres del departamento de Antioquia (2007) y ajustes realizados a partir del trabajo de campo del presente estudio	funciones ecosistémicas de los bosques y conservación de los recursos naturales. Se asigna una calificación de alto a bajo teniendo en cuenta el estado de conservación de la cobertura vegetal, siendo alto para las coberturas con mayor naturalidad como los bosques y bajo para las coberturas más intervenidas.	ríos.	
		Bosque plantado, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, herbazal, vegetación secundaria o en transición, pastos arbolados y pastos enmalezados.	Media
		Áreas urbanas y de infraestructura (relleno sanitario, vías, escuelas), cultivos de hortalizas y permanentes, pastos limpios, tierras desnudas y degradadas y cuerpos de agua artificiales.	Baja
Ecosistemas terrestres	Especies de flora amenazada.	Zonas donde se localiza fauna en algún grado de amenaza. Estas áreas son: captación, cobertura en el punto de muestreo 2 sobre el alineamiento del túnel, cobertura #2 en la vereda La Peña, Finca don Eduardo Henao	Alta
		Especies de fauna amenazada	Zonas donde se localiza fauna en algún grado de amenaza. No encontró especies amenazadas
	Diversidad de especies de fauna terrestre. Índice de Shannon	H > 2,3	Alta
		1,8 < H < 2,3	Media
		H < 1,80	Baja
	Diversidad flora	H > 2,3	Alta
		1,8 < H < 2,3	Media
H < 1,80		Baja	
Ecosistemas acuáticos	Diversidad de especies dada por el Índice de diversidad de Simpson λ . Valores cercanos a cero indican diversidad alta y a uno, baja.	$\lambda < 0,20$ (Honda, captación – cola del embalse)	Alta
		$0,20 \leq \lambda \leq 0,60$ (antes captación, cola del embalse – descarga)	Media
		$\lambda > 0,60$	Baja
Componente arqueológico	Áreas de importancia cultural por estar declaradas como patrimonio cultural	Zonas donde se localicen Áreas de Patrimonio arqueológico declarado.	Alta
Componente étnico	Áreas de importancia cultural y que tienen una reglamentación especial: resguardos indígenas y comunidades negras.	Zonas donde se localicen resguardos indígenas y comunidades negras.	Alta
Densidad de población	Veredas según la densidad de población.	Densidad mayor de 100 hab/Km ²	Alta
		Densidad entre 50 y 100 hab/Km ²	Media
		Densidad menor de 50 hab/Km ²	Baja
Porcentaje de población en miseria (PPM).	Unidades según el valor del NBI. Veredas con una alta vulnerabilidad dada la calidad de vida de sus habitantes.	PPM > 75%	Alta
		PPM entre 75 y 25%	Media
		PPM < 25%	Baja
Polígonos de áreas tituladas y en solicitud.	Áreas de importancia económica por la explotación minera	Áreas con título minero	Alta
		Áreas con solicitud	Media

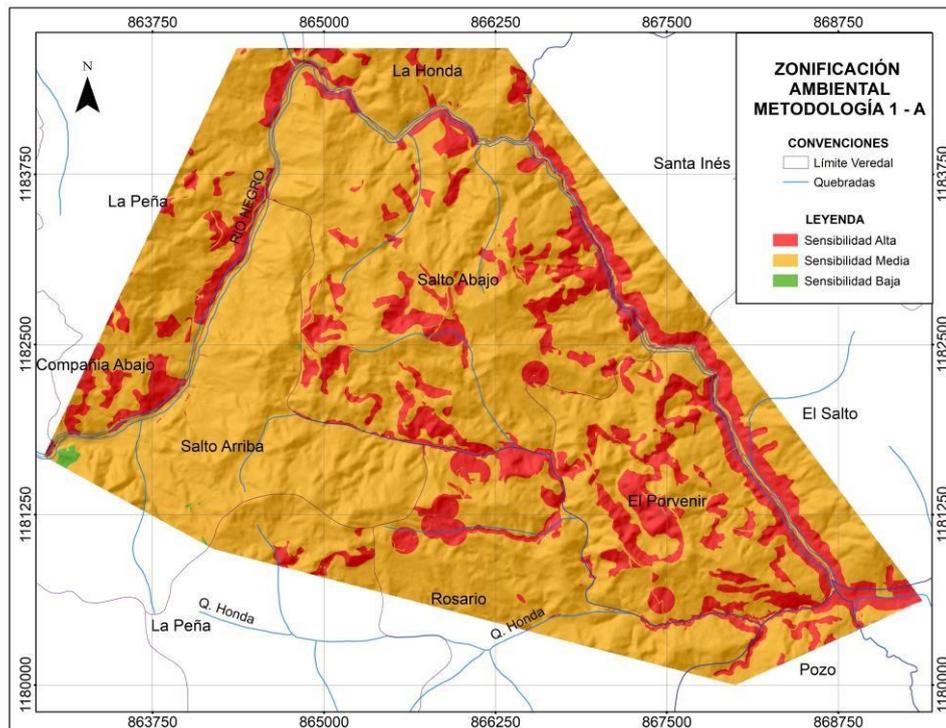
Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad	
		Rango	Categoría
Estructura de la propiedad	Tamaño predominante del predio por vereda. Más pequeño el predio mayor la vulnerabilidad del hogar.	Microfundio y minifundio (0 -10 ha)	Alta
		Pequeña y mediana propiedad (10,1 - 200 ha)	Media
		Gran propiedad (200,1 ha en adelante)	Baja

Fuente: Modificado de Pi epsilon (2015).

Anexo 5. Sensibilidad ambiental del medio abiótico (superior izquierda), biótico (superior derecha) y socioeconómico (imagen inferior) de la metodología 1-A



Anexo 6. Mapa de zonificación ambiental de la metodología 1-A



Anexo 7. Rangos de calificación de sensibilidad ambiental por atributos, para la metodología 2

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango		
Pendiente	Áreas con mayor pendiente presentan una alta fragilidad por su inestabilidad, y con ello, mayor sensibilidad. Se establecen tres categorías para su evaluación.	Mayor del 75%	Muy Alta	4
		Entre 50 y 75%	Alta	3
		Entre 25 y 50%	Media	2
		Entre 0 y 25%	Baja	1
Amenazas por remoción en masa	Áreas con mayor susceptibilidad a las amenazas naturales presentan una mayor fragilidad por su inestabilidad y representa un riesgo para el proyecto.	Amenaza alta	Alta	3
		Amenaza media	Media	2
		Amenaza baja	Baja	1
Zonificación de aptitud geológica y geomorfológica	Para el área de influencia directa se utilizará el mapa susceptibilidad geológica y geomorfológica.	Zonas no aptas (Inestables o por normatividad)	Muy Alta	4
		zonas aptas con restricciones altas	Alta	3
		Zonas aptas con restricciones moderadas	Media	2
		Zonas aptas	Baja	1
Amenazas por inundación	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta	3
		Amenaza media	Media	2
		Amenaza baja	Baja	1

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
Amenaza por avenidas torrenciales	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta	3
		Amenaza media	Media	2
		Amenaza baja	Baja	1
Uso potencial de la tierra	Áreas de importancia para el desarrollo socioeconómico local y regional, por su uso potencial económico de la tierra.	Agrícola	Alta	3
		Pecuaria y mixto (mosaicos pastos y cultivos)	Media	2
		Agroforestal y Forestal	Baja	1
Conflictos de uso del suelo	Suelos en conflicto de uso del suelo por sobreutilización es más sensible a las intervenciones antrópicas y tienen menos capacidad de recuperación	Suelos en conflicto por sobreutilización	Alta	3
		Suelos en conflicto por subutilización	Baja	1
		Suelos sin conflicto (Adecuado)	Baja	1
Índice de calidad del agua – ICOMO. Mide la contaminación por materia orgánica.	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por calidad y potencial uso. Los valores altos indican aguas muy contaminadas y los bajos, poca contaminación. En términos de importancia para potenciales usos, los valores bajos presentan una mayor calidad.	Valores mayores a 0,6 entre captación y cola del embalse	Baja	1
		Valores entre 0,4 – 0,6. En la quebrada Honda es medio, antes de la captación y de la cola del embalse a la descarga.	Media	2
		Valores menores de 0,4	Alta	3
Usos y usuarios del agua	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por su uso doméstico y agropecuario.	Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen más de 10 usuarios o surte acueducto veredal o municipal.	Alta	3
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen entre 0 y 10 usuarios.	Media	2
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que no abastecen ningún usuario.	Baja	1
Aguas Subterráneas	Vulnerabilidad actual de los acuíferos	Vulnerabilidad alta	Alta	3
		Vulnerabilidad media	Media	2
		Vulnerabilidad baja	Baja	1
Calidad visual del paisaje	Categorización de la calidad visual del paisaje. A mayor calidad mayor su importancia.	Calidad visual muy alta	Muy Alta	4
		Calidad visual alta	Alta	3
		Calidad visual media	Media	2
		Calidad visual baja	Baja	1
Calidad del aire	PM10 promedios en ug/Nm3. Según normativa cumplen cuando están por debajo de los 50 ug/Nm3.	> 50 ug/Nm3	Alta	3
		40 - 50 ug/Nm3	Media	2
		< 40 ug/Nm3	Baja	1
Ruido Ambiental	Diurno Laboral y dominical subsector industrial	<70 dBA	Baja	1
		70-75 dBA	Media	2
		>75 dBA	Alta	3

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
	Diurno Laboral y dominical subsector Rural	<50 dBA	Baja	1
		50-55 dBA	Media	2
		>55 dBA	Alta	3
	Nocturno Laboral y Dominical subsector industrial	<65 dBA	Baja	1
		65-70 dBA	Meda	2
		>70 dBA	Alta	3
	Nocturno Laboral y Dominical subsector Rural	<45 dBA	Baja	1
		45-50 dBA	Media	2
		>50 dBA	Alta	3
Estructura ecológica Componente legal	Áreas de alta importancia ambiental para la protección de los recursos naturales y que hacen parte de la estructura ecológica de la zona en estudio según lo establecido en la normatividad vigente.	Sistema de áreas protegidas del nivel nacional, regional y local. Acuerdo 294 de 2013 de CORNARE.	Muy Alta	4
		Áreas de especial importancia ecosistémica: páramos y subpáramos, nacimientos de aguas, rondas hidráulicas, zonas de recarga de acuíferos, humedales y reservas de fauna y flora. Ronda hídrica (Acuerdos 251 de 2011).	Muy Alta	4
		Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad.	Muy Alta	4
		Corredores biológicos.	Muy Alta	4
		Suelos de Protección definidos en los PBOT.	Muy Alta	4
Unidades de coberturas del mapa de coberturas realizado con base al nivel 3 del Estudio Semidetallado de Coberturas Terrestres del departamento de Antioquia (2007) y ajustes realizados a partir del trabajo de campo del presente estudio	Las áreas con mayor naturalidad son de gran importancia ambiental, local y regional, ya que juegan un papel importante en el mantenimiento de las funciones ecosistémicas de los bosques y conservación de los recursos naturales. Se asigna una calificación de alto a bajo teniendo en cuenta el estado de conservación de la cobertura vegetal, siendo alto para las coberturas con mayor naturalidad como los bosques y bajo para las coberturas más intervenidas.	Bosques: natural denso, natural fragmentado, de galería o ripario, e inundable, y vegetación esclerófila, de páramo, subpáramo rupícola y ríos.	Alta	3
		Bosque plantado, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, herbazal, vegetación secundaria o en transición, pastos arbolados y pastos enmalezados.	Media	2
		Áreas urbanas y de infraestructura (relleno sanitario, vías, escuelas), cultivos de hortalizas y permanentes, pastos limpios, tierras desnudas y degradadas y cuerpos de agua artificiales.	Baja	1
Ecosistemas terrestres	Especies de flora amenazada.	En peligro crítico (CR)	Muy Alta	4
		En Peligro (EN)	Alta	3
		Vulnerable (VU)	Media	2
		Casi amenazada (NT) o Preocupación menor (LC)	Baja	1
	Especies de fauna amenazada	En peligro crítico (CR)	Muy Alta	4
		En Peligro (EN)	Alta	3

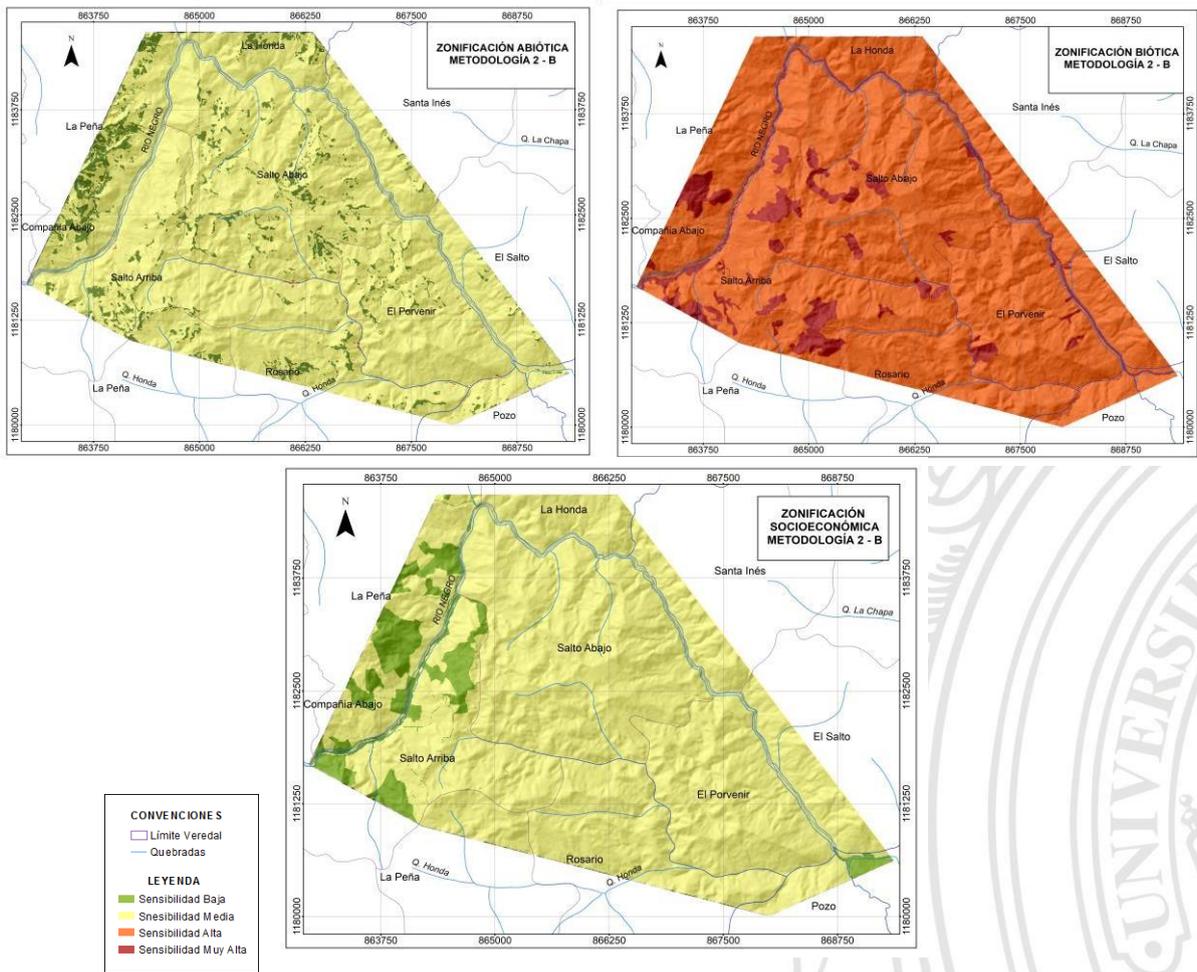
Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
		Vulnerable (VU)	Media	2
		Casi amenazada (NT) o Preocupación menor (LC)	Baja	1
	Diversidad de especies de fauna terrestre. Índice de Shannon Wiener (H)	H > 2,3	Muy Alta	4
		2,1 < H < 2,3	Alta	3
		1,80 < H < 2,1	Media	2
		H < 1,80	Baja	1
	Diversidad flora por cobertura. Se emplea índice de Shannon Wiener (H). Para flora valores de H > 3 representan una diversidad alta. Valores entre 2,5 y 3,0 representan diversidad moderada y su estabilidad es moderada. Valores inferiores a 2,5 representan una baja diversidad. En bosques tropicales H varía generalmente entre 2,5 y 5. Los rangos propuestos se adaptan de Mokoginta (2016). Mayor su diversidad mayor su potencial para la conservación del ecosistema.	H > 2,3	Muy Alta	4
		2,1 < H < 2,3	Alta	3
		1,80 < H < 2,1	Media	2
		H < 1,80	Baja	1
Ecosistemas acuáticos	Diversidad de especies dada por el Índice de diversidad de Simpson λ . Valores cercanos a cero indican diversidad alta y a uno, baja.	$\lambda < 0,20$ (Honda, captación – cola del embalse)	Alta	3
		$0,20 \leq \lambda \leq 0,60$ (antes captación, cola del embalse – descarga)	Media	2
		$\lambda > 0,60$	Baja	1
Componente arqueológico	Áreas de importancia cultura por estar declaradas como patrimonio cultural	Zonas donde se localicen Áreas de Patrimonio arqueológico declarado.	Muy Alta	4
Componente étnico	Áreas de importancia cultural y que tienen una reglamentación especial: resguardos indígenas y comunidades negras.	Zonas donde se localicen resguardos indígenas y comunidades negras.	Muy Alta	4
Densidad de población	Veredas según la densidad de población.	Densidad mayor de 100 hab/Km ²	Alta	3
		Densidad entre 50 y 100 hab/Km ²	Media	2
		Densidad menor de 50 hab/Km ²	Baja	1
Porcentaje de población en miseria (PPM).	Unidades según el valor del NBI. Veredas con una alta vulnerabilidad dada la calidad de vida de sus habitantes.	PPM > 75%	Alto	3
		PPM entre 75 y 25%	Medio	2
		PPM < 25%	Bajo	1
Polígonos de áreas tituladas y en solicitud.	Áreas de importancia económica por la explotación minera	Áreas con título minero	Muy Alta	4
		Áreas con solicitud	Alta	3
Estructura de la propiedad	Tamaño predominante del predio por vereda. Más pequeño el predio mayor la vulnerabilidad del hogar.	Microfundio y minifundio (0 -10 ha)	Alta	3
		Pequeña y mediana propiedad (10,1 - 200 ha)	Media	2
		Gran propiedad (200,1 ha en adelante)	Baja	1

Fuente: Modificado de pi épsilon (2015)

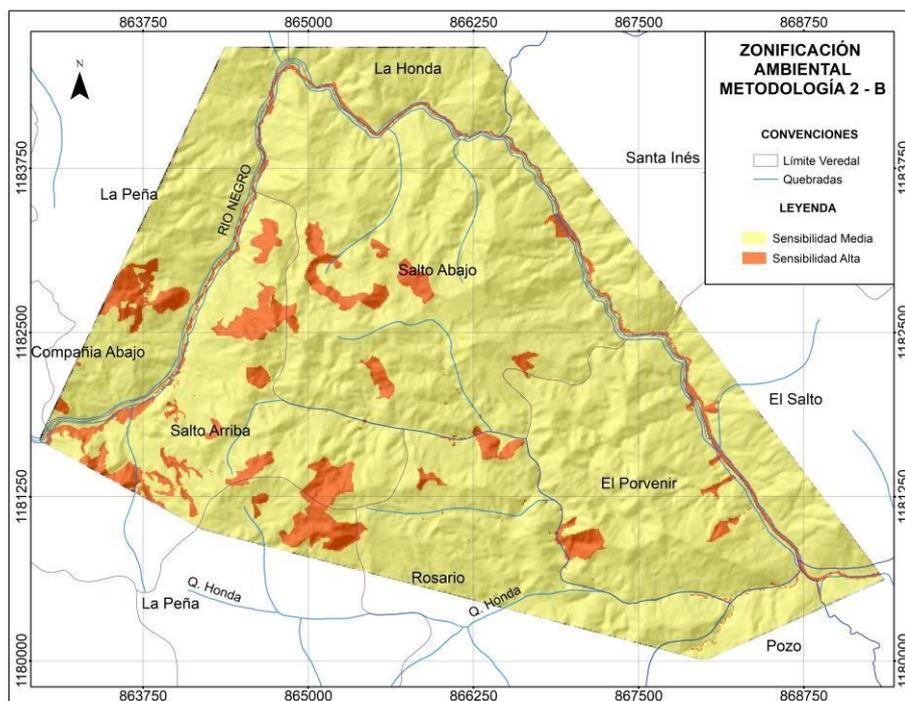
Anexo 8. Porcentajes de ponderación de la metodología 2

Medio	Componente	Mapa temático
Abiótico (30%)	Geomorfología (12%)	Pendientes
	Suelos (12%)	Vocación de uso de la tierra (40%)
		Conflicto uso del suelo (60%)
	Geotecnia (15%)	Zonificación de aptitud geológica
	Amenazas naturales (15%)	Categorización de las amenazas por inundación (33%), remoción en masa (34%) y avenidas torrenciales (33%).
	Agua superficial (20%)	Índice de calidad del agua (40%)
		Usos y usuarios del agua (60%)
	Agua Subterránea (10%)	Vulnerabilidad de los acuíferos
Paisaje (8%)	Calidad Visual del paisaje	
Aire (8%)	Calidad del Aire (50%)	
	Ruido Ambiental (50%)	
Biótico (40%)	Ecosistemas terrestres Componente legal (40%)	Estructura ecológica
	Ecosistemas terrestres (30%)	Coberturas de la tierra y usos del suelo (35%)
		Flora amenazada (25%)
		Diversidad Flora (20%)
		Diversidad Fauna (20%)
Ecosistemas acuáticos (30%)	Diversidad de especies	
Socioeconómico (30%)	Dimensión Demográfica (50%)	Densidad de población (60%)
		Porcentaje de población en miseria (PPM). (40%)
	Dimensión económica (50%)	Estructura de la propiedad (45%)
		Concesiones mineras (55%)

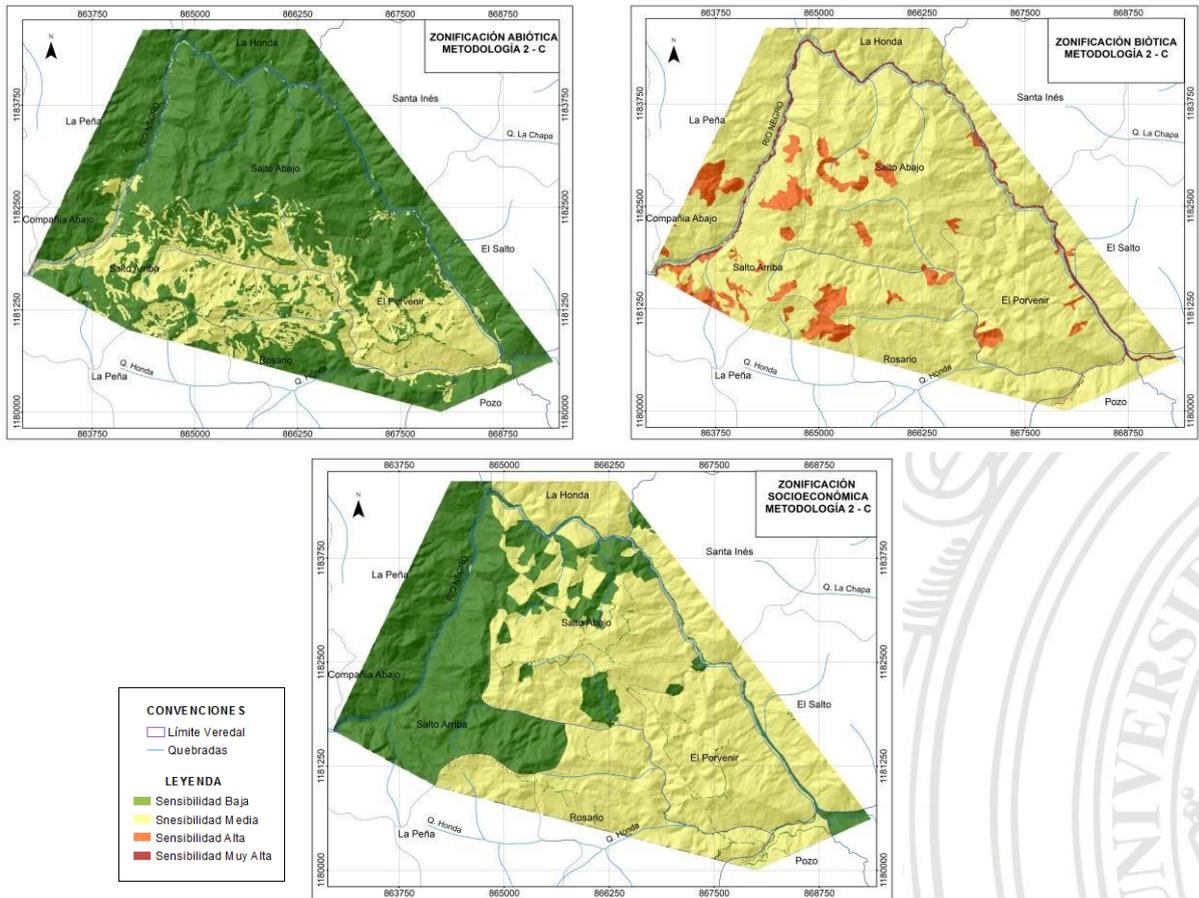
Anexo 9. Sensibilidad ambiental del medio abiótico (superior izquierda), biótico (superior derecha) y socioeconómico (imagen inferior) de la metodología 2-B



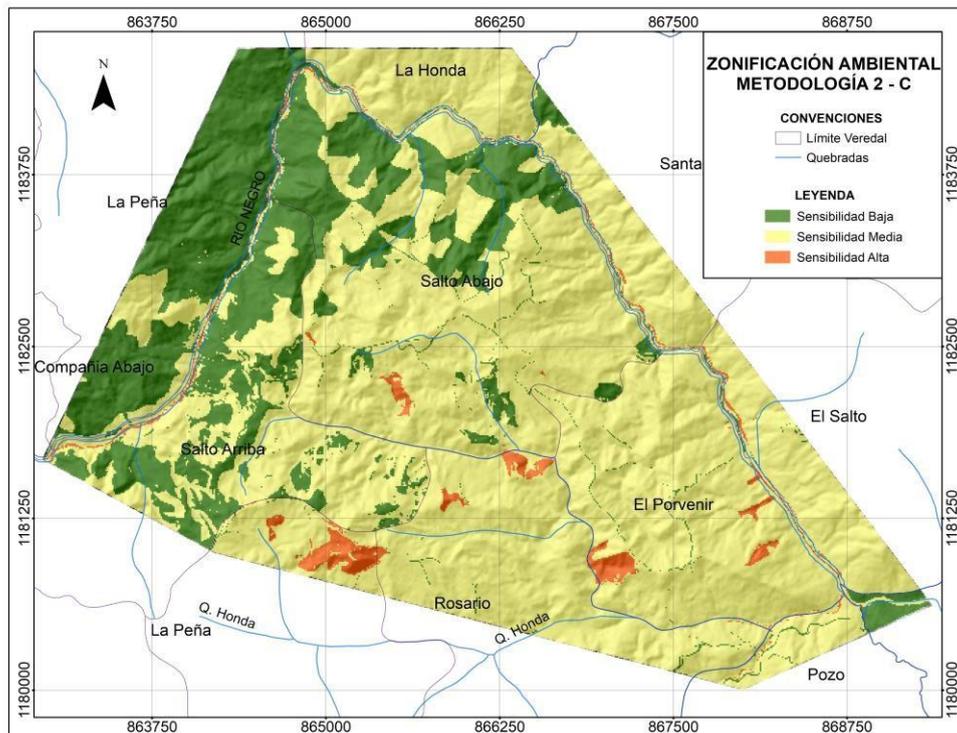
Anexo 10. Mapa de zonificación ambiental de la metodología 2-B



Anexo 11. Sensibilidad ambiental del medio abiótico (superior izquierda), biótico (superior derecha) y socioeconómico (imagen inferior).



Anexo 12. Zonificación ambiental de la metodología 2-C



Anexo 13. Rangos de calificación de sensibilidad ambiental por atributos, para la metodología 3.

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango		
Pendiente	Áreas con mayor pendiente presentan una alta fragilidad por su inestabilidad, y con ello, mayor sensibilidad. Se establecen tres categorías para su evaluación.	Mayor de 100%	Muy Alta	5
		Entre 75% y 100%	Alta	4
		Entre 50 y 75%	Media	3
		Entre 25 y 50%	Baja	2
		Entre 0 y 25%	Muy Baja	1
Amenazas por remoción en masa	Áreas con mayor susceptibilidad a las amenazas naturales presentan una mayor fragilidad por su inestabilidad y representa un riesgo para el proyecto.	Amenaza alta	Alta	4
		Amenaza media	Media	3
		Amenaza baja	Baja	2
Zonificación de aptitud geológica y geomorfológica	Para el área de influencia directa se utilizará el mapa susceptibilidad geológica y geomorfológica.	Zonas no aptas (Inestables o por normatividad)	Alta	4
		zonas aptas con restricciones altas	Media	3
		Zonas aptas con restricciones moderadas	Baja	2
		Zonas aptas	Muy Baja	1
Amenazas por inundación	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta	4
		Amenaza media	Media	3
		Amenaza baja	Baja	2
Amenaza por avenidas torrenciales	Categorización de la amenaza por inundación. Áreas con amenaza alta presentan mayor vulnerabilidad y fragilidad.	Amenaza alta	Alta	4
		Amenaza media	Media	3
		Amenaza baja	Baja	2
Uso potencial de la tierra	Áreas de importancia para el desarrollo socioeconómico local y regional, por su uso potencial económico de la tierra.	Agrícola	Alta	4
		Pecuaría y mixto (mosaicos pastos y cultivos)	Media	3
		Agroforestal	Baja	2
		Forestal	Muy Baja	1
Conflictos de uso del suelo	Suelos en conflicto de uso del suelo por sobreutilización es más sensible a las intervenciones antrópicas y tienen menos capacidad de recuperación	Suelos en conflicto por sobreutilización	Alta	4
		Suelos en conflicto por subutilización	Baja	2
		Suelos sin conflicto (Adecuado)	Muy Baja	1
Índice de calidad del agua – ICOMO. Mide la contaminación por materia orgánica.	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por calidad y potencial uso. Los valores altos indican aguas muy contaminadas y los bajos, poca contaminación. En términos de	Valores mayores a 0,6 entre captación y cola del embalse	Baja	2
		Valores entre 0,4 – 0,6. En la quebrada Honda es medio, antes de la captación y de la cola del embalse a la descarga.	Media	3

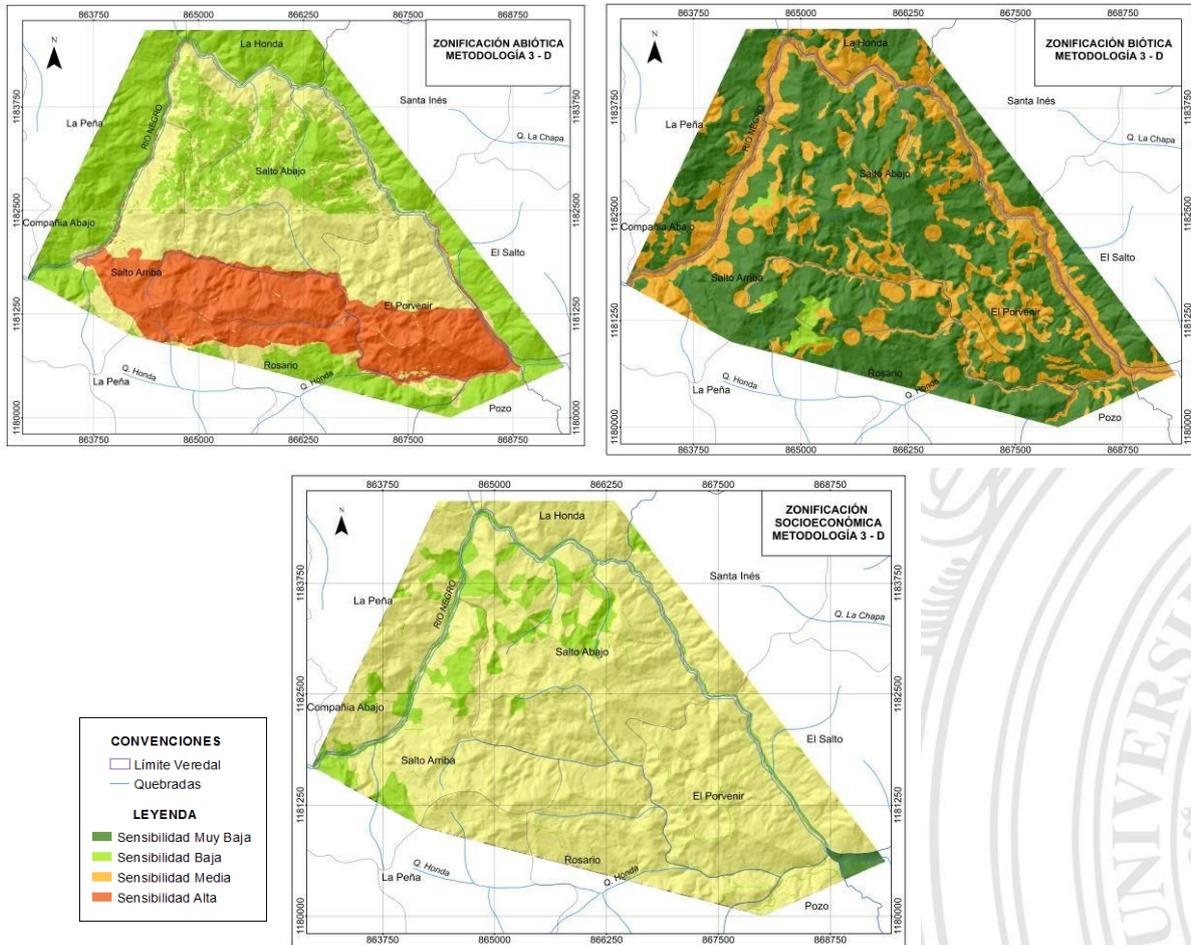
Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
	importancia para potenciales usos, los valores bajos presentan una mayor calidad.	Valores menores de 0,4	Alta	4
Usos y usuarios del agua	Corrientes de importancia para el desarrollo socioeconómico por su uso doméstico y agropecuario.	Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen más de 10 usuarios o surte acueducto veredal o municipal.	Alta	4
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que abastecen entre 0 y 10 usuarios.	Media	3
		Nacimientos, corrientes o tramos de corrientes que no abastecen ningún usuario.	Baja	2
Aguas Subterráneas	Vulnerabilidad actual de los acuíferos	Vulnerabilidad alta	Alta	4
		Vulnerabilidad media	Media	3
		Vulnerabilidad baja	Baja	2
Calidad visual del paisaje	Categorización de la calidad visual del paisaje. A mayor calidad mayor su importancia.	Calidad visual muy alta	Muy Alta	5
		Calidad visual alta	Alta	4
		Calidad visual media	Media	3
		Calidad visual baja	Baja	2
Calidad del aire	PM10 promedios en ug/Nm3. Según normativa cumplen cuando están por debajo de los 50 ug/Nm3.	> 50 ug/Nm3	Alta	4
		40 - 50 ug/Nm3	Media	3
		< 40 ug/Nm3	Baja	2
Ruido Ambiental	Diurno Laboral y dominical subsector industrial	<70 dBA	Baja	2
		70-75 dBA	Media	3
		>75 dBA	Alta	4
	Diurno Laboral y dominical subsector Rural	<50 dBA	Baja	2
		50-55 dBA	Media	3
		>55 dBA	Alta	4
	Nocturno Laboral y Dominical subsector industrial	<65 dBA	Baja	2
		65-70 dBA	Media	3
		>70 dBA	Alta	4
	Nocturno Laboral y Dominical subsector Rural	<45 dBA	Baja	2
		45-50 dBA	Media	3
		>50 dBA	Alta	4
Estructura ecológica Componente legal	Áreas de alta importancia ambiental para la protección de los recursos naturales y que hacen parte de la estructura ecológica de la zona en estudio según lo establecido en la normatividad vigente.	Sistema de áreas protegidas del nivel nacional, regional y local. Acuerdo 294 de 2013 de CORNARE.	Muy Alta	5
		Áreas de especial importancia ecosistémica: páramos y subpáramos, nacimientos de aguas, rondas hidráulicas, zonas de recarga de acuíferos, humedales y reservas de fauna y flora. Ronda hídrica (Acuerdos 251 de 2011).	Muy Alta	5

Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
		Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad.	Muy Alta	5
		Corredores biológicos.	Muy Alta	5
		Suelos de Protección definidos en los PBOT.	Muy Alta	5
Unidades de coberturas del mapa de coberturas realizado con base al nivel 3 del Estudio Semidetallado de Coberturas Terrestres del departamento de Antioquia (2007) y ajustes realizados a partir del trabajo de campo del presente estudio	Las áreas con mayor naturalidad son de gran importancia ambiental, local y regional, ya que juegan un papel importante en el mantenimiento de las funciones ecosistémicas de los bosques y conservación de los recursos naturales. Se asigna una calificación de alto a bajo teniendo en cuenta el estado de conservación de la cobertura vegetal, siendo alto para las coberturas con mayor naturalidad como los bosques y bajo para las coberturas más intervenidas.	Bosques: natural denso, natural fragmentado, de galería o ripario, e inundable, y vegetación esclerófila, de páramo, subpáramo rupícola y ríos.	Alta	4
		Bosque plantado, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, herbazal, vegetación secundaria o en transición, pastos arbolados y pastos enmalezados.	Media	3
		Áreas urbanas y de infraestructura (relleno sanitario, vías, escuelas), cultivos de hortalizas y permanentes, pastos limpios, tierras desnudas y degradadas y cuerpos de agua artificiales.	Baja	2
Ecosistemas terrestres	Especies de flora amenazada.	En peligro crítico (CR)	Muy Alta	5
		En Peligro (EN)	Alta	4
		Vulnerable (VU)	Media	3
		Casi amenazada (NT) o Preocupación menor (LC)	Baja	2
	Especies de fauna amenazada	En peligro crítico (CR)	Muy Alta	5
		En Peligro (EN)	Alta	4
		Vulnerable (VU)	Media	3
		Casi amenazada (NT) o Preocupación menor (LC)	Baja	2
	Diversidad de especies de fauna terrestre. Índice de Shannon Wiener (H)	$H > 2,3$	Muy Alta	5
		$2,1 < H < 2,3$	Alta	4
		$1,80 < H < 2,1$	Media	3
		$H < 1,80$	Baja	2
	Diversidad flora por cobertura. Se emplea índice de Shannon Wiener (H). Para flora valores de $H > 3$ representan una diversidad alta. Valores entre 2,5 y 3,0 representan diversidad moderada y su estabilidad es moderada. Valores inferiores a 2,5 representan una baja diversidad. En bosques tropicales H varía generalmente entre 2,5 y 5. Los rangos propuestos se adaptan de Mokoginta (2016). Mayor su diversidad mayor su	$H > 2,3$	Muy Alta	5
		$2,1 < H < 2,3$	Alta	4
		$1,80 < H < 2,1$	Media	3
		$H < 1,80$	Baja	2

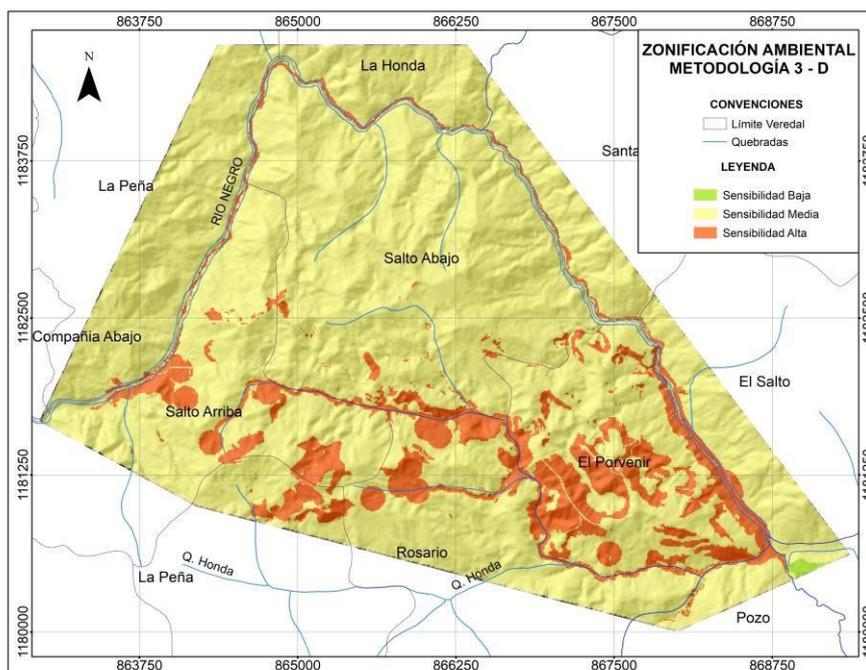
Tema/Atributos	Criterio de Evaluación	Calificación de la Sensibilidad		
		Rango	Categoría	
	potencial para la conservación del ecosistema.			
Ecosistemas acuáticos	Diversidad de especies dada por el Índice de diversidad de Simpson λ . Valores cercanos a cero indican diversidad alta y a uno, baja.	$\lambda < 0,20$ (Honda, captación – cola del embalse)	Alta	4
		$0,20 \leq \lambda \leq 0,60$ (antes captación, cola del embalse – descarga)	Media	3
		$\lambda > 0,60$	Baja	2
Componente arqueológico	Áreas de importancia cultura por estar declaradas como patrimonio cultural	Zonas donde se localicen Áreas de Patrimonio arqueológico declarado.	Muy Alta	5
Componente étnico	Áreas de importancia cultural y que tienen una reglamentación especial: resguardos indígenas y comunidades negras.	Zonas donde se localicen resguardos indígenas y comunidades negras.	Muy Alta	5
Densidad de población	Veredas según la densidad de población.	Densidad mayor de 100 hab/Km ²	Alta	4
		Densidad entre 50 y 100hab/Km ²	Media	3
		Densidad menor de 50 hab/Km ²	Baja	2
Porcentaje de población en miseria (PPM).	Unidades según el valor del NBI. Veredas con una alta vulnerabilidad dada la calidad de vida de sus habitantes.	PPM>75%	Alto	4
		PPM entre 75 y 25%	Medio	3
		PPM<25%	Bajo	2
Polígonos de áreas tituladas y en solicitud.	Áreas de importancia económica por la explotación minera	Áreas con título minero	Muy Alta	5
		Áreas con solicitud	Alta	4
Estructura de la propiedad	Tamaño predominante del predio por vereda. Más pequeño el predio mayor la vulnerabilidad del hogar.	Microfundio y minifundio (0 -10 ha)	Alta	4
		Pequeña y mediana propiedad (10,1 - 200 ha)	Media	3
		Gran propiedad (200,1 ha en adelante)	Baja	2

Fuente: Modificado de Pi épsilon, 2015.

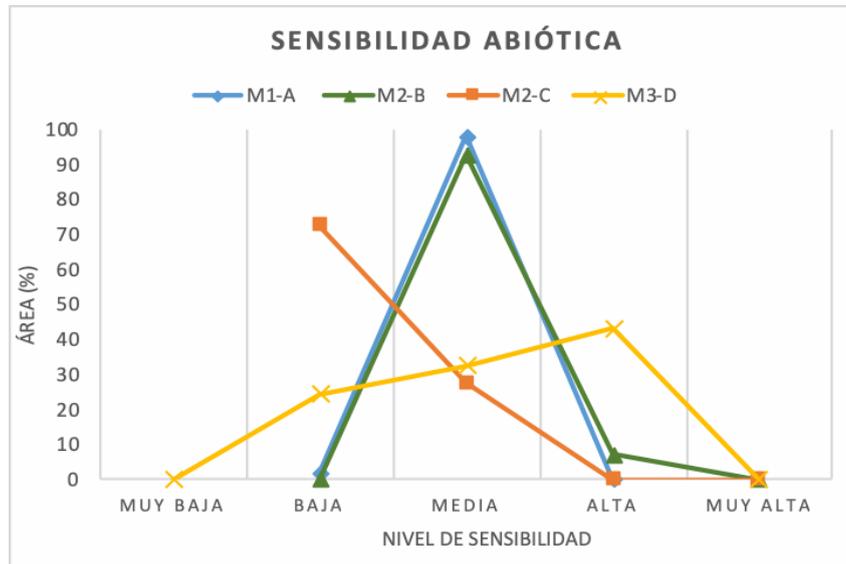
Anexo 14. Sensibilidad ambiental del medio abiótico (superior izquierda), biótico (superior derecha) y socioeconómico (imagen inferior).



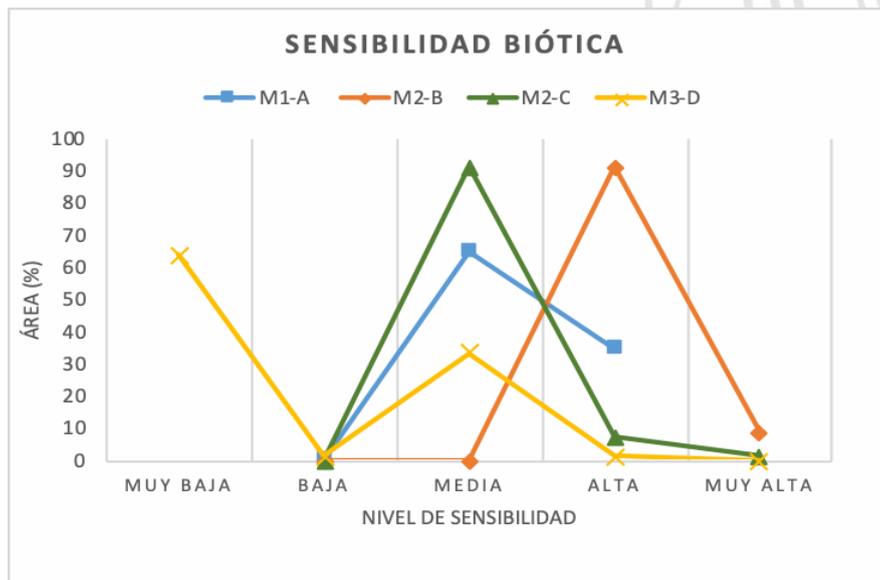
Anexo 15. Zonificación ambiental de la metodología 3-D



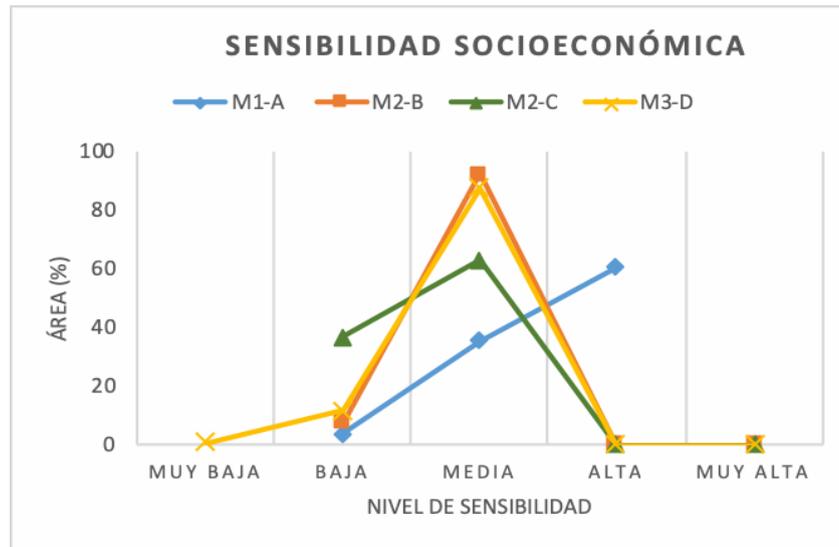
Anexo 16. Porcentaje de área para los niveles de sensibilidad del medio abiótico para las cuatro metodologías aplicadas.



Anexo 17. Porcentaje de área para los niveles de sensibilidad del medio biótico para las cuatro metodologías aplicadas.



Anexo 18. Porcentaje de área para los niveles de sensibilidad del medio socioeconómico para las cuatro metodologías aplicadas.



Anexo 19. Porcentaje de área para los niveles de sensibilidad de la zonificación ambiental para las cuatro metodologías aplicadas.

