

**MODELO COMBINADO PER-AHP COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISIS PARA
EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y AMBIENTAL, CASO APLICADO:
DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.**

Presentado por:

STEFANNY GÓMEZ GUTIÉRREZ

Informe de práctica académica

Asesor:

JOHN FERNANDO ESCOBAR MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Medellín

2018



RESUMEN

Los crecientes problemas que sufren los ecosistemas naturales y la dependencia que tiene la sociedad de ellos, ha llevado a que actualmente se dé mucha más importancia a la base natural en los procesos de ordenamiento territorial. En este trabajo se analizaron los antecedentes y el alcance de dos de las propuestas que se han desarrollado desde el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia como aspiraciones para reconocer las áreas naturales en los ejercicios de ordenamiento y planeación, las cuales son, la Estructura Ecológica Principal (EEP) y la Estructura Ecológica Territorial Adaptativa (EETA). Adicionalmente, se formuló un modelo analítico que expresa los estados y las presiones de los ecosistemas en todo el territorio antioqueño, el cual, se utilizó para establecer un diagnóstico de la situación actual de las áreas que componen la EETA, al ser esta la más reciente de las propuestas. El trabajo se desarrolló a partir de información secundaria y se utilizó el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), sustentado en una técnica de evaluación multicriterio y en el uso de herramientas geoinformáticas. Los resultados obtenidos respecto al análisis de las propuestas advierten sobre la necesidad de incluir en estas, algunas áreas de interés ecológico relevante y de ampliar la gestión de la información cartográfica. En relación con los resultados del modelo PER, estos indican que, en general, en el territorio antioqueño los estados tienden a superar las presiones; no obstante, se presentan desequilibrios altos en varias áreas de la EETA, que sugieren que es necesario reforzar las medidas de gestión de esas áreas.

Palabras claves: Estructura ecológica, SIG, modelo PER, evaluación multicriterio.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
2	OBJETIVOS.....	6
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	MARCO TEÓRICO	7
3.1	La base natural en el ordenamiento del territorio.....	7
3.2	Modelo Presión-Estado-Respuesta	10
3.3	Proceso de Análisis Jerárquico - Metodología Saaty.....	12
4	METODOLOGÍA	13
4.1	Análisis de la EEP y la EETA	13
4.1.1	Fase 1.....	13
4.1.2	Fase 2.....	13
4.1.3	Fase 3.....	13
4.2	Construcción del modelo PER para Antioquia	14
4.2.1	Fase 1.....	14
4.2.2	Fase 2.....	14
4.2.3	Fase 3.....	14
4.2.4	Fase 4.....	14
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	16
5.1	Análisis de la EEP y la EETA	16
5.1.1	Estructura Ecológica Principal-EEP de Antioquia.....	16
5.1.2	Estructura Ecológica Territorial Adaptativa-EETA de Antioquia.	17
5.1.3	Comparación cartográfica entre la EEP y la EETA	20
5.2	Construcción del modelo PER para Antioquia	24
5.2.1	Variables de presión y estado seleccionadas.	24
5.2.2	Variables de estado	25
5.2.3	Variables de presión.	31
5.2.4	Presión y estado totales.....	40
5.2.5	La EETA como una de las respuestas	42
6	CONCLUSIONES	49
7	RECOMENDACIONES	49
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del modelo Presión-Estado-Respuesta.	11
Figura 2. Expresión cartográfica de la EETA en el proyecto piloto de la cuenca río Blanco del macizo de Chingaza.	19
Figura 3. Expresión cartográfica de la EEP y la EETA para Antioquia.....	21
Figura 4. Representación espacial de las variables de estado.	31
Figura 5. Representación espacial de las variables de presión	40
Figura 6. Mapas de Estado ponderado, Presión ponderada y Delta.....	42
Figura 7. Superposición del mapa Delta con todas las categorías de la EETA.....	43
Figura 8. Mapa Delta superpuesto con las categorías de la EETA 'Áreas del RUNAP' y 'Páramos'.	45
Figura 9. Mapa Delta superpuesto con las categorías de la EETA 'acuíferos' y 'humedales'.....	46
Figura 10. Mapa Delta superpuesto con la categoría de la EETA 'Áreas de la Ley 2da de 1959-Zonas A'	47
Figura 11. Mapa Delta superpuesto con la categoría de la EETA 'Rondas y nacimientos de agua.'	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los elementos cartográficos de la EETA y la EEP.....	21
Tabla 2. Información secundaria empleada en el modelo PER.	24
Tabla 3. Clasificación de las coberturas	25
Tabla 4. Clasificación de las pendientes	29
Tabla 5. Ponderación jerárquica obtenida al aplicar la metodología de Saaty.	41

1 INTRODUCCIÓN

La pérdida de biodiversidad, el deterioro de los ecosistemas y el cambio climático, son algunos de los problemas ambientales que causan tensiones sobre los territorios, y el departamento de Antioquia no es la excepción; por ejemplo, la tasa de deforestación y degradación del departamento es de 19.000 ha anuales, la cual supera el reporte promedio por departamento para el país, que es de 15.000 ha anuales¹. Ante tal panorama, el Ordenamiento Territorial como instrumento de planificación que busca orientar el desarrollo sostenible del territorio, teniendo en cuenta factores como el uso racional del suelo y la preservación del patrimonio ecológico y cultural², se constituye en una herramienta fundamental para abordar tales problemas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el Departamento Administrativo de Planeación (DAP) de la Gobernación de Antioquia, en su rol de dirigir el desarrollo integral del departamento en el corto, mediano y largo plazo, ha ejecutado en los últimos años diferentes ejercicios de planeación en los cuales la dimensión ambiental no ha pasado desapercibida. Hacen parte de estos ejercicios, los Lineamientos de Ordenación Territorial para Antioquia - LOTA³, la Propuesta de la Estructura Ecológica Principal - EEP para Antioquia⁴, y recientemente el Plan de Ordenamiento Departamental - POD⁵. Específicamente en los dos últimos ejercicios, se ha incluido el componente ecológico del departamento en dos modelos que se han denominado Estructura Ecológica Principal (EEP) y Estructura Ecológica Territorial Adaptativa (EETA), respectivamente.

Dado que el DAP entiende la importancia de la estructura ecológica en los procesos de ordenamiento territorial y la gestión ambiental, se hace oportuno profundizar en estos modelos, en el sentido de comprender bajo qué objetivos particulares se concibió cada uno y sus antecedentes teóricos y metodológicos. De este modo, el

¹ GONZÁLEZ C. S. y VÁSQUEZ A. *Estado de los bosques de Antioquia entre 1990-2015*. En: Quintero Vallejo, E., Benavides, A.M, Moreno, N., González-Caro, S. (Ed.), *Bosques Andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia* (pp. 39-83). Medellín, Colombia: Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe-Programa Bosques Andinos (COSUDE). 1 Ed – Medellín, 2018.

² COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 388. (24, julio, 1997). *Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones*.

³ COMISIÓN TRIPARTITA, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, UNIVERSIDAD NACIONAL y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. *Lineamientos de Ordenación Territorial para Antioquia Fase II*. Medellín, Colombia: Comisión Tripartita, 2012. 296 p. ISBN 978-958-8711-39-3

⁴ GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. *Propuesta de Estructura Ecológica Principal para Antioquia (Versión preliminar)*. Medellín, Colombia: Departamento Administrativo de Planeación, 2015. 50 p.

⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. *Plan de Ordenamiento Departamental-POD de Antioquia*. [Sin publicar].

presente trabajo tiene el propósito de hacer un análisis crítico a través de revisión bibliográfica y apoyado en sistemas de información geográficos (SIG), de las características y elementos que configuran la EEP y la EETA. Además, a través de un modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), sustentado en un análisis multicriterio que incluye criterios biofísicos y socioeconómicos del territorio, se propone una estructura que establece de manera cualitativa la situación ambiental actual del departamento y emite un diagnóstico de las áreas que hacen parte de la EETA que se propuso en el POD.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar de manera crítica los elementos y características de los modelos EEP y EETA que se han propuesto en ejercicios de planeación para el ordenamiento del territorio departamental, utilizando información secundaria disponible y herramientas geoinformáticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer y explicar qué principios o criterios fueron tenidos en cuenta para definir los modelos de EEP y EETA para el departamento de Antioquia.
- Identificar y detallar puntos de coincidencia y divergencia entre la EEP y la EETA.
- Identificar posibles vacíos de información en las zonificaciones de la EETA.
- Construir un modelo analítico que ofrezca un diagnóstico del estado actual de las áreas de la EETA.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 La base natural en el ordenamiento del territorio

Los primeros registros que se conocen de la inclusión de la naturaleza en el ordenamiento del territorio datan de los años 1850 y 1900 y están relacionados principalmente con el ordenamiento urbano en Norteamérica y Europa. En Boston se crearon en 1880 corredores verdes llamados “parkways” o “greenways” que consistían en áreas lineales de entre 65 y 150 metros de ancho que se encontraban rodeadas de árboles; estas estructuras verdes fueron creadas para cumplir funciones recreativas y estéticas dentro de la ciudad. Por otra parte, en Inglaterra se creó el concepto de “cinturones verdes” (“greenbelts”), cuya estructura era parecida a los parkways pero su propósito era evitar la expansión urbana sobre áreas rurales⁶.

Según Remolina (2010)⁷, en Colombia se han combinado las distintas propuestas europeas y norteamericanas (relacionadas con la necesidad de crear e incluir espacios como caminos peatonales, cinturones verdes y redes ecológicas en los planes de ordenamiento urbano y suburbano), para dar origen al concepto de estructura ecológica, el cual se ha utilizado en distintos ejercicios de ordenamiento del territorio y que además ha quedado consignado en la legislación colombiana. A continuación, se presentan algunos antecedentes del concepto de Estructura Ecológica en Colombia.

En 1998, Thomas van der Hammen⁸, en el Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá propone la Estructura Ecológica Principal (EEP) como un plan y programa soportado en una zonificación cartográfica que indica las necesidades de restauración y manejo para cada zona o unidad cartográfica. La EEP se concibió como la imagen ideal a la que se debía llegar en un plan ambiental para la Sabana de Bogotá tras reconocer su alto y extendido deterioro ambiental.

En el 2000, se habla de Estructura Ecológica Principal en el POT del Distrito Capital⁹, estableciendo que la EEP “es la red de espacios y corredores que sostienen y conducen la biodiversidad y los procesos ecológicos esenciales a través del territorio, en sus diferentes formas e intensidades de ocupación, dotando al mismo de servicios ambientales para su desarrollo sostenible”.

⁶ REMOLINA F. *Propuesta de Estructura Ecológica Regional de la Región Capital y guía técnica para su declaración y consolidación*. 2010. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá. 121p.

⁷ Ibid.

⁸ VAN DER HAMMEN T. *Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá*. 1998. Bogotá D.C.: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 142p.

⁹ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. *Decreto Distrital 619*. (28, julio, 2000). Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial para Santa Fe de Bogotá, Distrito Capital.

En 2003, Van den Hammen y Andrade¹⁰, proponen la Estructura Ecológica Principal (EEP) de Colombia, como respuesta y avance efectivo frente a los compromisos nacionales e internacionales de conservación y restauración de la biodiversidad y la salud e integridad de los ecosistemas. Definen la EEP como "*el conjunto de ecosistemas naturales y semi-naturales que tienen una localización, extensión, conexiones y estado de salud, tales que garantiza el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medida para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida*". Además, proponen que la EEP junto a la Infraestructura Ecológica (IE), componen la Estructura Ecológica de Soporte (EES) de la Nación. La IE es considerada como "*el conjunto de relictos de vegetación natural y seminatural, corredores y áreas a restaurar en los agro-ecosistemas y otras áreas intervenidas del país (centros urbanos y otros sistemas construidos) que tienen una funcionalidad en la conservación de la biodiversidad, la productividad y la calidad de la vida de la población*". En ese sentido, al combinar la EEP y la IE, la EES es concebida como "*la expresión territorial de los ecosistemas naturales, agro-ecosistemas y sistemas urbanos y construidos que soportan y aseguran a largo plazo los procesos, sustentan la vida humana, la biodiversidad, el suministro de servicios ambientales y la calidad de la vida*". Los autores sustentan que la conservación y restauración de la EEP y la IE son la base territorial para el desarrollo "verdaderamente sostenible".

En el 2007, el Decreto 3600¹¹ define en su Artículo 1° la EEP como el "conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales del territorio, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, los cuales brindan la capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones".

En 2008, Valbuena et al.¹², desarrollan la Estructura Ecológica Regional (EER) para la Región Central, la cual comprende los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima y Meta; y se entiende como "*un sistema natural interconectado que da*

¹⁰ VAN DER HAMMEN T. & ANDRADE G. *Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación*. 2003. Bogotá, D.C: IDEAM. 74p.

¹¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Decreto 3600*. (20, septiembre, 2007). Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.

¹² VALBUENA S., TAVERA H. & PALACIOS MT. *Propuesta de Estructura Ecológica Regional para la Región Central*. 2008. Bogotá, D.C: Gobernación de Cundinamarca, Alcaldía Mayor de Bogotá, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional –UNCRD del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas-UNDESA, Instituto Alexander von Humboldt. 61p.

sustento a los procesos y funciones ecológicas esenciales (actuales y futuras) y a la oferta de servicios ecosistémicos que soporta el desarrollo socioeconómico y cultural de las poblaciones en el territorio". La EER se aborda desde dos escenarios: la Estructura Ecológica Actual (EEA) y la Estructura Ecológica Futura (EEF).

También en 2008, Márquez y Valenzuela¹³, amplían la concepción de la EES propuesta por Van den Hammen y Andrade, añadiendo dos conceptos complementarios: la Estructura Ecológica de Soporte Mínima (EESM) y la Estructura Ecológica de Soporte Actual (EESA). La EESM está compuesta por áreas que deben conservarse (por sus funciones ecológicas, por sus características especiales de geología, clima, biodiversidad, entre otras), áreas críticas por su elevado riesgo para la vida y las actividades humanas (deslizamientos, incendios, sismos, etc.) y áreas de uso humano directo (actividades agropecuarias, asentamientos, etc.). La EESA siempre debe ser igual o mayor a la EESM y la comparación entre ambas es lo que permite definir las estrategias de gestión.

En 2010, Remolina¹⁴, desarrolla la Estructura Ecológica de la Región Capital y la define como la *"red de espacios naturales, seminaturales y áreas verdes transformadas, que, interconectadas estructural y funcionalmente, sostienen los procesos y funciones ecológicas esenciales y a su vez proveen servicios ecosistémicos necesarios para el desarrollo socioeconómico y cultural del territorio"*. Esta propuesta está enfocada a la preservación o restauración de servicios ecosistémicos de soporte y regulación, y a lograr la articulación de esta con la EER de la Región Central.

En 2011, se propuso en el marco del Programa Piloto Nacional de Adaptación al Cambio Climático – INAP (Componente B-Alta Montaña)¹⁵ el concepto de Estructura Ecológica Territorial Adaptativa, el cual se construyó a partir de una adaptación del concepto de Estructura Ecológica Principal definido en el POT del Distrito Capital del año 2000. De esta manera, la EETA se definió como: *"la red de espacios y corredores que sostienen y conducen la biodiversidad y los procesos ecológicos esenciales a través del territorio, en sus diferentes formas e intensidades de ocupación, dotando al mismo de servicios ambientales para su desarrollo sostenible, asumiendo igualmente la transición ecosistémica y ambiental asociada al cambio climático y asegurar la disponibilidad del recurso agua"*. Las palabras resaltadas en

¹³ MÁRQUEZ G. & VALENZUELA E. *Estructura ecológica y ordenamiento territorial ambiental: aproximación conceptual y metodológica a partir del proceso de ordenación de cuencas*. En: Gestión y Ambiente. 11 (2). 2008.

¹⁴ REMOLINA F. *Propuesta de Estructura Ecológica Regional de la Región Capital y guía técnica para su declaración y consolidación*. 2010. Bogotá D.C: Alcaldía Mayor de Bogotá. 121p.

¹⁵ IDEAM, INVEMAR, CORALINA & CONSERVACIÓN INTERNACIONAL. *Aspectos del cambio climático y adaptación en el ordenamiento territorial de alta montaña*. Guía metodológica, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP– componente B. Bogotá. 2011. 166p.

cursiva fueron los nuevos aspectos que el proyecto INAP agregó al concepto original de EEP, y en donde es evidente que con el concepto de la EETA se quiere dar una importancia significativa al tema del cambio climático y a la gestión del recurso hídrico. En la sección 5.4 se ampliarán los aspectos conceptuales y de aplicación de la EETA.

Finalmente, en 2013, en el nuevo POT del Distrito Capital¹⁶ se expresa que la Estructura Ecológica Principal es “el sistema de áreas con valores ambientales presentes en el espacio construido y no construido que interconectadas dan sustento a los procesos y las funciones ecológicas esenciales y a la oferta de servicios ambientales y ecosistémicos (actuales y futuros) para el soporte de la biodiversidad y del desarrollo socio económico y cultural de las poblaciones en el territorio. Esta estructura se configura a partir de la integración de las áreas de origen natural y antrópico, las cuales mantienen una oferta ambiental significativa para los habitantes de la ciudad y la región”.

3.2 Modelo Presión-Estado-Respuesta

El modelo Presión- Estado- Respuesta (PER) fue propuesto inicialmente por Tony Friend y David Rapport en la década de los setenta con el propósito de analizar las interacciones entre las presiones ambientales, el estado del medio ambiente y las respuestas ambientales. La OCDE utilizó una versión adaptada de este modelo en sus reportes ambientales, y en la década de 1980 cuando inició su trabajo sobre indicadores ambientales, los países miembros acordaron que el modelo PER era muy útil y debería seguir usándose en los trabajos de la OCDE sobre datos e indicadores ambientales¹⁷.

El modelo PER está basado en el concepto de causalidad, asumiendo que las actividades humanas ejercen *presiones* sobre el ambiente y afectan la calidad y cantidad de los recursos naturales (*estado*). La sociedad *responde* a esos cambios mediante políticas ambientales, sectoriales y económicas¹⁸. El esquema de la Figura 1 ilustra la relación causal en la que se fundamenta el modelo.

¹⁶ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Decreto Distrital 364. (26, agosto, 2013). *Por el cual se modifican excepcionalmente las normas urbanísticas del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C., adoptado mediante Decreto Distrital 619 de 2000, revisado por el Decreto Distrital 469 de 2003 y compilado por el Decreto Distrital 190 de 2004.*

¹⁷ OECD. *Using the pressure-state-response model to develop indicators of sustainability.* 2004.

¹⁸ Ibid.

El esquema PER está cimentado en tres interrogantes básicos¹⁹: ¿cuál es el estado actual del ambiente y de los recursos naturales?, ¿qué está afectando el ambiente y los recursos naturales? y ¿qué se está haciendo para resolver, reducir o prevenir los impactos? Este conjunto de preguntas se resuelve a través de indicadores de estado, presión y respuesta.

Indicadores de estado. Ofrecen una visión general de la situación ambiental existente.

Indicadores de presión. Describen las presiones ejercidas por las actividades humanas sobre el ambiente como consecuencia de las interacciones sociedad-naturaleza.

Indicadores de respuesta. Representan los esfuerzos realizados por la sociedad (a nivel individual o colectivo) o por las instituciones para prevenir, resolver o mitigar la degradación del ambiente.

Los conceptos de presión y estado también se han asociado con los conceptos de demanda social y oferta natural, de manera que el modelo PER se ha constituido en una herramienta muy útil a través de la cual es posible explorar las percepciones, visiones y necesidades que tienen los distintos actores sociales respecto a la oferta y la demanda presentes en los ecosistemas en los que habitan, y a partir de eso, establecer escenarios de solución que propendan por conciliar la oferta ambiental con la demanda social, el cual es uno de los mayores retos de la gestión ambiental y territorial²⁰.

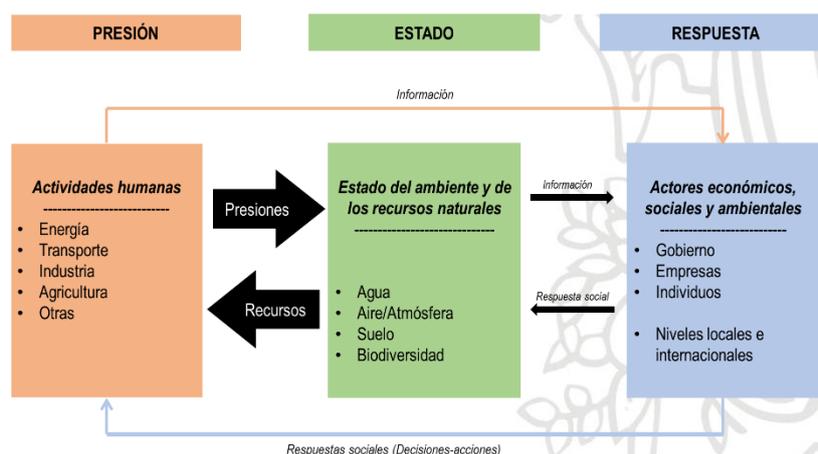


Figura 1. Esquema del modelo Presión-Estado-Respuesta. Fuente: Adaptado de OECD, 2004.

¹⁹ WORLD RESOURCE INSTITUTE. *Environmental indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*. 1995. 58p.

²⁰ ESCOBAR J., URÁN A., PAREDES V., VALDÉS J. & TREJOS E. *Conciliando la visión técnica con la visión social en la generación de cartografía como instrumento de apoyo a la gestión de ecosistemas singulares*. 2018. XVIII simposio internacional de la Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, La Habana, Cuba, noviembre de 2018. 10p.

3.3 Proceso de Análisis Jerárquico - Metodología Saaty

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), fue desarrollado en la década de 1970 por Thomas Saaty, y actualmente es uno de los métodos de evaluación multicriterio con mayor utilización en el mundo.

El AHP es un método que descompone un problema de decisión en diferentes componentes o variables, las ordena en una estructura jerárquica, obtiene valores numéricos para los juicios de preferencia y finalmente los sintetiza para establecer qué variable tiene la más alta prioridad²¹. De esta manera, esta metodología se fundamenta en tres principios para ordenar el pensamiento analítico: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica.

El mecanismo para la obtención de los pesos porcentuales que determinan el grado de importancia de las diferentes variables asociadas al problema está basado en la construcción de matrices de análisis, a partir de comparaciones entre pares de elementos, en las cuales se establece la preferencia de un elemento sobre otro. Se supone que el nivel de incidencia de todas las variables sobre el problema es una combinación lineal de todas ellas, de manera que el resultado del análisis puede representarse con la siguiente expresión:

$$P = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i$$

En donde P es el problema por resolver que está siendo afectado por las variables C_i que tienen un peso específico porcentual λ_i obtenido a partir de la matriz de análisis comparativo.

La metodología de Saaty “integra aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que es posible incorporar simultáneamente valores personales y pensamiento lógico-matemático en una estructura única de análisis”²² y en consecuencia, permite disminuir los efectos que tiene la subjetividad de los actores del problema sobre la toma de decisiones.

²¹ CONTRERAS E. *Evaluación social de proyectos-Evaluación multicriterio*. 2009. Cepal. 41p.

²² ESCOBAR J., BETANCUR T., GARCÍA E., MARTINEZ C. & PALACIO P. *Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos*. En: Revista Politécnica. Enero-Junio 2017. Año 13, no.24 pp. 37-48. ISSN 1900-2351.

4 METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de este trabajo, de acuerdo con los objetivos propuestos, se puede dividir en dos partes; la primera tiene que ver con el procedimiento realizado para el análisis de la EEP y la EETA; y la segunda con los pasos para construir el modelo analítico PER.

Un eje transversal a todo el trabajo fue la búsqueda de bibliografía y el procesamiento en SIG. El SIG empleado fue el software ArcGIS – versión 10.5, el cual estaba disponible tanto en la Gobernación de Antioquia como en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

4.1 Análisis de la EEP y la EETA

El análisis conceptual y cartográfico de la EEP y la EETA comprendió las siguientes 3 fases.

4.1.1 Fase 1.

Búsqueda de información bibliográfica y cartográfica. En esta fase se hizo una búsqueda en internet, en los documentos del DAP y en los documentos preliminares del proyecto POD de Antioquia, de toda la información relacionada con los conceptos y aplicaciones de los términos EEP y EETA. Así mismo, se buscaron en la base de datos cartográfica del DAP, los geodatos correspondientes a la EEP, y los de la EETA fueron solicitados al equipo técnico de la UNAL que desarrolló el POD.

4.1.2 Fase 2.

Procesamiento de la información mediante SIG. En esta fase se analizaron las diferencias cartográficas de la EEP y la EETA, utilizando especialmente la herramienta *Intersect*, la cual hace parte del conjunto de herramientas de superposición (*Overlay*) ubicada en el componente *Analysis Tools* del software.

4.1.3 Fase 3.

Análisis y síntesis de la información. La información conceptual y cartográfica obtenida en las anteriores etapas se consolidó de manera lógica y se hizo un análisis de la misma.

4.2 Construcción del modelo PER para Antioquia

4.2.1 Fase 1.

Búsqueda de información bibliográfica. En esta etapa se revisaron artículos que hubieran aplicado el modelo PER con el fin de comprender qué tipos de variables estaban relacionadas con los estados y las presiones; esta revisión permitió obtener una lista preliminar de posibles variables que después serían filtradas de acuerdo con la disponibilidad de información cartográfica.

En esta fase también se consultaron las bases teóricas del modelo de evaluación multicriterio utilizado (AHP).

4.2.2 Fase 2.

Búsqueda de información cartográfica y estadística. De acuerdo con la lista de variables de la etapa previa, se hizo una exploración de los datos cartográficos almacenados en carpetas y geodatabases del Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia y también se indagó en los portales de datos abiertos a nivel nacional (SIAC, SIGOT e IGAC). La información de índole estadístico fue consultada en el geoportal del DANE y en el Sistema de Información Minero Colombiano -SIMCO.

4.2.3 Fase 3.

Construcción del modelo analítico. En esta fase se hizo el filtro de la lista de variables y se seleccionaron aquellas que se lograban representar mejor con la información disponible. Posteriormente se tipificaron las variables que representaban estados o presiones; luego se modelaron espacialmente; después se valoraron según la metodología propuesta por Saaty; y finalmente, a través de álgebra de mapas se aplicaron los pesos ponderantes a cada variable, se obtuvieron los mapas de presión y estado totales, y la diferencia entre ellos.

Antes del procesamiento espacial de cada variable se reproyectó la cartografía correspondiente a coordenadas planas, asignando el sistema de referencia Transverse Mercator con datum Bogotá, y se definió un tamaño de celda de 30 metros.

4.2.4 Fase 4.

Análisis y documentación de los resultados. Si bien el análisis fue algo transversal en todo el proceso de construcción del modelo, en el sentido de que en cada proceso intermedio era necesario hacer pruebas de coherencia de los resultados

que se iban obteniendo; el análisis de esta fase se refiere a las conclusiones extraídas de los productos logrados y la posterior documentación de estas.



5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Análisis de la EEP y la EETA

5.1.1 Estructura Ecológica Principal-EEP de Antioquia

La propuesta preliminar de Estructura Ecológica Principal para Antioquia, se construyó a partir de talleres y discusiones entre diferentes entidades como Corantioquia, Cornare, Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Gobernación de Antioquia (Secretaría de Medio Ambiente, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Departamento Administrativo de Planeación) y Universidad EAFIT, en el marco del Convenio de asociación suscrito entre la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia y el Departamento de Antioquia para aunar esfuerzos en los temas de ordenamiento territorial, gestión de la información y planeación participativa; y el convenio Corantioquia – Universidad EAFIT para el acompañamiento a municipios de la jurisdicción de Corantioquia en la incorporación del ordenamiento ambiental del territorio a la planeación municipal y el fortalecimiento de las organizaciones sociales ambientales en el análisis del territorio.

Según el documento técnico de la Estructura Ecológica Principal para Antioquia, en el desarrollo de los talleres se discutieron varias de las definiciones existentes sobre el concepto de Estructura Ecológica Principal (algunas de las cuales se expusieron en la sección 3.1) y se acogió la definición propuesta por Van der Hammen & Andrade²³, adicionándole la palabra “funcionalidad”. Según la definición adaptada, la Estructura Ecológica Principal consiste en:

“El conjunto de ecosistemas naturales y seminaturales que tienen una localización, extensión, conexiones, *funcionalidad* y estado de salud tales que garantice el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medida para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida”.

Teniendo como base esa definición, los elementos que fueron incluidos en la propuesta preliminar de EEP para Antioquia fueron los siguientes:

1. Áreas del sistema nacional de áreas protegidas (SINAP)
2. Prioridades de conservación de biodiversidad
3. Zonas de reserva forestal de la Ley segunda de 1959-Categoría A

²³ VAN DER HAMMEN T. & ANDRADE G. *Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación*. 2003. Bogotá, D.C: IDEAM. 74p.

4. Humedales: pantanos, lagos, lagunas y ciénagas
5. Sistemas paramunos
6. Bosques
7. Red hídrica - Rondas y nacimientos de agua
8. Áreas de infiltración y recarga de acuíferos
9. Corredores biológicos, de hábitat, redes de conectividad
10. Áreas naturales de importancia paisajística

5.1.2 Estructura Ecológica Territorial Adaptativa-EETA de Antioquia.

La EETA para Antioquia se desarrolló en el marco de la formulación del Plan de Ordenamiento Departamental (POD) de Antioquia, el cual es un instrumento que pretende establecer directrices y orientaciones para el ordenamiento del territorio antioqueño, de acuerdo con las competencias asignadas a los Departamentos en la Ley 1454 de 2011. Según la Comisión de Ordenamiento Territorial (COT)²⁴, el plan de ordenamiento departamental debe construir un modelo de ocupación que gestione aspectos básicos del desarrollo territorial departamental, entre los cuales se destacan en la dimensión ambiental los siguientes: la protección y tutela de los principales espacios naturales; la gestión integral de las amenazas y riesgos; la gestión integral del recurso hídrico y la gestión integral de los residuos sólidos e infraestructuras de escala regional para la prestación de servicios públicos.

Según la COT, el modelo de ordenamiento territorial departamental debe comprender la conceptualización y espacialización cartográfica de una estructura ecológica principal que debe comprender como mínimo: “el Sistema de Áreas Protegidas de orden nacional, regional y local, la red hídrica abastecedora actual y potencial de agua; las áreas de manejo especial y ecosistemas estratégicos; las áreas declaradas o en proceso de declaración para la recuperación ambiental”.

En ese sentido, el Plan de Ordenamiento Departamental de Antioquia incorpora en el modelo de ordenamiento propuesto la base natural del departamento a través del concepto de Estructura Ecológica Territorial Adaptativa-EETA, que como se explicó en la sección 3.1, es un concepto propuesto en el Programa Piloto Nacional de Adaptación al Cambio Climático – INAP (Componente B-Alta Montaña). A continuación, se profundizará un poco en el contexto de esta propuesta.

El INAP, a través de un proyecto piloto realizado en la cuenca del río Blanco del Macizo de Chingaza, amplía el marco conceptual de la EETA conforme a los lineamientos aportados por la Adaptación Basada en Ecosistemas-ABE-, la cual destaca que “la adaptación al cambio climático está especialmente orientada hacia el mantenimiento de los servicios ecosistémicos más relevantes para la sociedad y

²⁴ SECRETARÍA TÉCNICA COT NACIONAL, COMITÉ ESPECIAL INTERINSTITUCIONAL. *Lineamientos para el proceso de ordenamiento territorial departamental. Contenidos básicos.* Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2013. p. 44.

que presentan una mayor vulnerabilidad al cambio climático”²⁵. De acuerdo con eso, en el documento técnico de ese proyecto piloto se precisa que el propósito fundamental de los procesos de conservación asociados a la EETA es el mantenimiento del recurso hídrico, y por tal razón se define que los objetos de conservación de la EETA son los bosques altoandinos, el páramo, humedales de alta montaña, áreas de recarga de acuíferos, nacimientos y drenajes principales y secundarios.

Este proyecto en el que se espacializa por primera vez el concepto de EETA, lo propusieron como una guía para que los municipios de alta montaña (>2750msnm) incorporen los aspectos de adaptación al cambio climático en sus instrumentos de ordenamiento territorial.

La espacialización de la EETA (ver Figura 2) en la cuenca del río Blanco se hizo a partir de información de coberturas de la tierra y cartografía básica de los drenajes. La Figura de la EETA ocupa toda el área de la cuenca distribuida en cuatro categorías²⁶:

1. Mantenimiento. Zonas que por su cobertura vegetal ofrecen un importante servicio en la regulación hídrica y albergan elementos representativos de la biodiversidad local y regional.
2. Rondas y nacimientos. Hace referencia a las márgenes de todas las corrientes hídricas, se incluye el nacimiento y el cuerpo de agua.
3. Asociada y de producción. Está relacionada con las diferentes actividades productivas que realizan los habitantes de la cuenca.
4. Transición. Es una categoría transitoria, debido a que son coberturas que se encuentran en proceso de regeneración o restauración natural y pueden ser afectadas por la intervención antrópica.

²⁵ IDEAM, INVEMAR, CORALINA & CONSERVACIÓN INTERNACIONAL. *Resultados del Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP*. Bogotá. 2011. 122p.

²⁶ IDEAM, INVEMAR, CORALINA & CONSERVACIÓN INTERNACIONAL. *Aspectos del cambio climático y adaptación en el ordenamiento territorial de alta montaña*. Guía metodológica, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP– componente B. Bogotá. 2011. 166p.

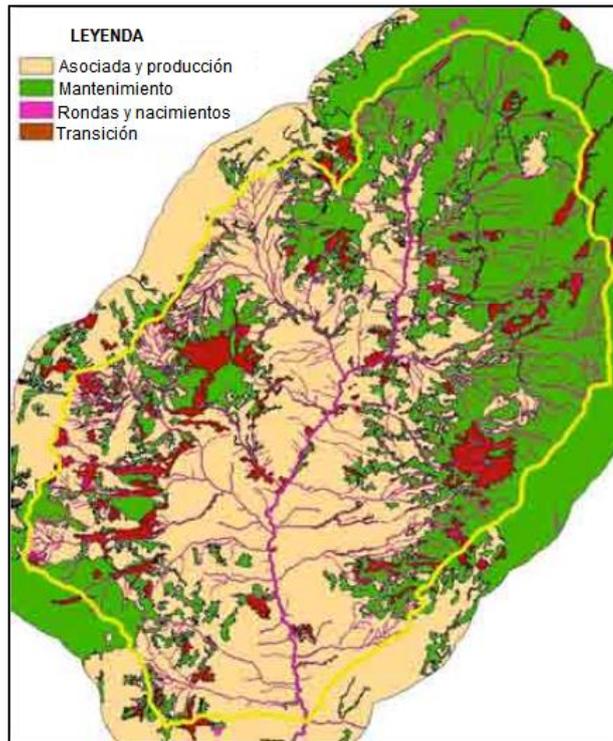


Figura 2. Expresión cartográfica de la EETA en el proyecto piloto de la cuenca río Blanco del macizo de Chingaza. Fuente: Proyecto INAP

Al comparar lo expuesto anteriormente con el soporte teórico y cartográfico que respalda el concepto de EETA en el POD, puede decirse que en la construcción de la EETA para Antioquia no se siguió la misma metodología del proyecto INAP, de este modo, no se estableció una EETA que cubriera todo el departamento con las cuatro categorías propuestas en el proyecto INAP, más bien podría decirse que se tomaron algunos conceptos básicos de ese ejercicio y se trató de representar únicamente los objetos de conservación que persigue una EETA en un ecosistema de alta montaña, según aquel estudio. Así que los elementos que componen la EETA propuesta en el POD son los siguientes:

1. Áreas protegidas del RUNAP
2. Reservas Ley 2ª de 1959- Zonas A
3. Rondas Hídricas y Nacimientos de Agua
4. Acuíferos
5. Sistemas paramunos
6. Humedales, pantanos, lagos, lagunas y ciénagas
7. Iniciativas de conservación

Por otra parte, teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo es evaluar posibles vacíos conceptuales o de zonificación en la EETA, vale la pena en este punto, referirse a un tema que ha causado controversia en algunas de las

reuniones participativas en las que se ha presentado de forma preliminar el POD a diferentes entes; se trata de la no inclusión en la propuesta de conservación del POD, del ecosistema del Bosque Seco Tropical. En dichas reuniones el equipo técnico que formuló el POD ha argumentado que aunque algunos relictos del Bosque Seco Tropical sí han quedado incluidos en la EETA, no se hicieron esfuerzos adicionales de generar una categoría aparte para este ecosistema, porque este no encaja en el eje central de la EETA, el cual es el mantenimiento del recurso hídrico y la adaptación al cambio climático. No obstante, desde el presente trabajo se argumenta que independientemente del enfoque que quisiera dar el POD a su estructura ecológica, debieron haberse acogido al lineamiento de la COT en el que expresa que dentro de los elementos mínimos que debe contener la estructura ecológica principal del modelo de ordenamiento territorial departamental, deben estar incluidas *las áreas de manejo especial y ecosistemas estratégicos*. El Bosque Seco Tropical es, según el Instituto Alejandro von Humboldt, un ecosistema estratégico²⁷, de ahí que se considera que tal ecosistema sí pudo haber hecho parte de la estructura ecológica del POD de Antioquia.

Otros vacíos de la EETA, más de espacialización que de concepto se presentarán en el apartado siguiente.

5.1.3 Comparación cartográfica entre la EEP y la EETA

Conocer la expresión cartográfica de los elementos que constituyen la EEP y la EETA es muy útil para que el Departamento Administrativo de Planeación determine cómo puede seguir nutriendo la información de los mismos, actualizarla o utilizarla como insumo de otros ejercicios. La Tabla 1 hace una relación comparativa entre cada uno los elementos de los mapas de la EEP y la EETA, representados en la Figura 3, estableciendo si hay convergencia o divergencia entre los mismos, también muestra los vacíos que se encontraron en la zonificación de algunos elementos, y en otras partes, algunas observaciones que se consideraron pertinentes.

²⁷INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT-IAvH. *Bosques Secos Tropicales en Colombia*. [En línea]. Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/proyectos/en-desarrollo/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>

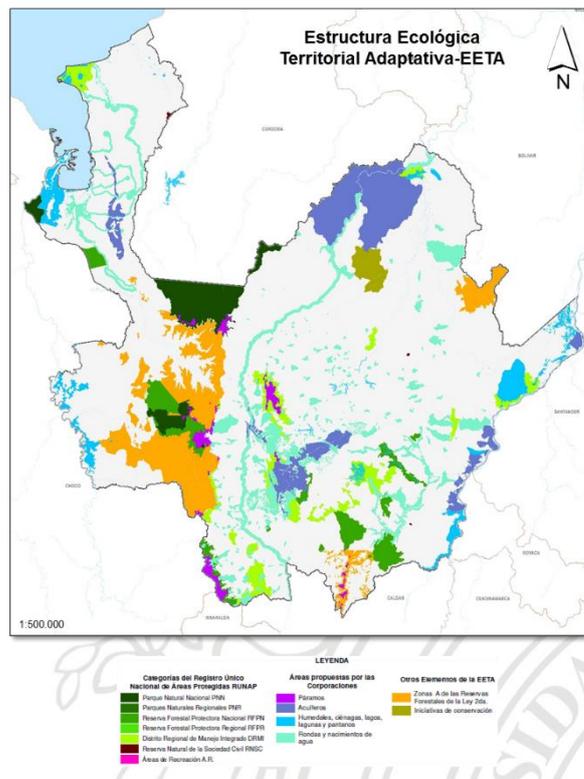
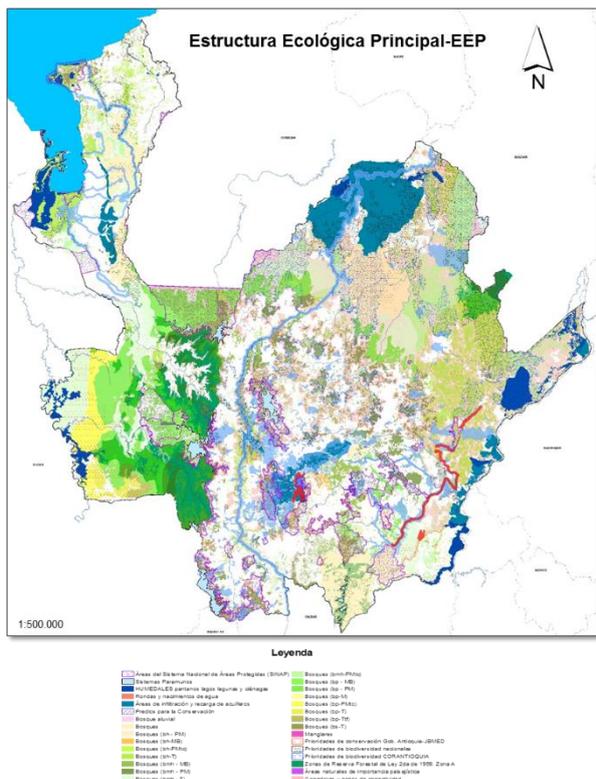


Figura 3. Expresión cartográfica de la EEP y la EETA para Antioquia. Fuente: DAP y Universidad Nacional.

Tabla 1. Comparación entre los elementos cartográficos de la EETA y la EEP

Nomenclatura EEP	Nomenclatura EETA	Convergencia/Divergencia	Vacíos de información cartográfica	Otras Observaciones
Áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP).	Áreas protegidas RUNAP.	<p>Divergencia</p> <p>La EEP contiene 48 áreas del RUNAP y la EETA contiene 62.</p> <p>De las 48 áreas de la EEP, en la EETA aparecen 47 y otras nuevas 15 áreas en esta categoría:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cacica Noria (DRMI) • Ciénaga de Barbacoas (DRMI) • Ciénagas El Sapo y Hoyo Grande (DRMI) • Agua Monte (RNSC) • Buena Vista (RNSC) • Colibrí del Sol (RNSC) • El Potrerito (RNSC) • Fuenteviva (RNSC) • La Violeta (RNSC) • La zafra (RNSC) • Providencia (RNSC) • Reserva Orquídeas de la Sociedad Colombiana de Orquideología (RNSC) • San Rafael (RNSC) • Taibara (RNSC) • Tierra de Aguadulce (RNSC) 	<p>A noviembre de 2018, el RUNAP reportaba las siguientes 8 nuevas áreas en Antioquia:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto de Ventanas (DRMI) • Ciénaga de Chiqueros (DRMI) • Monasterio de Santa María de la Epifanía de los Monjes Benedictinos (RNSC) • La Esperanza (RNSC) • Torrelavega (RNSC) • Barakah (RNSC) • La Telaraña (RNSC) • El Maná (RNSC) <p>Las áreas anteriores deben incluirse en la expresión cartográfica de ambos modelos.</p> <p>Además, en la EETA debe incluirse la RNSC "Mano de Oso", la cual sí está incluida en la EEP.</p>	<p>Las áreas de recreación "Parque Ecológico Piamonte" y "Parque Ecológico Cerro La Asomadera", que están como elementos del RUNAP tanto en la EEP como en la EETA, a noviembre de 2018, ya no estaban vigentes en el RUNAP, por lo cual se sugiere indagar en el porqué de esta situación y verificar si es necesario que estas áreas sean recategorizadas dentro de ambos mapas.</p>

Sistemas paramunos	Páramos	Convergencia. Los elementos cartográficos son los mismos.	-	-
Áreas de infiltración y recarga de acuíferos.	Acuíferos	Convergencia Los elementos cartográficos son iguales, en ambos modelos se presentan los siguientes sistemas acuíferos: <ul style="list-style-type: none"> • Golfo Urabá • Valle Medio del Magdalena • Valle de Aburrá • Santa fe de Antioquia • Bajo Cauca 	Tanto en la EEP como en la EETA, hace falta incluir la cartografía de los siguientes sistemas acuíferos: <ul style="list-style-type: none"> • Valles de San Nicolás y la Unión. • La Pintada-Valparaíso 	La expresión cartográfica de los sistemas acuíferos del Golfo de Urabá y del Valle Medio del Magdalena debe ser actualizada, ya que estudios recientes ²⁸ muestran que estos sistemas tienen áreas mucho más amplias.
Humedales, pantanos, lagos, lagunas y ciénagas.	Humedales, ciénagas, lagos, lagunas y pantanos	Convergencia Los elementos incluidos en ambos modelos son exactamente iguales.	-	-
Rondas y nacimientos de agua	Rondas y nacimientos de agua	Convergencia. Los elementos en ambos modelos son exactamente los mismos.	El 83% de la información que contiene esta capa está concentrada en la jurisdicción de Corantioquia y aunque es claro que la jurisdicción de esta corporación ocupa más de la mitad del territorio antioqueño, los vacíos de información en la jurisdicción de otras corporaciones son evidentes. Es importante que se gestione mayor cartografía de esta temática en Cornare y Corpourabá.	-
Zonas de Reserva Forestal de Ley 2da de 1959. Zona A	Zonas A de las Reservas Forestales de la Ley 2da.	Convergencia Los elementos cartográficos son iguales.	-	-
Áreas naturales de importancia paisajística: <ul style="list-style-type: none"> • Unidad de mármoles y calizas • Formaciones kársticas • Parque regional ecoturístico ARVÍ 	N/A	Divergencia Aunque en el modelo EETA no hay un símil de este elemento, del total de estas áreas en la EEP, el 60.6% se encuentra incluida en otras categorías de la EETA.	-	-
Bosques	N/A	Divergencia El modelo EETA no tiene una capa que represente únicamente a los bosques, no obstante, el 35,34% del total de bosques representados en la EEP están en incluidos en otros elementos de la EETA.	-	-
		Divergencia	Debería analizarse la posibilidad	

²⁸ FUNDACIÓN EPM & GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA (2018). *Antioquia un territorio para proteger*. Medellín: Fundación EPM. 258 p. ISBN 978-958-99097-6-8.

Corredores biológicos y redes de conectividad	N/A	El modelo EETA no tiene una capa diferencial que haga referencia a corredores biológicos y redes de conectividad, sin embargo, el 32% de estos elementos están incluidos en otras capas de la EETA.	de incluir en la EEP, los corredores de fauna que ha propuesto Corantioquia para garantizar el hábitat y la circulación de diferentes especies como el Oso de anteojos, el Jaguar, el Manatí, el Puma y el Tití gris.	-
Predios para la conservación	N/A	Divergencia El modelo EETA no tiene una capa diferencial que haga referencia a predios adquiridos para la conservación, sin embargo, el 32% de estos elementos están incluidos en otras capas de la EETA.	-	-
Prioridades de biodiversidad Corantioquia.	N/A	Divergencia El modelo EETA no tiene una capa que represente únicamente las prioridades de conservación de alguna corporación autónoma, pero del total de los elementos que se incluyen en la EEP, la EETA abarca un 53.16% contenido en otras categorías. Además debe resaltarse que varias de las áreas que eran prioridades de biodiversidad a la fecha en que se elaboró la EEP (2014), actualmente ya han sido declaradas bajo alguna categoría de protección del RUNAP.	En el mapa de prioridades de biodiversidad para 2018 de Corantioquia, aparece una nueva área priorizada: "Cocorná Sur", la cual debe ser incorporada en los dos modelos.	-
Prioridades de biodiversidad nacionales.	N/A	Divergencia En la EETA no se distingue una capa que represente a las prioridades de Conservación Nacional, pero del total estas áreas consideradas en la EEP, en la EETA se incluye el 29.47%.	-	-
Prioridades de conservación Jardín Botánico y Gobernación de Antioquia	N/A	Divergencia Del total de áreas incluidas en la EEP bajo esta categoría, el 29.99% se encuentra en la EETA incorporada en otras categorías.	-	-
N/A	Iniciativas de conservación	Bajo esta categoría, en la EETA únicamente aparece un elemento que corresponde a la Reserva Natural Bajo Cauca Nechí. En la EEP, esta misma área está contenida en la capa de 'Prioridades de Biodiversidad Corantioquia'.	-	-

De la Tabla 1, puede concluirse, en general, que ambos modelos son bastante similares en el contenido de sus elementos. Evidentemente muchos elementos de la EEP tiene un área mayor que los incluidos en la EETA y la diferencia visual de densidad de elementos entre uno y otro mapa se da principalmente por la inclusión de la capa de cobertura de bosques en la EEP.

Si bien es cierto que la ausencia en el mapa de un elemento de los que por definición constituyen la EEP o la EETA, no da razón alguna para creer o interpretar que ese elemento no hace parte del modelo²⁹ (por ejemplo el caso de los acuíferos: Valles de San Nicolás y la Unión, y la Pintada-Valparaíso), sí es muy importante que en próximas actualizaciones de la cartografía de la EETA y la EEP, se amplíe la gestión de la información a todas las Corporaciones Autónomas Regionales del departamento, pues es evidente que en varias capas (por ejemplo “corredores biológicos” en la EEP o “rondas y nacimientos hídricos” de la EEP y la EETA), la información es mucho más nutrida en las áreas de la jurisdicción de Corantioquia.

5.2 Construcción del modelo PER para Antioquia

5.2.1 Variables de presión y estado seleccionadas.

Después de revisar la información disponible sobre diferentes temáticas que bien podrían representar variables de presión y estado, recordando tal y como se explicó en la sesión 3.2, que el estado se refiere a las condiciones actuales del ambiente natural y la presión tiene que ver con las actividades socioeconómicas; se eligieron tres variables para construir el mapa de estado (cobertura de la tierra, pendiente del terreno y riqueza hídrica) y cinco para el de presiones (densidad de población, infraestructura vial, minería, agricultura y ganadería).

En la Tabla 2, se muestra la información que fue utilizada para el procesamiento de cada una de las variables, con su correspondiente tipología, escala y fuente productora.

Tabla 2. Información secundaria empleada en el modelo PER.

Nombre	Tipo	Escala	Fuente
Mapa de coberturas de la tierra	Vector (Polígono)	1:100.000	ANH, 2010.
Drenaje doble y sencillo	Vector (Línea)	1:100.000	IGAC, 2013
Lagunas y embalses	Vector (Polígono)	1:100.000	IGAC, 2013
Cabeceras	Vector (Polígono)	1:25.000	IGAC & Catastro Antioquia, 2007

²⁹ De acuerdo con el Decreto Ley 0019 de 2012, artículo 190, según el cual cuando se presente inconsistencia entre el texto de un Plan de Ordenamiento Territorial y la cartografía, prevalecerá lo establecido en el texto.

Construcciones rurales	Vector (Polígono)	1:100.000	Catastro Antioquia, 2017.
Vías (Primarias, secundarias y terciarias)	Vector (Línea)	1:100.000	Invías & Gobernación de Antioquia, 2015.
Títulos mineros	Vector (Polígono)	1:100.000	SIGOT, 2018.
Municipios	Vector (Polígono)	1:25.000	IGAC & Catastro Antioquia, 2007
DEM Antioquia	Raster	Resolución 30m	UNODC, 2000.
Población urbana y rural	Tabla	-	DANE, Censo 2005
Cabezas de ganado bovino por municipio.	Tabla	-	DANE, Tercer Censo Nacional Agropecuario, 2014.
Área de cultivos principales por municipio.	Tabla	-	DANE, Tercer Censo Nacional Agropecuario, 2014.
Producción anual de minerales por municipio.	Tabla	-	SIMCO, 2016.

5.2.2 Variables de estado

5.2.2.1 Cobertura de la tierra

Los mapas de coberturas permiten identificar las capas vegetales que existen sobre un territorio y dan una idea del uso o aprovechamiento que se está haciendo del mismo.

Para este trabajo se utilizó un mapa de coberturas a escala 1:100.000, levantado de imágenes Landsat de los años 2010 y 2012 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, según la metodología Corine Land Cover y suministrado al DAP en el marco de la formulación del POD. El mapa tiene un total de 41 coberturas diferentes para el departamento de Antioquia, y que para el propósito de este análisis se jerarquizaron en 10 clases (ver Tabla 3), considerando las coberturas con mayor jerarquía como aquellas que representaban estados naturales menos transformados y degradados (estado aproximadamente prístino) y que por ende, son áreas que contribuyen a mantener la estructura y función de los ecosistemas.

Tabla 3. Clasificación de las coberturas

Cobertura	Clase	Cobertura	Clase	Cobertura	Clase
1.1.1. Tejido urbano continuo	1	2.3.1. Pastos limpios	4	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	7
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	1	2.1.2. Cereales	4	5.1.1. Ríos (50 m)	7
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	1	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	4	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	7
1.2.4. Aeropuertos	1	2.2.2. Cultivos permanentes	4	5.2.1. Lagunas costeras	7

		arbustivos			
2.2.5. Cultivos confinados	2	2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4	5.2.2. Mares y océanos	7
1.2.5. Obras hidráulicas	2	2.4.1. Mosaico de cultivos	4	4.1.1. Zonas Pantanosas	7
1.3.1. Zonas de extracción minera	2	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	4	3.2.1. Herbazal	8
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	2	3.1.5. Plantación forestal	5	3.2.2. Arbustal	8
3.3.4. Zonas quemadas	2	2.3.2. Pastos arbolados	5	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	8
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3	2.3.3. Pastos enmalezados	5	3.1.2. Bosque abierto	9
1.4.2. Instalaciones recreativas	3	2.1.1. Otros cultivos transitorios	5	3.1.3. Bosque fragmentado	9
3.3.1. Zonas arenosas naturales	3	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6	3.1.1. Bosque denso	10
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	3	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	6	3.1.4. Bosque de galería y ripario	10
		2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	6	9.9. Nubes	10

El procedimiento llevado a cabo para la clasificación de las coberturas fue el siguiente:

1. En la Tabla de atributos del mapa de coberturas se creó un nuevo campo para la clasificación de las mismas.
2. A través de la herramienta *Select by attributes* se seleccionaron los elementos de cada nivel de jerarquía y al campo creado en el paso anterior se le adicionó el correspondiente valor (según la Tabla 3), a través de la herramienta *Field Calculator*.
3. El mapa de coberturas se convirtió a formato raster con la herramienta *Polygon to raster* utilizando el campo de clasificación.
4. El mapa raster se reclasificó en 10 clases, utilizando la herramienta *Reclassify*.

5.2.2.2 Riqueza hídrica

La riqueza hídrica es una de las maneras en las que se manifiesta el potencial natural de un territorio, pues el agua es “determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural”³⁰.

La riqueza hídrica del departamento de Antioquia se ve representada en la extensa red de aguas superficiales que lo cubre, en sus sistemas acuíferos, y en la existencia de un buen número de cuerpos de agua lénticos, como las ciénagas, lagunas, pantanos y humedales.

³⁰ IDEAM. El Agua. En: El Medio Ambiente en Colombia. Bogotá: IDEAM, 2001. p. 114-189 ISBN 958-95850-94.

Para este análisis, la representación de la riqueza hídrica se llevó a cabo a través de la construcción de un modelo hidrológico para todo el departamento con el objetivo final de hacer un cálculo de la densidad de drenaje. El procedimiento realizado se detalla en los siguientes pasos:

1. Se construyó el modelo hidrológico utilizando en orden secuencial, las siguientes funciones de la herramienta Arc Hydro Tools:

- i. *Fill sinks*. Consiste en rellenar los posibles sumideros matemáticos existentes en el DEM ³¹, buscando evitar que en la matriz de flujos el agua quede atrapada y se altere el balance hídrico. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > DEM manipulation > Fill Sinks

- ii. *DEM reconditioning*. Este proceso modifica los datos de elevación para que sean más consistentes con la red de drenaje que se tiene disponible. Esta función tiene como datos de entrada el DEM y la red de drenaje en formato vectorial. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > DEM manipulation > DEM reconditioning

- iii. *Level DEM*. Esta función nivela el DEM, de manera que en los sitios con presencia de lagunas o embalses no haya cambio de pendiente en esa porción de superficie. Para realizar este proceso fue necesario realizar una unión de los mapas de lagunas y embalses para finalmente obtener el mapa de entrada que requiere la herramienta. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > DEM manipulation > Level DEM

- iv. *Flow direction*. Calcula la dirección en que fluirá el agua en una celda dada, utilizando la pendiente de las celdas vecinas. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Flow Direction

- v. *Flow accumulation*. Con base en la dirección de flujo, esta herramienta calcula el flujo acumulado en cada celda, contando el número de celdas de aguas arriba que vierten sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo de ella. La ruta operativa para dicho comando es:

³¹ Un DEM (Digital Elevation Model) es una matriz que contiene para cada celda el valor de altura sobre el nivel medio del mar.

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Flow Accumulation

- vi. *Stream definition*. Toma la acumulación de flujo y a partir de ella calcula la red drenaje. En este paso se indica el tamaño de la cuenca, para este caso se decidió trabajar con microcuencas de 15km². La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Stream definition

- vii. *Stream segmentation*. Divide la corriente en segmentos y asigna un valor único a cada uno de ellos. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Stream Segmentation

- viii. *Catchment Grid Delineation*. Esta herramienta delimita las cuencas utilizando las corrientes segmentadas del paso anterior. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Catchment Grid Delineation

- ix. *Catchment Polygon Processing*. La delimitación de las cuencas del paso anterior se genera en formato raster, esta herramienta la convierte en formato vectorial. La ruta operativa para dicho comando es:

Arc Hydro Tools > Terrain Preprocessing > Catchment Polygon Processing

2. Una vez realizado todo el procesamiento hidrológico anterior, se utilizaron los mapas generados en los pasos vii y ix para calcular la densidad de la red fluvial superficial del departamento. Con la herramienta *Zonal Statistics as table*, se obtuvieron las estadísticas de la red de drenaje (mapa del paso vii). Luego, estas estadísticas se unieron a la tabla de atributos del mapa de cuencas (mapa del paso ix) a través de un campo común, y posteriormente se calculó un nuevo campo en el que se relacionó el área de cada drenaje (píxeles que conforman las corrientes, incluyendo no solo el cuerpo de agua, sino también la zona de retiro) con el área de la cuenca a la que pertenece.

3. El mapa vectorial de las cuencas, se convirtió a formato raster utilizando el campo de densidad creado en el paso 2.

4. El mapa raster se reclasificó en 10 clases y se aplicó el método de quiebres naturales (Natural breaks), el cual está basado en el algoritmo de optimización de Jenks, que consiste en agrupar valores similares dentro del número de clases definidas, según la similitud de cada grupo y a partir de la separación (breakpoints) que los datos poseen.

5.2.2.3 Pendiente del terreno

La pendiente se refiere al grado de inclinación de los terrenos. Es un factor que interviene en la escorrentía, el drenaje natural, la infiltración, la clase y grado de erosión, y en el uso y el manejo de los suelos³².

Las pendientes también son consideradas según el Artículo 168 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente³³, como un “recurso natural utilizable para generar energía, distinto e independiente del suelo y de las aguas”.

Por otro lado, el Artículo 21 del Decreto 3600 establece la pendiente como un criterio para definir zonas de protección, dictando que se deben “conservar y mantener las masas arbóreas y forestales en suelos con pendientes superiores a cuarenta y cinco grados (45°)”³⁴.

En este trabajo, se consideró el criterio de que las áreas con las mayores pendientes son las que tienen un mejor estado natural, en el sentido de que los terrenos escarpados ofrecen mayor dificultad para establecer producciones ganaderas y agrícolas, y en general, son menos accesibles para cualquier intervención antrópica.

En consonancia con lo anterior y teniendo en cuenta que según las clases agrológicas que ha definido el IGAC³⁵, las clases más altas están relacionadas con pendientes mayores, y su mejor aptitud son las plantaciones forestales protectoras-productoras y la conservación de los recursos naturales; se tomaron de la literatura rangos que correlacionan las pendientes con la capacidad agrológica del suelo³⁶, de manera que los rangos utilizados al reclasificar el mapa de pendientes es el siguiente:

Tabla 4. Clasificación de las pendientes

Clasificación	Pendiente (%)	Clase agrológica
1	0 -10	II,III,IV,VI,VII
2	10-20	II,III,IV,VI,VII
3	20-25	III, IV, VI,VII

³² IGAC. Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. 2014. 44p.

³³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Decreto 2811*. (18, diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

³⁴ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Decreto 3600*. (20, septiembre, 2007). Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.

³⁵ IGAC. Op.Cit. p. 43

³⁶ ZUÑIGA H. *La pendiente compleja atributo del territorio, útil en el ordenamiento espacial del municipio*. Ensayo técnico. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. 25p.

4	25-30	III, IV, VI,VII
5	30-35	IV, VI,VII
6	35-45	IV, VI,VII
7	45-55	VI,VII
8	55-70	VI,VII
9	70-100	VII
10	>100	VIII

El procedimiento para calcular la pendiente fue el siguiente:

1. Se utilizó la herramienta *Slope*, la cual hace parte del set de herramientas de la función *Surface* del componente *Spatial Analyst Tools*. Se utilizó como dato de entrada, en vez del DEM, el mapa *Level DEM* obtenido en el paso 1.iii de la sección 5.2.2.2, esto con el objetivo de que no se generaran pendientes en los sitios donde habían embalses o lagunas. La unidad de medida seleccionada fue el porcentaje.
2. El mapa de pendientes se reclasificó en 10 clases de acuerdo con la clasificación de la Tabla 4.

5.2.2.4 Mapas de estado obtenidos

Luego de realizar los procedimientos descritos anteriormente para cada una de las variables, se obtuvieron los mapas de estado presentados en la Figura 4. A continuación, se hace un breve análisis de cada uno de ellos.

Cobertura.

Se puede apreciar que, en términos de cobertura, los mejores estados de la naturaleza en el departamento de Antioquia se encuentran en algunas áreas de las subregiones Norte, Urabá, Norte y Nordeste, y se relacionan precisamente con aquellas zonas donde hay abundancia de cobertura boscosa. Por otra parte, es de resaltar los estados críticos que se observan en la subregión del Bajo Cauca, que bien corresponden a los pasivos que ha dejado la minería en esta región.

Riqueza hídrica.

En el modelo obtenido para la riqueza hídrica se observa que existe una gran varianza en los resultados, lo cual es muy normal en los modelos de características teselares.* Sin embargo, es clara la dominancia de los rangos bajos (1-4), lo que se

* De acuerdo con Correa & Escobar (2010), "el concepto de tesela se remonta a la técnica de los antiguos romanos usada en la elaboración de mosaicos complejos, empleando pequeños trozos de

debe principalmente a que se presentan zonas muy pequeñas en las cuales las microcuencas están casi en su totalidad dominadas por cuerpos de aguas. Esto se resalta especialmente en áreas con presencia de lagunas, ciénagas y embalses, las cuales están incluidos, pero no son observables a la escala de representación en este análisis.

Pendientes.

El mapa obtenido presenta muy bien las altas pendientes en la zona centro occidental del departamento, por donde precisamente cruza la cordillera Occidental. También son muy coherentes las bajas pendientes que se observan en los márgenes oriental, occidental y nororiental del límite departamental, que respectivamente corresponden a las zonas aluviales del río Magdalena, el río Atrato y la parte baja del río Cauca.

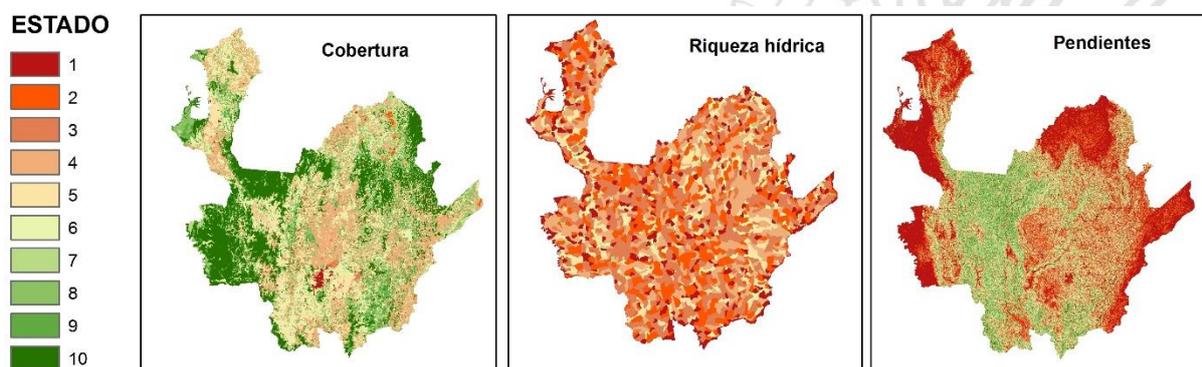


Figura 4. Representación espacial de las variables de estado.

5.2.3 Variables de presión.

5.2.3.1 Densidad de población

El tamaño y la distribución de la población pueden afectar el estado de los ecosistemas de varias maneras, pues la población demanda de la naturaleza recursos como agua, alimento y materiales. A medida que crece la población se requiere más tierra cultivable, de manera que la frontera agrícola se expande y la tierra es sobreexplotada, generando así problemas de erosión del suelo, sedimentación, pérdida de hábitat, entre otros. Los impactos del aumento de la

roca que se ensamblaban entre sí de tal forma que las texturas y colores tuviesen efecto sobre la obra final al ser observada en su totalidad. Este mismo concepto puede ser usado en análisis de territorio, donde éste se compartimenta en fragmentos de diferentes formas (definidos a partir de sus atributos) que no se superponen, y que conforman un mosaico plano o simplemente teselado”.

población también se manifiestan en la cantidad de residuos sólidos y líquidos que recibe el medio natural³⁷.

Reconociendo que la distribución geográfica de la población no es uniforme en el territorio, para este trabajo no se calculó la densidad poblacional como la división del número de habitantes entre el área administrativa de los municipios, sino que más bien a cada uno de los polígonos de las construcciones rurales y de las cabeceras urbanas se les distribuyeron los datos de población aportados por el DANE.

Al iniciar este proyecto se planteaba hacer el análisis con las cifras de proyección de población para 2018 del DANE basadas en el censo de 2005, no obstante, cuando en el mes de octubre fueron revelados los resultados preliminares del censo efectuado en 2018, y se reveló públicamente que los datos de las proyecciones estaban desfasados, se decidió (puesto que el DANE no ha publicado los datos del censo 2018 donde se discrimine la población urbana y rural), tomar de los datos proyectados un año que tuviera una población similar a la que arrojó el censo de 2018. Al hacer la comparación se encontró que el año 2010, con una proyección de 45.508.205 habitantes, era el que tenía un valor más similar a los 45.500.000 que dio el DANE como resultado preliminar del censo de 2018³⁸.

Para calcular esta variable de presión se acudió a la herramienta *Point Density*, la cual hace parte de la gama de herramientas para calcular densidad que ofrece el componente *Spatial Analyst* de *ArcGis 10.5*. El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

1. A las Tablas de atributos del mapa de las cabeceras municipales y al de las construcciones rurales se les agregó un campo de población, a través de una unión (herramienta *Join*) con la tabla del DANE, la cual tenía los datos diferenciados de las cabeceras y de las zonas rurales. Se tenía un dato de población para cada cabecera, pero no para cada construcción rural, por lo tanto, lo que se hizo fue dividir el valor de población rural de cada municipio (resto) entre el número de construcciones rurales por municipio.
2. Los mapas de las construcciones rurales y de las cabeceras se unieron en uno solo y luego, las entidades de polígonos se convirtieron en entidades de puntos con la herramienta *Feature to point*.
3. El mapa creado en el paso anterior fue el dato de entrada de la herramienta *Point Density*, en la opción 'population field' se añadió el campo de población agregado a las construcciones en el paso 1, y como tamaño de celda se establecieron 1000 metros.

³⁷ CAMPAÑA A. *Interrelaciones de los problemas del medio ambiente y de la dinámica poblacional*. Programa global en población y desarrollo CELADE. CEPAL. 1992. 16p.

³⁸ DANE. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Segunda entrega preliminar.

4. Con el fin de corroborar los resultados del mapa generado en el paso anterior, a través de la herramienta *Zonal Statistics as Table* se obtuvo la suma de los píxeles y se verificó que esta fuera aproximadamente similar la población total del departamento.
5. El mapa raster se reclasificó en 10 clases utilizando el método de quiebres naturales, siguiendo la lógica de que las mayores densidades representan una presión mayor.

5.2.3.2 Infraestructura vial.

La infraestructura vial es un agente importante del desarrollo y el crecimiento económico de los territorios, pues mejora la calidad de vida de la población al facilitar el acceso a servicios básicos como la salud y la educación; además favorece el desarrollo e intercambio de mercados. No obstante, la construcción y operación de las carreteras también tiene impactos negativos sobre los ecosistemas. La fragmentación del hábitat, trastorno a la fauna, cambios en el microclima, erosión, sedimentación y alteración del nivel freático; son solo algunos de ellos³⁹. Adicionalmente, las carreteras proporcionan una mayor accesibilidad a áreas naturales remotas, impulsando la colonización de estas áreas y con ello, la conversión de los bosques naturales a sistemas agrícolas o ganaderos⁴⁰.

Para representar la presión por infraestructura vial se utilizó la herramienta *Euclidean Distance*, la cual es una de las diferentes herramientas para hacer cálculos de distancia que proporciona la caja de herramientas *Spatial Analyst*. Esta herramienta toma una capa vectorial y calcula la distancia medida en línea recta desde los elementos vectoriales hasta cualquier otro punto del espacio delimitado. El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

1. Las vías primarias, secundarias y terciarias del departamento se unieron en un solo mapa, a través de la herramienta *Merge*.
2. El mapa vectorial obtenido en el paso 1 fue el input de la función *Euclidean Distance*. Al ejecutar la función se generó un nuevo mapa en formato raster.
3. El mapa raster se reclasificó en 10 clases con el método de quiebres naturales, teniendo en cuenta que las clases más altas (mayor presión) se asignaron a las menores distancias.

³⁹ BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO-BID. *Carreteras y capital natural: Gestión de las dependencias y de los efectos sobre los servicios ecosistémicos para inversiones sostenibles en infraestructura vial*. 2015. 58 p.

⁴⁰ BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO-BID. *Road Impact Assessment Using Remote Sensing Methodology for Monitoring Land-Use Change in Latin America: Results of Five Case Studies*. 2015. 26p.

5.2.3.3 Minería

La minería, entendida como la actividad productiva que extrae, procesa y transforma minerales o materiales del subsuelo o del suelo para su uso industrial, energético o de construcción; ejerce fuertes presiones sobre la integridad de los ecosistemas y la calidad del agua y los suelos. La deforestación, fragmentación del hábitat, contaminación del agua y del suelo, son algunas de ellas. Las cifras indican que para extraer un gramo de oro se requiere remover entre 5 y 6 metros cúbicos de tierra⁴¹ y unos 1160 litros de agua⁴²; y por cada tonelada de carbón se remueven 10 toneladas de tierra⁴³.

La información utilizada para modelar la presión por minería en el departamento de Antioquia fue: capa vectorial de los títulos mineros, capa vectorial de los límites municipales y datos tabulados de la producción para el año 2016 de los principales minerales explotados en el departamento (oro, plata, platino y carbón), estos datos de producción fueron considerados como un indicador másico indirecto de la presión por minería sobre el territorio. Los pasos realizados se describen a continuación:

1. A través de una unión de tablas se agregaron los datos de producción minera a la capa de municipios, utilizando como campo común el código de municipio del DANE. Se generó con esto un mapa de producción minera por municipio.
2. En la tabla de atributos del mapa de producción por municipio se creó un nuevo campo para calcular las toneladas de tierra removida por cada gramo de mineral producido (o toneladas en el caso del carbón). Para hacer este cálculo se tuvieron en cuenta las relaciones *mineral/tierra removida* enunciadas anteriormente, y el dato de que el peso específico de un suelo saturado es aproximadamente 2 ton/m³.
3. El mapa del paso 2 se convirtió a formato raster a través del campo de 'tierra removida'.
4. Con el mapa generado en el paso 3 y la capa vectorial de títulos mineros, se ejecutó la herramienta *Zonal Statistics as Table*, la cual genera una tabla en la que se resumen los valores (máximo, mínimo, rango, promedio, desviación estándar y suma) de la capa raster dentro de las zonas de la capa vectorial. De esta manera, se logró correlacionar los valores de tierra removida por municipio con cada uno de los títulos mineros.

⁴¹ BORRERO N. *Aluvión: A Cielo abierto*. Semana Sostenible. 01 de diciembre de 2014.

⁴² CABRERA M. & FIERRO J. *Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia*. En: *Minería en Colombia, Derechos, políticas públicas y gobernanza*. Bogotá: Contraloría General de la República, 2013. p. 102-122. ISBN 978-958-9351-89-5

⁴³ Ibid.

5. Para espacializar los datos generados en el paso 4, se hizo una unión entre la tabla generada en ese paso y la tabla de atributos de la capa vectorial de títulos mineros, utilizando FID como campo en común.
6. El mapa resultante del paso anterior se convirtió a formato raster, utilizando para esto el campo 'mean', es decir, uno de los estadísticos calculados en el paso 4.
7. La capa raster resultante del paso anterior se reclasificó en 10 clases, con el método de quiebres naturales, y en donde no había datos se asignó un valor de 0.

5.2.3.4 Agricultura

Se entiende por agricultura todo el conjunto de actividades y técnicas que se destinan a cultivar la tierra con la finalidad de obtener productos vegetales. La agricultura ejerce presión sobre los ecosistemas principalmente de dos maneras, la primera está relacionada con la transformación de áreas boscosas en terrenos para cultivos, y la segunda tiene que ver con la aplicación de prácticas agrícolas convencionales como los monocultivos, la labranza intensiva y el uso de fertilizantes y plaguicidas de síntesis química; las cuales generan erosión y salinización de los suelos, eutrofización y contaminación del agua superficial y subterránea⁴⁴.

Para hacer un estimativo de la presión por agricultura en el departamento, se relacionaron las hectáreas cultivadas por municipio de algunos de los productos agrícolas más representativos en el departamento (café, caña panelera, cacao, banano de exportación, banano común, cítricos, piña, aguacate y palma africana; obtenidos del Tercer Censo Nacional Agropecuario), con las coberturas clasificadas como áreas agrícolas según la metodología Corine Land Cover. El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

1. Por medio de la herramienta *Join* se unieron los datos tabulados de hectáreas sembradas a la capa de los límites municipales. De esta manera se asignaron a cada municipio las hectáreas cultivadas de cada producto.
2. Del mapa de coberturas se seleccionaron, a través de la herramienta *Select by attributes*, aquellas áreas que según la leyenda Corine Land Cover son territorios agrícolas, excepto el nivel 2.3 que corresponde a los pastos.
3. Con la herramienta *Clip* se hizo un corte de la capa de cobertura de cultivos, con la capa de municipios; con el fin de tener la cobertura agrícola de cada municipio.

⁴⁴ FAO & IWMI. *Water pollution from agriculture: a global review*. 2017.

4. A la tabla de atributos de la nueva capa generada en el paso anterior, se le añadió un nuevo campo en el que se calculó el área en cultivos de cada municipio.
5. A la misma capa del paso 4, se le creó un nuevo campo y con la herramienta *Field Calculator* se hizo una sumatoria de todas las áreas de los diferentes cultivos por municipio, con el propósito de obtener una aproximación de área total cultivada por municipio.
6. Con el fin de obtener un indicador de presión, se añadió un nuevo campo a la tabla de atributos obtenida en el paso anterior, y en él se calculó una relación porcentual entre el área sembrada de cultivos por municipio con el área denominada agrícola en el mapa de coberturas (*ha cultivos/ ha cobertura agrícola * 100*).
7. El mapa coberturas por municipios se convirtió a formato raster utilizando el campo calculado en el paso anterior.
8. El mapa en formato raster se reclasificó en 10 clases, asumiendo que las relaciones porcentuales más altas significan una mayor presión. Así mismo, en las regiones donde no había cobertura agrícola, y por consiguiente aparecía el valor NoData, se asignó el valor de 1.

5.2.3.5 Ganadería

La ganadería se refiere a la actividad económica dedicada a la crianza de animales para su posterior aprovechamiento. Aunque teóricamente el término ganadería puede abarcar diferentes especies animales, su uso extendido en Colombia está relacionado con la cría de ganado bovino.

Respecto a las presiones que ejerce la ganadería sobre los ecosistemas, estas dependen del sistema de producción bajo el cual se lleve a cabo la actividad. En Colombia se han desarrollado principalmente cinco sistemas de producción ganadera: sistema extractivo, sistema de pastoreo extensivo tradicional, sistema de pastoreo extensivo mejorado, sistema de pastoreo semi-intensivo y sistema de confinamiento⁴⁵.

El sistema de producción más utilizado en el país es el pastoreo extensivo tradicional, que se caracteriza por la cría de pocos animales en grandes extensiones de terreno, donde los semovientes pastorean libremente en búsqueda de alimento. Las presiones que ejerce este tipo de ganadería sobre el ambiente natural están relacionadas principalmente con la tala y quema de los bosques, la desecación de

⁴⁵ MAHECHA L. & GALLEGOS L. *Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad*. En: Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias. 15. (39). 2002.

humedales y procesos progresivos de erosión y compactación del suelo⁴⁶. Para el caso de Antioquia, un estudio realizado en el 2009 demostró que hubo una relación directa entre el incremento de la densidad de ganado y la pérdida de cobertura vegetal entre los años 1980-2000⁴⁷.

Para modelar la presión por ganadería se tuvo en cuenta el indicador de capacidad de carga ganadera, el cual relaciona el número de animales por unidad de superficie. De manera que las mayores presiones se asociaron a capacidades de carga más bajas, las cuales a su vez están asociadas a sistemas de producción extensivos. Los pasos que se llevaron a cabo para modelar la variable se describen a continuación:

1. Por medio de la herramienta *Join* se unieron los datos tabulados de cabezas de ganado por municipio a la capa de los límites municipales.
2. Del mapa de coberturas se seleccionaron a través de la herramienta *Select by attributes* las áreas del nivel 2.3 de la leyenda de la metodología Corine Land Cover, las cuales corresponden a pastos.
3. Con la herramienta *Clip* se hizo un corte de la capa de cobertura de pastos, obtenida en el paso anterior, con la capa de municipios; con el fin de tener la cobertura de pastos de cada municipio.
4. Al mapa obtenido se le añade un nuevo campo y se calcula el área de cobertura de pastos por municipio.
5. A la tabla de atributos del mapa obtenido en el paso 4 se adicionó un nuevo campo y con la herramienta *Field Calculator* se dividió el campo de 'cabezas de bovinos' entre el campo de 'áreas de pasto'. De esta manera se obtuvo la relación # bovinos/ha de pasto.
6. El mapa anterior se convirtió a formato raster a través del campo de 'bovinos por hectárea'.
7. El mapa en formato raster se reclasificó en 10 clases. En las regiones donde no había cobertura de pastos, y por consiguiente aparecía el valor NoData, se asignó el valor de 1.

⁴⁶ MURGUEITIO E. *Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución*. En: *Livestock Research for Rural Development*. 15 (10). 2003.

⁴⁷ ORREGO S. *Economic modeling of tropical deforestation in Antioquia (Colombia), 1980–2000: An analysis at a semi-fine scale with spatially explicit data*. 2009. Oregon State University. Citado por: GONZÁLEZ S. & VÁSQUEZ A. *Estado de los bosques de Antioquia entre 1990-2015*. En: *Bosques Andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia*. 2017. Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe- Programa Bosques Andinos (COSUDE). Medellín. 542p.

5.2.3.6 Mapas de presión obtenidos

En la Figura 5 se presentan los mapas obtenidos al modelar las variables de presión definidas anteriormente. A continuación, se describe cada resultado.

Densidad de población.

Como se observa en la Figura 5a, la población del departamento está concentrada en gran proporción en los municipios del Valle de Aburrá. Al ser esta la región donde se ha desarrollado con más ímpetu la economía, es la que ofrece un cubrimiento más alto en la prestación de servicios y por consiguiente atrae a más personas a establecerse en ella.

Infraestructura vial.

Como consecuencia de que en términos generales el departamento de Antioquia tiene una cobertura vial distribuida en gran parte del territorio, se observa en la Figura 5b la dominancia de las altas presiones, no obstante, también son muy coherentes las menores presiones observadas en las áreas de los municipios de Murindó y Vigía del Fuerte, pues son zonas que no cuentan con vías terrestres que conecten con el resto del departamento.

Ganadería.

Puede evidenciarse en la Figura 5c que las altas presiones están concentradas en algunas áreas de las subregiones Norte, Bajo Cauca, Nordeste, Suroeste y Magdalena Medio, lo que bien corrobora el carácter extensivo de la ganadería que se lleva a cabo en estas áreas. También son de resaltar presiones no tan altas que se presentan en ciertas áreas de la subregión Oriente, las cuales podrían atribuirse a la tendencia de crecimiento de los sistemas de producción ganadera semi-intensivos y estabulados en esta región.

Agricultura

Se resalta de la Figura 5d las altas presiones exhibidas en las subregiones Urabá y Suroeste, las cuales son un fiel reflejo de las grandes extensiones de monocultivos de banano (en Urabá) y café (en suroeste) que tradicionalmente ha habido en estas zonas. Es de destacar que las altas presiones por agricultura en Urabá también tienen una fuerte influencia de los cultivos de piña y de palma africana que se han establecido en los últimos años en esta región.

Minería

Se percibe en la Figura 5e que las altas presiones dominan en las subregiones del Nordeste y el Bajo Cauca, resultados que son compatibles con lo que ha reportado la Contraloría General de Antioquia, respecto a que estas subregiones son las zonas de mayor producción de metales preciosos y “las que utilizan las tecnologías menos

adecuadas e incompatibles con el medio ambiente”⁴⁸. También son de resaltar las presiones medias que se distinguen en los municipios de Urrao en el Suroeste y de Buriticá en el Occidente.

Se debe tener en cuenta que los resultados que se manifiestan en este mapa son solo una aproximación a la realidad del territorio basada en los reportes de las instituciones encargadas, es obvio que la presión por esta actividad puede afectar a zonas no representadas en el mapa, pues según el Informe Anual sobre el Estado de los Recursos Naturales de la Contraloría, por cada proyecto minero con título, existen tres explotaciones mineras sin título⁴⁹.



⁴⁸ CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA & AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. *Doctrina Fiscal en lo Ambiental-Estado de los Recursos Naturales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Antioquia*. 2017. 117p. ISBN 978-958-8513-91-1.

⁴⁹ CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA. *Informe Anual sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente en Antioquia 2017, de la vigencia 2016*. 2017. 645p.

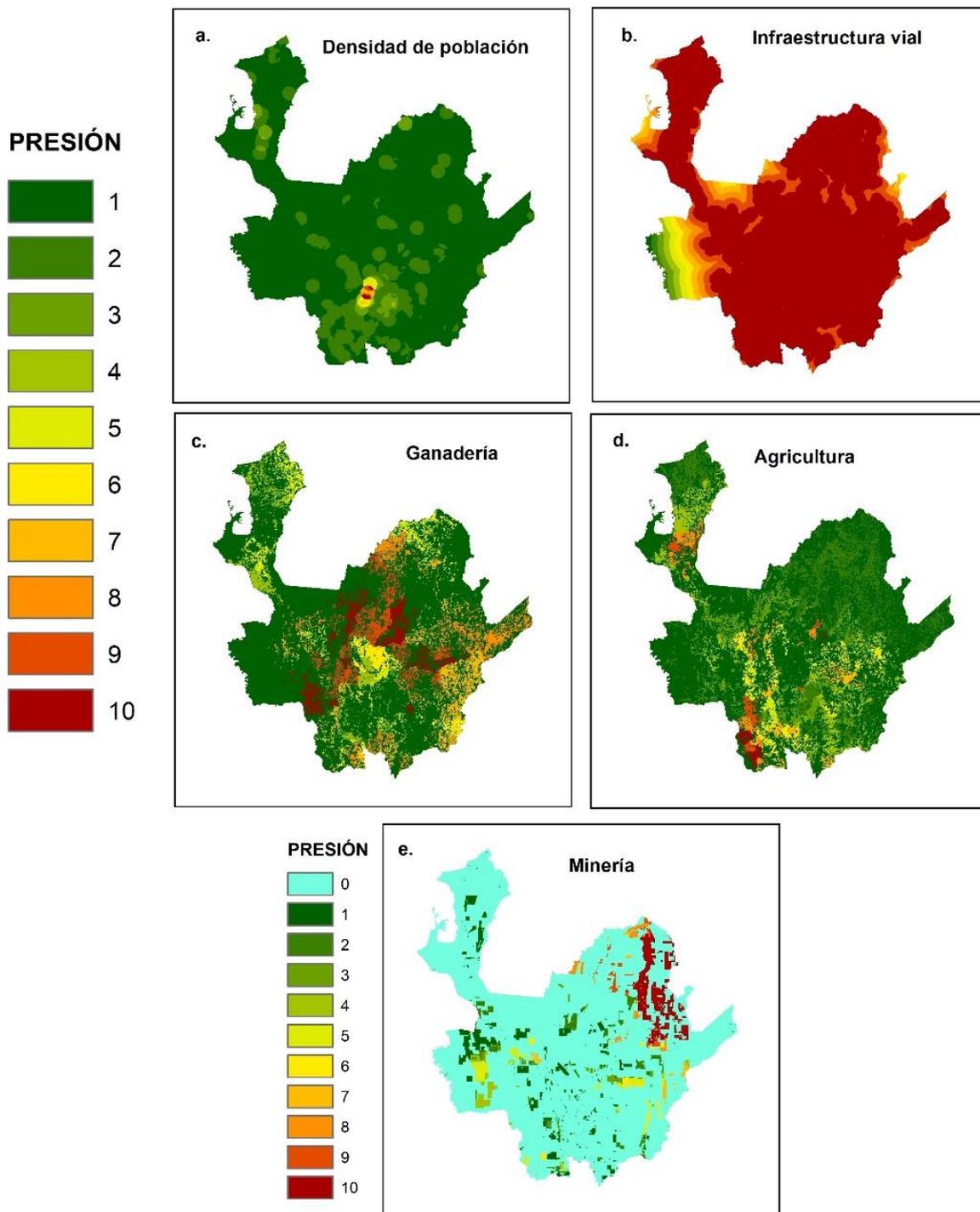


Figura 5. Representación espacial de las variables de presión

5.2.4 Presión y estado totales

Con las variables de estado y presión representadas espacialmente, el paso siguiente consistió en ponderar cada una de ellas con el fin de obtener los mapas de los estados y presiones totales en el departamento. Con el objetivo de lograr un

análisis objetivo de las variables, se decidió tener en cuenta las percepciones socioculturales de las mismas. Para lograr esto se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico-AHP, el cual está basado en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los actores involucrados en un problema, son tan importantes como los datos utilizados en el proceso⁵⁰.

Se adecúa la función sintética del AHP (descrita en la sección 3.3) al problema en cuestión, de manera que el factor C_i representa las variables que permiten identificar un estado de la naturaleza o presión sobre ella; y el factor λ_i se refiere a los pesos ponderantes de cada característica, de tal manera que $\sum \lambda_i = 1$.

Los ponderadores λ_i se obtuvieron a través de una encuesta a partir de la cual se solicitó a una muestra estadísticamente representativa de personas, que evaluaran la contribución de las variables establecidas, a mantener un mejor o un peor estado de los ecosistemas en el departamento de Antioquia.

La encuesta estaba estructurada de la manera que propone la metodología de Saaty y fue realizada a un grupo focal de estudiantes de la Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, los cuales tenían ramas de formación muy variadas (Ingenierías civil, sanitaria y ambiental; Biología; Agronomía; Ciencias Sociales, Negocios Internacionales, Topografía y Mecánica), lo que permitió tener percepciones más dinamizadas del problema en cuestión. Como resultado de la encuesta se obtuvieron los pesos porcentuales registrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Ponderación jerárquica obtenida al aplicar la metodología de Saaty.

	Variable	λ_i
Estado	Cobertura	41%
	Riqueza hídrica	38%
	Pendientes	21%
Presión	Densidad de población	31%
	Minería	30%
	Ganadería	21%
	Agricultura	10%
	Infraestructura vial	8%

⁵⁰ OSORIO G. J. & OREJUELA C. *El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación.* En: Scientia et Technica XIV, No. 39, Septiembre, 2008. ISSN 0122-1701

En la Figura 6 se presentan los resultados que se obtuvieron al aplicar los pesos porcentuales a cada una de las variables de estado y presión. La Figura 6a muestra el mapa de estado ponderado, en el que es evidente que los mejores estados están en aquellas zonas donde la clasificación de las coberturas fue mayor y es coherente con el mayor valor porcentual que obtuvo esta variable con respecto a las otras dos variables de estado. Por otro lado, la Figura 6b exhibe el mapa de presión ponderada, subrayando las presiones más altas en las zonas mineras del Bajo Cauca y el Nordeste, y en el Valle de Aburrá como el área más densamente poblada. Finalmente, la Figura 6c corresponde al mapa que se ha denominado Delta, el cual representa la diferencia entre el mapa de estados y presiones (estado ponderado menos presión ponderada) y se puede considerar como un mapa cualitativo que ilustra las tensiones que se presentan entre la oferta natural y la demanda social en el territorio.

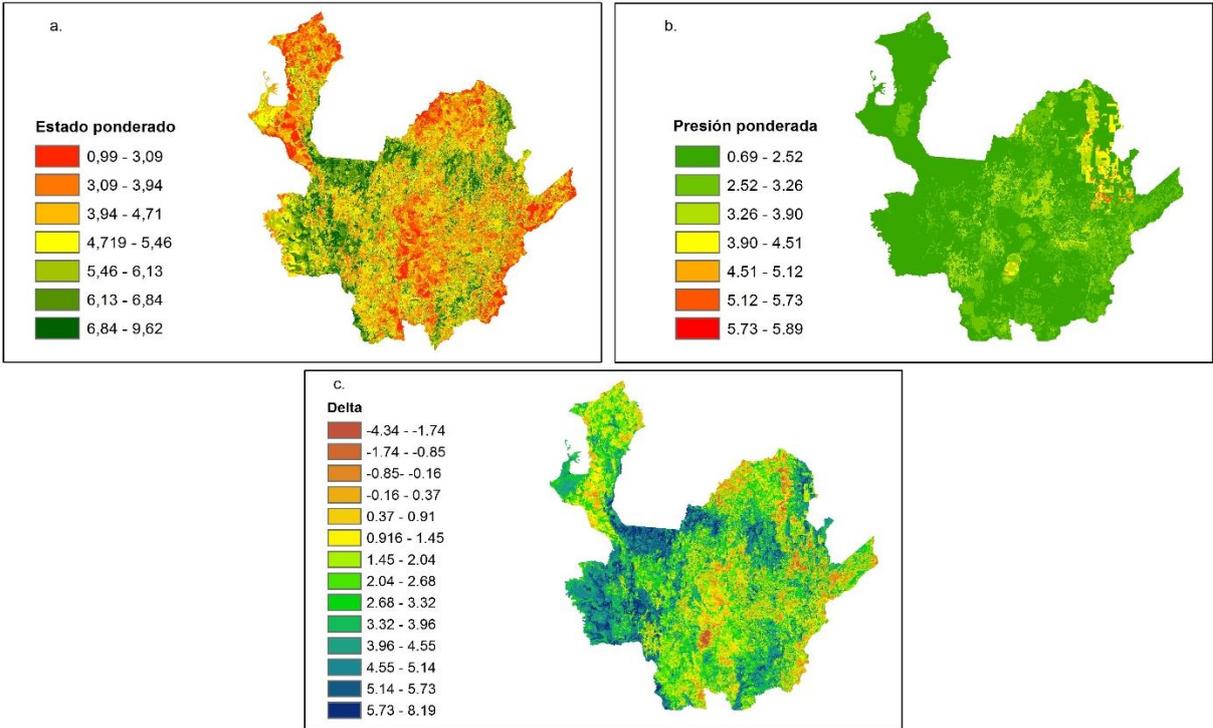


Figura 6. Mapas de Estado ponderado, Presión ponderada y Delta.

5.2.5 La EETA como una de las respuestas

Teniendo en cuenta que en el modelo PER la respuesta está relacionada con las medidas de gestión que emprende la sociedad para corregir el daño existente sobre los ecosistemas o preservar el buen estado de ellos, como demostrativo se utilizará una evaluación de la respuesta basada en la estructura que el POD de Antioquia ha

propuesto como medida para preservar algunas de las áreas naturales del territorio, es decir, la EETA.

Para lograr lo anterior, los polígonos que componen la EETA se superpusieron con el mapa Delta (Figura 6c) y posteriormente, se hizo un análisis considerando los desequilibrios que presentaban algunas áreas de las distintas categorías de la EETA. Con el fin de lograr una mejor visualización de las áreas, cada categoría se despliega en una imagen distinta o se presentan dos categorías en una misma imagen.

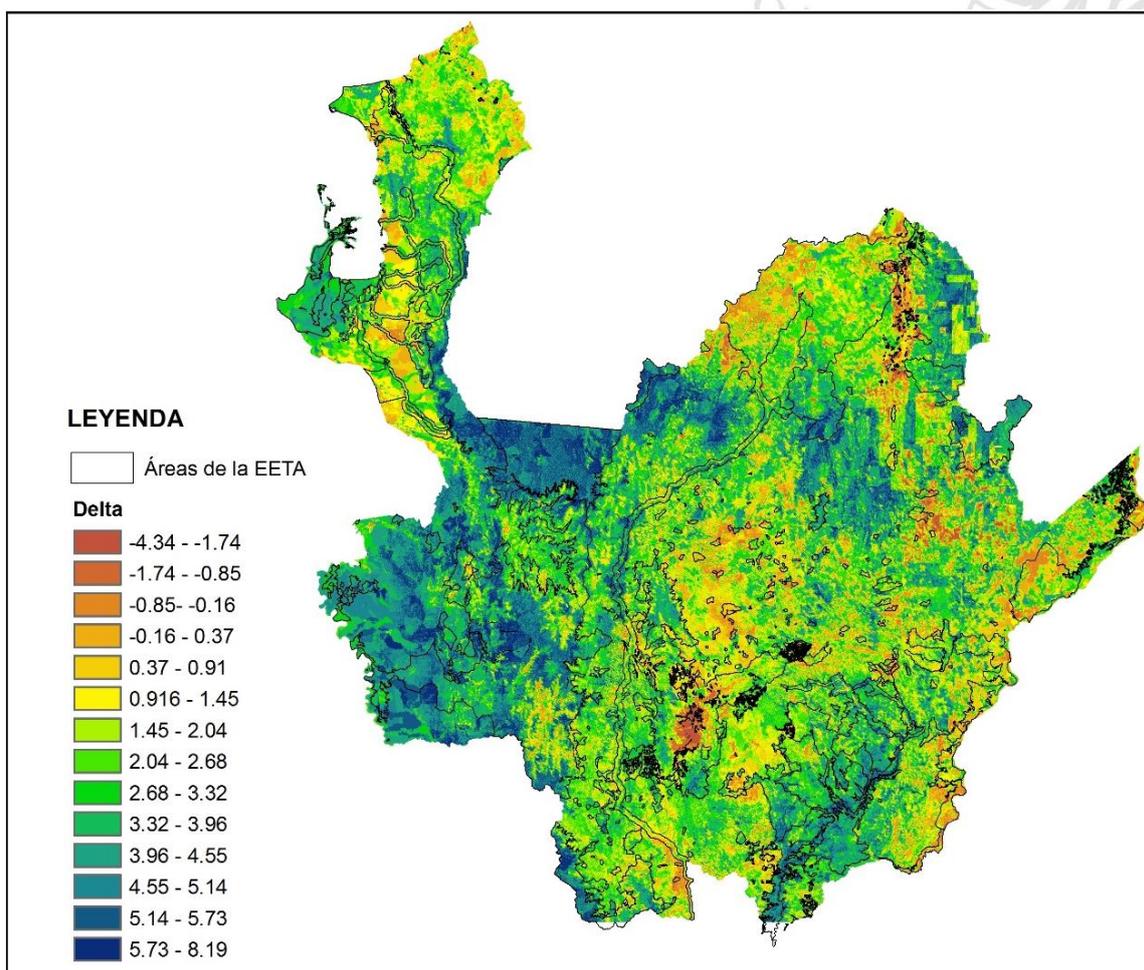


Figura 7. Superposición del mapa Delta con todas las categorías de la EETA.

5.2.5.1 Análisis por categorías de la EETA

- **Áreas incluidas en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP) y Páramos.**

En esta categoría no se analizaron cada una de las áreas que la componen, sino que se escogieron tres, un Distrito de Manejo Integrado y dos Parques Nacionales Naturales.

DMI Sistema de Paramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño.

En el mapa de la Figura 8 puede observarse que, en las márgenes de la delimitación de esta área protegida, prevalecen los desequilibrios altos (colores amarillos a naranjados), pero al adentrarse en la zona central del área, en donde precisamente se encuentra el páramo de Santa Inés, predominan los desequilibrios bajos (colores verdes a azules). Este comportamiento es concordante con la definición misma de esta categoría de protección, pues al ser un DMI está conformado por zonas de preservación, de restauración y de uso sostenible. De manera que los desequilibrios altos, podrían asociarse a las actividades de uso sostenible, que según lo observado en los mapas de presión (sección 5.2.3.6), están relacionadas principalmente con la actividad ganadera.

Parque Nacional Natural Las Orquídeas.

En esta área predominan los desequilibrios bajos, sin embargo, puede notarse que en la margen noroccidental del área, en límites con la Reserva Forestal Protectora Nacional Carauta, empiezan a aparecer colores amarillos y naranjados que alertan sobre la posible intromisión de actividades agropecuarias o de extracción de madera en este Parque Nacional, cuyo único fin es la conservación.

Parque Nacional Natural Paramillo.

En el PNN Paramillo se observa la dominancia de desequilibrios bajos, pero con algunas pequeñas intrusiones de manchas amarillas. Es de resaltar que según el décimo quinto boletín de alertas tempranas de deforestación para el segundo trimestre de 2018 del IDEAM, el principal núcleo de alertas de deforestación se detectó en el sur de Córdoba en cercanías al PNN Paramillo, por lo que podría considerarse que las tensiones que sufre esta área pueden ser mucho mayores a las que se lograron representar en este análisis.

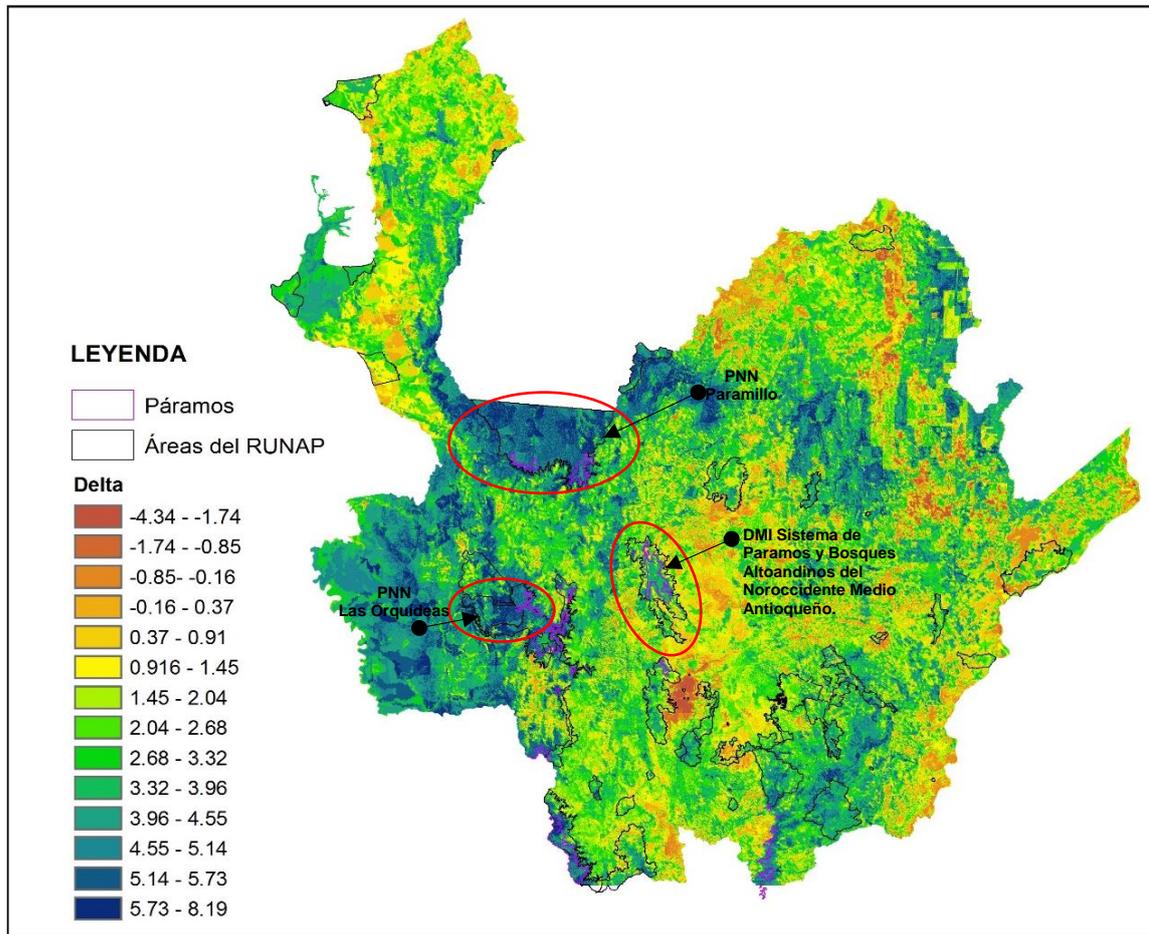


Figura 8. Mapa Delta superpuesto con las categorías de la EETA 'Áreas del RUNAP' y 'Páramos'.

- **Acuíferos y humedales**

En cada uno de los cinco sistemas acuíferos que están representados en la EETA, al superponerlos con el mapa Delta (Figura 9) se observa un mosaico de colores, dominado principalmente por desequilibrios altos (colores amarillos y rojos). El acuífero de Urabá es el único que presenta en algunas zonas, tensiones bajas (colores más azules). Pero en general, puede considerarse que las presiones tienden a exceder la capacidad de carga de estos sistemas subterráneos.

En cuanto a los humedales, son de resaltar los altos desequilibrios presentes en el complejo de humedales del Bajo Cauca, que parecen ser explicados por la baja valoración de los estados y la muy alta valoración de las presiones que se consideraron en esta subregión. Una situación similar se presenta en los humedales del Magdalena Medio. Por otra parte, los humedales de la subregión de Urabá son los que exhiben menores desequilibrios.

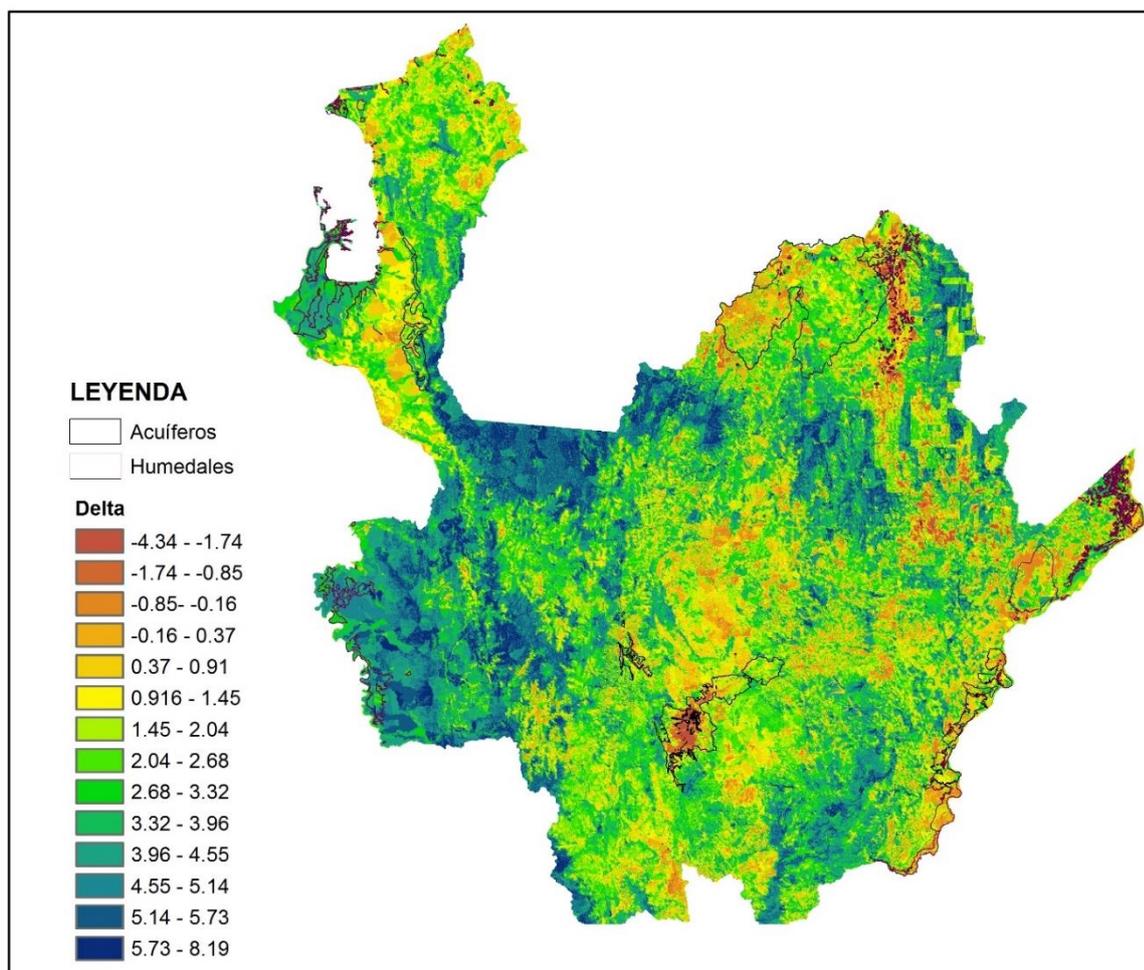


Figura 9. Mapa Delta superpuesto con las categorías de la EETA 'acuíferos' y 'humedales'.

- **Áreas de la Ley Segunda Zona A**

Puede observarse en la Figura 10 que las áreas de la Ley Segunda zonificadas como tipo A que presentan menores desequilibrios son aquellas localizadas en los municipios de Mutatá, Murindó, Vigía del Fuerte y Sonsón. Por otro parte se resaltan altos desequilibrios en las áreas que hacen parte del municipio de Abriaquí y que limitan con el Parque Natural Regional Las Alegrías. Estos altos desequilibrios en esta y en otras zonas pueden ser producto de la baja valoración del estado total, derivada de unos valores de cobertura muy bajos.

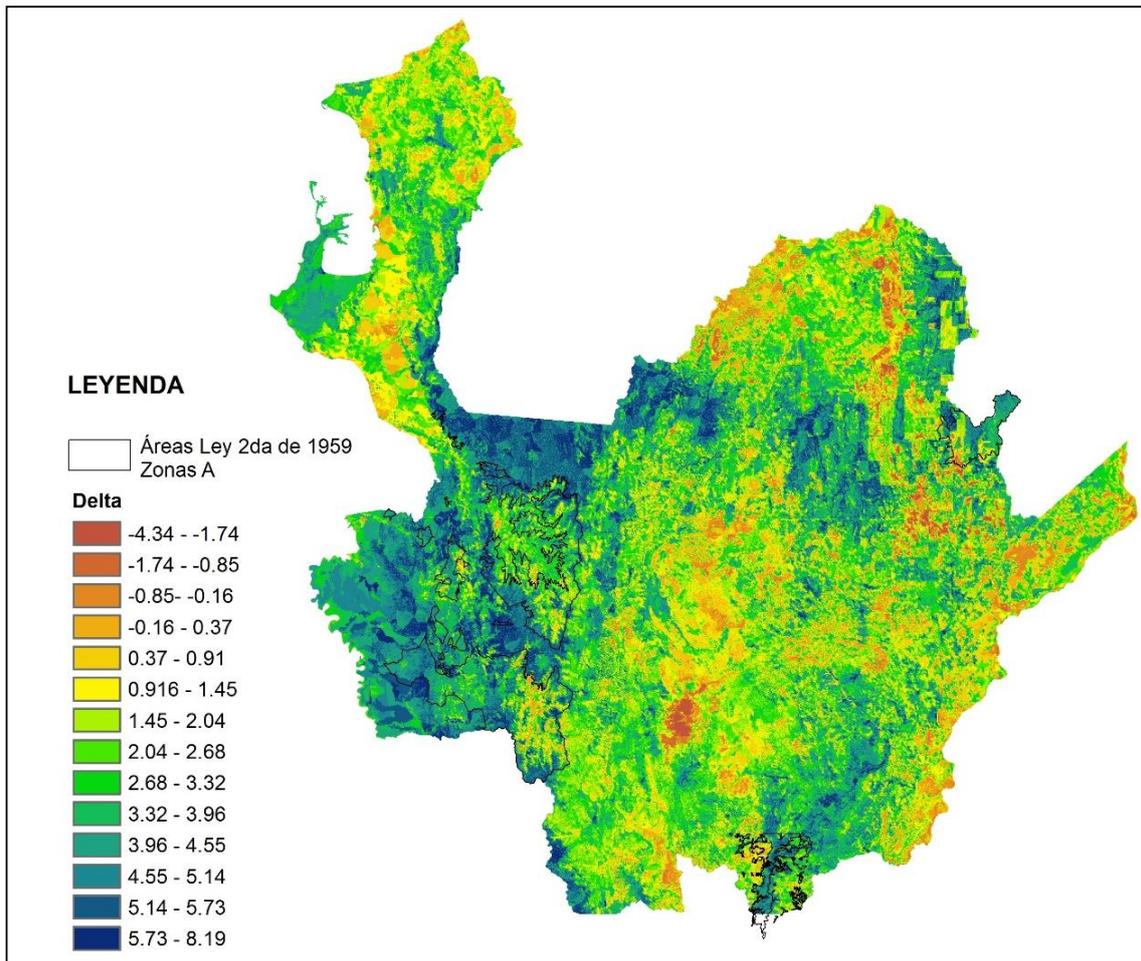


Figura 10. Mapa Delta superpuesto con la categoría de la EETA 'Áreas de la Ley 2da de 1959-Zonas A'

- **Rondas y nacimientos de agua**

De los pocos polígonos que están representando las rondas y los nacimientos de agua (Figura 11), la mayoría están sobre una matriz de colores amarillos y naranjados, lo que corresponde a desequilibrios altos; las excepciones son escasas, destacándose principalmente el área denominada 'Cañones de los ríos, Claro, Cocorná Sur, Samaná Norte y Samaná Sur', ubicada en el suroriente del departamento, como la que presenta desequilibrios más bajos, producto de un estado muy bien valorado, con unas presiones muy pequeñas.

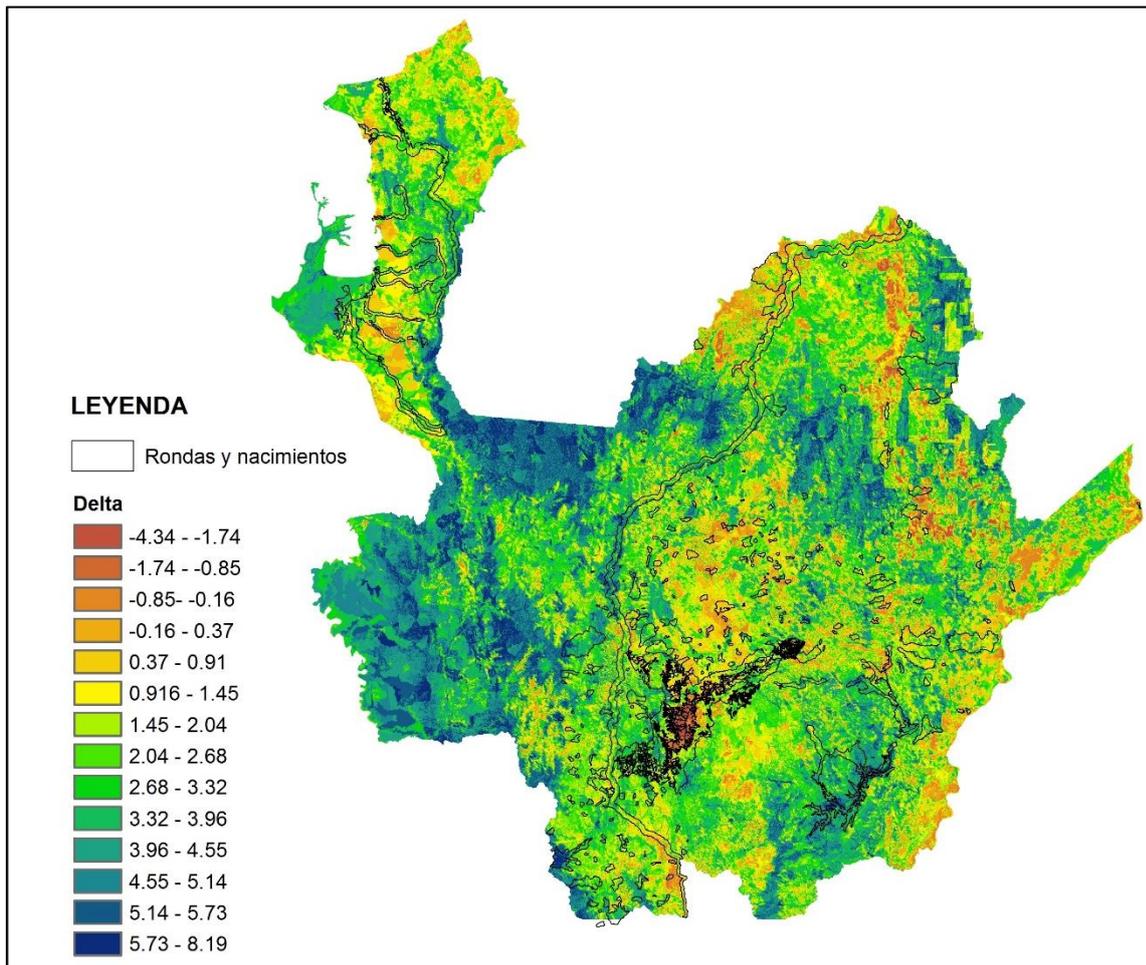


Figura 11. Mapa Delta superpuesto con la categoría de la EETA 'Rondas y nacimientos de agua.'

6 CONCLUSIONES

En el análisis que se llevó a cabo de la Estructura Ecológica Principal (EEP) y de la Estructura Ecológica Territorial Adaptativa (EETA), como los modelos propuestos de Estructura Ecológica en distintos ejercicios de planeación del departamento de Antioquia, se evidenció que las dos propuestas son muy afines, en el sentido de que conceptualmente, ambas están concebidas como áreas que contribuyen a sustentar las funciones ecológicas y a proveer los servicios ambientales que la sociedad requiere. Además, en términos de representación cartográfica también se observó un alto grado de coincidencia en la mayoría de los elementos que componen los mapas de ambas estructuras, estando las máximas diferencias representadas por las mayores áreas de coberturas boscosas y corredores de conectividad que fueron incluidas en la EEP.

Por otra parte, la aplicación del modelo Presión-Estado-Respuesta permitió, de cierta manera, localizar algunas situaciones que menoscaban la base natural del territorio, pero también puso en evidencia el potencial natural con el que cuenta el departamento, el cual, en cierta medida es capaz de soportar o contrarrestar las presiones antrópicas que enfrentan los ecosistemas y los recursos naturales. Esto se puede afirmar a partir de los resultados que se obtuvieron en el mapa Delta, en el que se observa que los desequilibrios bajos son predominantes; no obstante, este mapa también advierte sobre la urgente necesidad de ampliar las medidas de gestión a zonas que presentan grave deterioro o de reevaluar la efectividad que están surtiendo las que ya están establecidas.

7 RECOMENDACIONES

- Es muy importante que desde el Departamento Administrativo de Planeación se siga profundizando en la construcción y consolidación de la Estructura Ecológica del departamento, no de manera individual sino a través de un trabajo mancomunado con la Secretaría de Ambiente Departamental y las Corporaciones Autónomas Regionales que rigen en el departamento de Antioquia, pues finalmente son ellas las que tienen un conocimiento detallado del contexto físico biótico sobre el que se soporta el territorio y las que tienen la responsabilidad de diseñar, implementar y vigilar las medidas de gestión ambiental que sobre él se apliquen. Además, debe contarse con la participación de entidades nacionales encargadas de estos temas.
- El modelo PER es un instrumento que al evaluar los estados y presiones que sufre el ambiente natural se convierte en un importante insumo que puede aportar elementos de discusión a los procesos de ordenamiento territorial,

ambiental y de planeación del desarrollo que se ejecutan a niveles municipales o supramunicipales. La aplicación que se dio al modelo en este trabajo, demuestran cómo la combinación de los SIG y la evaluación multicriterio son útiles para esos propósitos.

- Teniendo en cuenta que el modelo PER es un modelo estático, en el sentido de que representa la situación del territorio con base en variables que corresponden a un período de tiempo dado (fotos del territorio), y considerando que el territorio es un sistema dinámico en constante interacción; se precisa que la aplicación de este modelo como un instrumento de seguimiento a los mecanismos de gestión o a la ejecución de normas, planes y proyectos relacionados con el ordenamiento ambiental y territorial, recobra mucha más utilidad y menos incertidumbre, si se realiza de manera periódica con la información más actualizada posible.
- Se destaca que la estructura del modelo PER ofrece la posibilidad de incluir tantas variables como información disponible se tenga, por lo que podría resultar interesante profundizar en las presiones que sufren los ecosistemas del departamento, si se consideran variables como las plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de agua residual, plantas de generación de energía eléctrica, solo por mencionar algunas que podrían relacionarse con la presión sobre el recurso hídrico.
- Añadiendo unos pocos pasos más al procedimiento del modelo hidrológico de la sección 5.2.2.2, pueden calcularse los órdenes de las corrientes, y al combinar estos con los mapas de coberturas y pendientes, es posible establecer un soporte técnico que encamine algunas medidas de gestión ambiental, por ejemplo, un área que posea altas pendientes, cobertura pobre y un orden de drenaje 1, será una zona en la que deberán implementarse medidas de restauración; por otro lado, en un área que posea las mismas características del área anterior pero con la diferencia de que tiene una cobertura boscosa, deberán incentivarse o potenciarse las medidas de preservación.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. *Decreto Distrital 364*. (26, agosto, 2013). Por el cual se modifican excepcionalmente las normas urbanísticas del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C., adoptado mediante Decreto Distrital 619 de 2000, revisado por el Decreto Distrital 469 de 2003 y compilado por el Decreto Distrital 190 de 2004.

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. *Decreto Distrital 619*. (28, julio, 2000). Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial para Santa Fe de Bogotá, Distrito Capital.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO-BID. *Carreteras y capital natural: Gestión de las dependencias y de los efectos sobre los servicios ecosistémicos para inversiones sostenibles en infraestructura vial*. 2015. 58 p. [En línea]. Disponible en <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Carreteras-y-capital-natural-Gesti%C3%B3n-de-las-dependencias-y-de-los-efectos-sobre-los-servicios-ecosist%C3%A9micos-para-inversiones-sostenibles-en-infraestructura-vial.pdf>

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO-BID. *Road Impact Assessment Using Remote Sensing Methodology for Monitoring Land-Use Change in Latin America: Results of Five Case Studies*. 2015. 26p. [En línea]. Disponible en <https://publications.iadb.org/handle/11319/5963#sthash.di7Zpytp.dpuf>

BORRERO, Morales N. *Aluvión: A Cielo abierto*. Semana Sostenible. 01 de diciembre de 2014. [En línea]. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/multimedia/mineria-aluvion-cielo-abierto/32234>

CABRERA, Leal M. & FIERRO Morales J. *Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia*. En: *Minería en Colombia, Derechos, políticas públicas y gobernanza*. Bogotá: Contraloría General de la República, 2013. p. 102-122. ISBN 978-958-9351-89-5

CAMPAÑA A. *Interrelaciones de los problemas del medio ambiente y de la dinámica poblacional. Programa global en población y desarrollo CELADE*. CEPAL:1992. 16p. [En línea]. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/32736/D-18191.00_es.pdf?sequence=1

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. *Ley 388*. (24, julio, 1997). Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Decreto 2811*. (18, diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Decreto 3600*. (20, septiembre, 2007). Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.

COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. *Decreto 0019*. (10, enero, 2012). Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública.

COMISIÓN TRIPARTITA, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, UNIVERSIDAD NACIONAL y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. *Lineamientos de Ordenación Territorial para Antioquia Fase II*. Medellín, Colombia: Comisión Tripartita, 2012. 296 p. ISBN 978-958-8711-39-3.

CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA & AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. *Doctrina Fiscal en lo Ambiental-Estado de los Recursos Naturales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Antioquia*. 2017. 117p. ISBN 978-958-8513-91-1.

CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA. *Informe Anual sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente en Antioquia 2017, de la vigencia 2016*. 2017. 645p.

CONTRERAS E. *Evaluación social de proyectos*. 2009. [En línea]. Disponible en https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/7/35117/ev_social_ILPES_2009_4_multi_criterio.pdf

CORREA J. & ESCOBAR J. *Estudio de las interacciones población - demanda de agua utilizando técnicas geoinformáticas*. 2010. Universidad de Antioquia, Grupo GIGA.

DANE. *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Segunda entrega preliminar. [En línea]. Disponible en <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>

ESCOBAR J., BETANCUR T., GARCÍA E., MARTINEZ C. & PALACIO P. *Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos*. En: Revista Politécnica. Enero-Junio 2017. Año 13, no.24 pp. 37-48. ISSN 1900-2351.

FAO & IWMI. *Water pollution from agriculture: a global review*. 2017. [En línea]. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i7754e.pdf>

FUNDACIÓN EPM & GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA (2018). *Antioquia un territorio para proteger*. Medellín: Fundación EPM. 258 p. ISBN978-958-99097-6-8.

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. *Propuesta de Estructura Ecológica Principal para Antioquia (Versión preliminar)*. Medellín, Colombia: Departamento Administrativo de Planeación, 2015. 50 p.

GONZÁLEZ C. S. y VÁSQUEZ A. *Estado de los bosques de Antioquia entre 1990-2015*. En: Quintero Vallejo, E., Benavides, A.M, Moreno, N., González-Caro, S. (Ed.), *Bosques Andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia* (pp. 39-83). Medellín, Colombia: Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe-Programa Bosques Andinos (COSUDE). 1 Ed – Medellín, 2018.

IDEAM, INVEMAR, CORALINA & CONSERVACIÓN INTERNACIONAL. *Aspectos del cambio climático y adaptación en el ordenamiento territorial de alta montaña*. Guía metodológica, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático – INAP– componente B. Bogotá. 2011. 166p. [En línea]. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022084/GUIAFINALOT.pdf>

IDEAM, INVEMAR, CORALINA & CONSERVACIÓN INTERNACIONAL. *Resultados del Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP*. Bogotá. 2011. 122p. [En línea]. Disponible en http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Proyecto_nacional_de_adaptacion_al_cambio_climatico_INAP.pdf

IDEAM. *El Agua*. En: *El Medio Ambiente en Colombia*. Bogotá: IDEAM, 2001. p. 114-189. ISBN 958-95850-94. [En línea]. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf>

IGAC. *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. 2014. 44p. [En línea]. Disponible en: <http://sofigac.igac.gov.co/>

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT-IAvH. *Bosques Secos Tropicales en Colombia*. [En línea]. Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/proyectos/en-desarrollo/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>

MAHECHA L. & GALLEGO L. *Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad*. En: *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 15. (39). 2002. [En línea]. Disponible en: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/rccp/article/view/323816>

- MÁRQUEZ G. & VALENZUELA E. *Estructura ecológica y ordenamiento territorial ambiental: aproximación conceptual y metodológica a partir del proceso de ordenación de cuencas*. En: *Gestión y Ambiente*. 11 (2). 2008. pp 137-148.
- MURGUEITIO E. *Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución*. En *Livestock Research for Rural Development*. 15 (10). 2003. [En línea]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd15/10/murg1510.htm>
- OECD. *Using the pressure-state-response model to develop indicators of sustainability*. 2004. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/017931/DocumentosIndicadores/Temasvarios/Docum26.pdf>
- ORREGO S. *Economic modeling of tropical deforestation in Antioquia (Colombia), 1980–2000: An analysis at a semi-fine scale with spatially explicit data*. 2009. Oregon State University. Citado por: GONZÁLEZ S. & VÁSQUEZ A. Estado de los bosques de Antioquia entre 1990-2015. En: *Bosques Andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia*. 2017. Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe- Programa Bosques Andinos (COSUDE). Medellín. 542p.
- OSORIO G. J. & OREJUELA C. *El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación*. En: *Scientia et Technica XIV*, No. 39, septiembre, 2008. ISSN 0122-1701.
- REMOLINA F. *Propuesta de Estructura Ecológica Regional de la Región Capital y guía técnica para su declaración y consolidación*. 2010. Bogotá D.C: Alcaldía Mayor de Bogotá. 121p.
- SECRETARÍA TÉCNICA COT NACIONAL, COMITÉ ESPECIAL INTERINSTITUCIONAL. *Lineamientos para el proceso de ordenamiento territorial departamental*. Contenidos básicos. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2013. p. 44.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. *Plan de Ordenamiento Departamental de Antioquia*. 2018. [Sin publicar].
- VALBUENA S., TAVERA H. & PALACIOS MT. *Propuesta de Estructura Ecológica Regional para la Región Central*. 2008. Bogotá, D.C: Gobernación de Cundinamarca, Alcaldía Mayor de Bogotá, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional –UNCRD del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas-UNDESA, Instituto Alexander von Humboldt. 61p.
- VAN DER HAMMEN T. & ANDRADE G. *Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación*. 2003. Bogotá, D.C: IDEAM. 74p. [En línea]. Disponible en:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/015647/Estructuraecologicaprinicipal.pdf>

VAN DER HAMMEN T. *Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá*. 1998. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 142p. [En línea]. Disponible en: <http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33796/28263.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

WORLD RESOURCE INSTITUTE. *Environmental indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*. 1995. 58p. [En línea]. Disponible en: http://pdf.wri.org/environmentalindicators_bw.pdf

ZUÑIGA H. *La pendiente compleja atributo del territorio, útil en el ordenamiento espacial del municipio*. Ensayo técnico. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. 25p. [En línea]. Disponible en: https://comunidad.udistrital.edu.co/hzuniga/files/2012/06/pendiente_compleja.pdf