

Análisis de la fragilidad ecosistémica como estrategia para la estimación del riesgo asociado a la contaminación atmosférica en el Alto San Jorge, Colombia*

Mauricio Rosso Pinto[†] 

Ana Karina Pérez Peñate[†] 

Yhonattan Méndez Nobles[§] 

Humberto Tavera Quiroz^{**} 

Jorge Cárdenas de La Ossa^{††} 

María Alejandra Martínez Macea^{‡‡} 

Sofía Torres Sena^{§§} 

Resumen

La calidad del aire en la región del Alto San Jorge está siendo afectada por la minería, cuyos impactos ambientales se asocian a afectaciones en la salud humana. El objetivo del estudio fue analizar la fragilidad ambiental de los ecosistemas para identificar y relacionar las afectaciones a la salud ambiental como consecuencia de la emisión de contaminantes atmosféricos. La metodología inició con la caracterización física y geoespacial del área y la atribución de pesos ponderados mediante el proceso analítico jerárquico. La suma ponderada de las capas de datos se realizó a través de Sistemas de Información Geográfica definiendo clases de fragilidad del ecosistema basados en Ross (1994). De esta manera, se determinó la amenaza y el riesgo por contaminación atmosférica para SO₂, NO₂, PM_{2,5} y PM₁₀. Los resultados mostraron la existencia de riesgo de medio a alto y alto por SO₂ en las zonas aledañas a los cascos urbanos. Para NO₂, el riesgo fue homogéneo en un nivel intermedio para toda la zona. Para el material particulado (2,5 µm y 10 µm), de medio a alto y alto debido a la influencia de minería de ferroníquel y carbón. Este estudio denota la necesidad de aplicar oportunamente medidas de prevención, mitigación o control de este riesgo.

Palabras clave: calidad del aire, contaminación atmosférica, fragilidad ambiental, impactos a ecosistemas, minería, salud ambiental.

Ideas destacadas: artículo de investigación. La contaminación del aire genera estrés nutricional en las plantas. El estudio de fragilidad ambiental fortalece la planificación territorial al clasificar y valorar atributos ambientales como: cobertura de la tierra, biomas, geología, litología, precipitación anual y pendiente. Al relacionar la fragilidad y la amenaza por contaminantes atmosféricos en el Alto San Jorge, se estimó el riesgo de afectación del ecosistema.



RECIBIDO: 14 DE MAYO DE 2021. | EVALUADO: 3 DE SEPTIEMBRE DE 2021. | ACEPTADO: 21 DE MARZO DE 2022.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Rosso Pinto, Mauricio; Pérez Peñate, Ana Karina; Méndez Nobles, Yhonattan; Tavera Quiroz, Humberto; Cárdenas de La Ossa, Jorge; Martínez Macea, María Alejandra; Torres Sena, Sofía. 2022. "Análisis de la fragilidad ecosistémica como estrategia para estimación del riesgo asociado a la contaminación atmosférica en el Alto San Jorge, Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 31 (2): 303-323. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.95774>

* El presente artículo científico fue desarrollado en el marco del proyecto "Optimización del diseño e implementación de la primera fase del sistema de vigilancia de la calidad del aire en la región del Alto San Jorge" financiado por la Corporación Ambiental de los Valles del Sinú y San Jorge y ejecutado por la Unión Temporal San Jorge.

[†] Universidad de Córdoba, Montería – Colombia. ✉ mauriciorosso@correo.unicordoba.edu.co – ORCID: 0000-0002-3919-4127.

[‡] Universidad de Córdoba, Montería – Colombia. ✉ anakperezp@hotmail.com – ORCID: 0000-0003-3189-3692.

[§] Universidad Pontificia Bolivariana, Montería – Colombia. ✉ yhonattan.mendez@upb.edu.co – ORCID: 0000-0001-9654-0244.

^{**} Universidad de Córdoba, Montería – Colombia. ✉ htaveraq@gmail.com – ORCID: 0000-0002-9176-7658.

^{††} Universidad de Córdoba, Montería – Colombia. ✉ jorgecardenas@correo.unicordoba.edu.co – ORCID: 0000-0002-6684-712X

^{‡‡} Universidad de Córdoba, Montería – Colombia. ✉ mariamartinezm@correo.unicordoba.edu.co – ORCID: 0000-0002-6697-8672.

^{§§} Universidad Pontificia Bolivariana, Montería – Colombia. ✉ sofia.torres@upb.edu.co – ORCID: 0000-0002-9893-2724.

✉ Correspondencia: Mauricio José Rosso Pinto, Calle 94 # 8-28, Montería, Colombia.

Ecosystem Fragility Analysis as A Strategy for Estimating the Associated Risk to Atmospheric Pollution in Alto San Jorge, Colombia

Abstract

Air quality in the Alto San Jorge region is being affected by mining, with environmental impacts associated to human health problems. The objective of the study was to analyze the environmental fragility of the ecosystems to identify and relate the effects on environmental health as a consequence of the emission of atmospheric pollutants. The methodology began with the physical and geospatial characterization of the area and the attribution of weighted weights through the hierarchical analytical process. The weighted summation of the information layers was performed in GIS, defining ecosystem fragility classes based on Ross (1994). In this way, the threats and risks due to atmospheric contamination for SO₂, NO₂, PM_{2,5} and PM₁₀ were determined. The results showed the existence of medium to high and high risk for SO₂ in the areas surrounding the urban centers. For NO₂, the risk was homogeneous at an intermediate level for the entire area, and for particulate matter (2.5µm and 10µm), from medium to high and high due to the influence of ferronickel and coal mining. This study indicates the need to apply timely prevention, mitigation and/or control measures for this risk.

Keywords: air quality, air pollution, environmental fragility, ecosystem impacts, mining, environmental health.

Highlights: air pollution generates nutritional stress in plants. The environmental fragility study strengthens territorial planning by classifying and evaluating environmental attributes as land cover, biomas, geology, lithology, annual precipitation, and slope. The risk of affecting the ecosystem was estimated by relating fragility and the threat of atmospheric pollutants in the Alto San Jorge.

Análise da fragilidade do ecossistema como estratégia para estimar o risco associado à poluição atmosférica em Alto San Jorge, Colômbia

Resumo

A qualidade do ar na região do Alto San Jorge está sendo afetada pela mineração, cujos impactos ambientais estão associados à saúde humana. O objetivo do estudo foi analisar a fragilidade ambiental dos ecossistemas, identificando e relacionando os efeitos na saúde ambiental decorrentes da emissão de poluentes atmosféricos. A metodologia se iniciou com a caracterização física e geoespacial da área e atribuição de pesos ponderados mediante o processo analítico hierárquico. A soma ponderada das camadas de informação foi realizada em SIG, estabelecendo classes de fragilidade do ecossistema com base em Ross (1994). Assim, foram determinados a ameaça e o risco de poluição do ar para SO₂, NO₂, PM_{2,5} e PM₁₀. Os resultados mostraram a existência de risco médio a alto e alto para SO₂ no entorno dos centros urbanos. Para o NO₂, o risco foi homogêneo ao nível intermediário para toda a área. Para o material particulado (2,5µm e 10µm), de médio a alto e alto, devido à influência do ferroníquel e da mineração de carvão. Este estudo denota a necessidade de aplicação oportuna de medidas de prevenção, mitigação ou controle desse risco.

Palavras-chave: qualidade do ar, poluição atmosférica, fragilidade ambiental, impactos nos ecossistemas, mineração, saúde ambiental.

Ideias destacadas: a poluição do ar gera estresse nutricional nas plantas. O estudo da fragilidade ambiental fortalece o planejamento territorial ao classificar e avaliar atributos ambientais como: cobertura do solo, biomas, geologia, litologia, precipitação anual e declividade. Ao relacionar a fragilidade e a ameaça de poluentes atmosféricos no Alto San Jorge, estimou-se o risco de afetar o ecossistema.

Introducción

El incremento de la población en conjunto con el aumento de actividades como el transporte, la producción de bienes, entre otros, conlleva la generación de emisiones de contaminantes que alteran la calidad del aire, por encontrarse en concentraciones que afectan la salud y el ambiente (Conpes 2018). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO 2017), la exposición a contaminantes del aire puede afectar la salud humana de diversas maneras, por tanto representa un aumento de la mortalidad y la morbilidad; la evidencia epidemiológica sobre los efectos de la contaminación del aire a la salud evoluciona rápidamente, y por esto se constituye como un factor de riesgo ambiental. A su vez, la presencia de contaminantes en el aire afecta la dinámica de los ecosistemas naturales y antropogénicos, el clima y, en consecuencia, la sociedad y su economía (De Marco et ál. 2019).

La contaminación del aire se define como la concentración de sustancias, gases y partículas, que alteran la composición de la atmósfera —dependiendo del nivel de emisión— el clima y la topografía (Conpes 2018). La calidad del aire define su estado de limpieza e influye en la salud de personas, animales y plantas. La afectación a la calidad del aire puede deberse a los patrones de ocupación territorial, movilidad, producción, consumo, cantidad y calidad de las emisiones (Rojas et ál. 2019).

Entre los principales contaminantes en el aire se encuentran las partículas en suspensión, las cuales pueden estar formadas por distintos componentes, entre ellos ácidos, como nitratos y sulfatos, amoníaco, cloruro sódico, productos químicos orgánicos, metales, partículas de polvo y alérgenos (Rodríguez 2019). Las concentraciones de este tipo de contaminantes superan con frecuencia los estándares ambientales y a pesar de ser un problema en las ciudades y los centros urbanos más poblados, el impacto a la salud pública afecta la calidad de vida de todas las personas (Arroyave-Maya et ál. 2018).

Por otra parte, la mala calidad del aire impacta negativamente los ecosistemas terrestres y forestales que tienen un papel clave en la prestación de servicios ecosistémicos como la purificación del aire debido a la afectación en la funcionalidad de los árboles y su capacidad de captura de carbono (De Marco et ál. 2019). La precipitación ácida, por ejemplo, es formada a partir del dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en la atmósfera, y ocasiona efectos tóxicos sobre plantas,

animales y organismos acuáticos. Además, a largo plazo, conduce al deterioro progresivo de la calidad del suelo, la acidificación de las aguas y los suelos por lixiviación de nutrientes, eutrofización y disminución de la salud forestal (Democker 2011).

El depósito del dióxido de azufre y de los óxidos de nitrógeno disminuyen la capacidad de los ecosistemas de proporcionar servicios ecosistémicos, entendiendo estos como los múltiples beneficios que la naturaleza y sus componentes proporcionan a la humanidad y que son esenciales para el mantenimiento de la vida (Sirombra 2019). Los contaminantes en el aire influyen en el ciclo de nutrientes, el ciclo del carbono y el suministro de agua. También disminuyen los porcentajes de cobertura vegetal e impiden la posibilidad de que los árboles y la vegetación absorban contaminantes, lo que reduce la capacidad de filtrado para la limpieza del aire (Carvalho y Szlafsztajn 2019).

La acumulación y sobrecarga de nutrientes en los cuerpos de agua ocasiona proliferación de algas, pérdida de oxígeno, de la vida acuática y de la biodiversidad. Por otro lado, la concentración de sustancias nocivas afecta directamente el agua potable, como producto de la filtración al agua subterránea de las sustancias que se depositan en el suelo (Michel y Seidling 2016).

La contaminación del aire es un factor que modifica la dinámica de los ecosistemas: en condiciones de bajas concentraciones, los ecosistemas funcionan como sumideros de los contaminantes del aire. No obstante, en condiciones de concentración media, se genera estrés nutricional y afectación de la tasa fotosintética de crecimiento y reproducción de las plantas. Ahora bien, cuando existen altas concentraciones de contaminantes en el aire puede aumentarse la morbilidad y mortalidad de la flora y fauna y la disminución de la biodiversidad y la cobertura general (Saxena y Sonwani 2019). Estos impactos disminuyen la oferta de servicios de regulación del clima, los regímenes de precipitación y la disponibilidad de agua. También, se puede dar una limitación de las actividades acuícolas (Foro FSN FAO, Agricultural Development Economics Division 2015).

La región del Alto San Jorge requiere monitoreo y vigilancia de la calidad del aire debido a las actividades mineras desarrolladas en la zona (Asif, Chen y Zhu 2019). Adicionalmente, otros factores como la degradación del suelo, la contaminación del agua, el transporte, las inundaciones, la ganadería y agricultura extensiva contribuyen a la degradación y contaminación atmosférica (Zou et ál. 2016).

Afrontar las problemáticas ambientales es un proceso complejo que involucra múltiples dimensiones y está determinado por una variedad de factores de riesgo de diferentes tipologías (físicos, químicos, biológicos, ecológicos, sociales, económicos y políticos), que se encuentran relacionados de manera intrínseca e interactiva. Para llevar a cabo este proceso, es necesario comprender los componentes y las características del medioambiente, sus funciones y sistemas que lo constituyen, así como determinar las interrelaciones, mecanismos y conflictos existentes (Dimitriou y Christidou 2011). Es clave desarrollar herramientas estratégicas que permitan la adopción de procedimientos específicos para planificar los sistemas socioecológicos, las cuales deben tener en cuenta los elementos geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos y biológicos de la región como factores limitantes potenciales y de esta manera describir la idoneidad de la región para diferentes actividades humanas, constituyéndose en herramientas para la mejora en la toma de decisiones por las autoridades locales, basados en las condiciones de fragilidad ambiental (Coheci et ál. 2019).

El estudio de la fragilidad ambiental aporta a la planificación y gestión del territorio de forma efectiva, lo que evita la expansión de la degradación ambiental y los conflictos de uso del suelo y de recursos naturales. Así, el análisis y la caracterización de las condiciones de fragilidad fortalecen la toma de decisiones asociadas al uso y manejo adecuado del suelo (Sales y Do Nascimento 2019).

Por su parte, Gimenes y Filho (2013) definen la fragilidad ambiental como la desestabilización del equilibrio dinámico existente en el medioambiente, y además consideran que esta es una característica intrínseca del medio en sí. De esta manera, su análisis constituye una herramienta de uso potencial que permite la evaluación integrada de las capacidades y vulnerabilidades de un territorio (Costa et ál. 2015). Al analizar la fragilidad como una "interacción entre la vulnerabilidad y las influencias antropogénicas" (Coheci et ál. 2019) se hace necesario un estudio que integre y analice todos los elementos que componen el espacio geográfico, y que diagnostiquen la fragilidad de manera jerárquica (Carvalho et ál. 2019).

La región del Alto San Jorge se caracteriza por un fuerte conflicto de uso del suelo debido a la concesión de títulos mineros para la explotación de ferroníquel y carbón en el territorio, lo que ha generado la desaparición paulatina de la agricultura a pequeña escala. Así mismo, la flexibilidad de la normativa minero-ambiental de la época permitió la magnificación de algunos impactos ambientales y el

deterioro de los servicios ecosistémicos. Teniendo en cuenta que el uso y la cobertura de la tierra es un factor ampliamente asociado a la fragilidad ambiental, y que existen en la zona conflictos asociados a este atributo ambiental, se espera identificar y caracterizar áreas de alta fragilidad de los ecosistemas frente a la contaminación atmosférica en el área de estudio. Si bien es cierto que la contaminación por gases de efecto invernadero es un evento amenazante para los ecosistemas, son las condiciones ambientales, geológicas, geomorfológicas, climatológicas y de cobertura de la tierra, las que los hacen más susceptibles a diferentes impactos ambientales. Se debe entonces caracterizar, entender y cartografiar la fragilidad ambiental del ecosistema asociado a la calidad del aire, con el fin de establecer medidas de reducción o mitigación de esas condiciones (Guzmán-Manrique y Flórez-García 2019).

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar la fragilidad ambiental de los ecosistemas de la zona, relacionando las posibles afectaciones a la salud ambiental como consecuencia de la emisión de contaminantes atmosféricos resultantes del desarrollo de las actividades minero-energéticas.

Materiales y métodos

Caracterización del área de estudio

La región del Alto San Jorge hace parte de las subzonas hidrográficas Bajo Sinú, Medio Sinú, Alto Sinú-Urrá y Alto San Jorge, con una extensión de 1.806.281,151 ha (ANLA 2019). Específicamente, la subzona hidrográfica del Alto San Jorge se encuentra ubicada al sur del departamento de Córdoba y está conformada por los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré con un área total de 370.000 ha.

La cobertura territorial de estos municipios abarca el 14,6 % del departamento y su población alcanza el 15,6 % del total de habitantes de Córdoba, entre los cuales existen comunidades indígenas (zenú y emberas) y afrodescendientes, principalmente en los centros poblados de Bocas de Uré, Centro América, Guacarí-La Odisea, Pueblo Flecha, Puente Uré, Puerto Colombia, Torno Rojo y el Consejo Comunitario de Comunidades Negras de San José de Uré. La región del Alto San Jorge está en la zona de vida de Bosque Húmedo Tropical (bh-T); debido a esto, el clima se encuentra repartido en los pisos térmicos cálido, templado y frío en sus zonas más altas, tiene una temperatura promedio de 27,4 °C y precipitación promedio anual de 2.569 mm (ANLA 2019).

Las actividades económicas principales de la zona pertenecen al sector minero-energético, debido a la explotación de ferroníquel y minería aurífera, y a la presencia de líneas de transmisión y generadoras de energía eléctrica; también al sector de exploración, producción, transporte y conducción de hidrocarburos y, finalmente, a la infraestructura de vías y rellenos sanitarios, actividades que demandan un uso excesivo de recursos naturales renovables y no renovables y su impacto en el equilibrio y la salud de los ecosistemas puede ser de grandes dimensiones (ANLA 2019). La Figura 1 ilustra la localización de la zona de estudio, y representa los principales municipios del Alto San Jorge, sus comunidades o veredas y la hidrografía presente en la zona.

Obtención de los atributos físicos evaluados

Los atributos ambientales fueron mapeados según la información disponible en las bases de datos cartográficas

de Colombia. La cobertura de la tierra en 2012 fue realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales —en adelante, IDEAM— con la metodología de Corine Land Cover y se obtuvo del catálogo de mapas del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), ajustándose a la zona de estudio con una escala de 1:500.000. De igual forma, los biomas se obtuvieron de la capa de ecosistemas generales del país, disponible en la misma plataforma.

La geología fue descargada del Servicio Geológico de Colombia y ajustada a la zona de estudio con una escala de 1:500.000. Por su parte la litología, también a escala 1:500.000, se obtuvo de la capa de suelos del departamento de Córdoba, disponible en la plataforma de datos abiertos del IGAC, específicamente en la sección de agrología. La pendiente se elaboró con base en la clasificación altimétrica del Modelo Digital de Elevación (MDE), que fue obtenido de la plataforma Alaska Satellite Facility (2022),

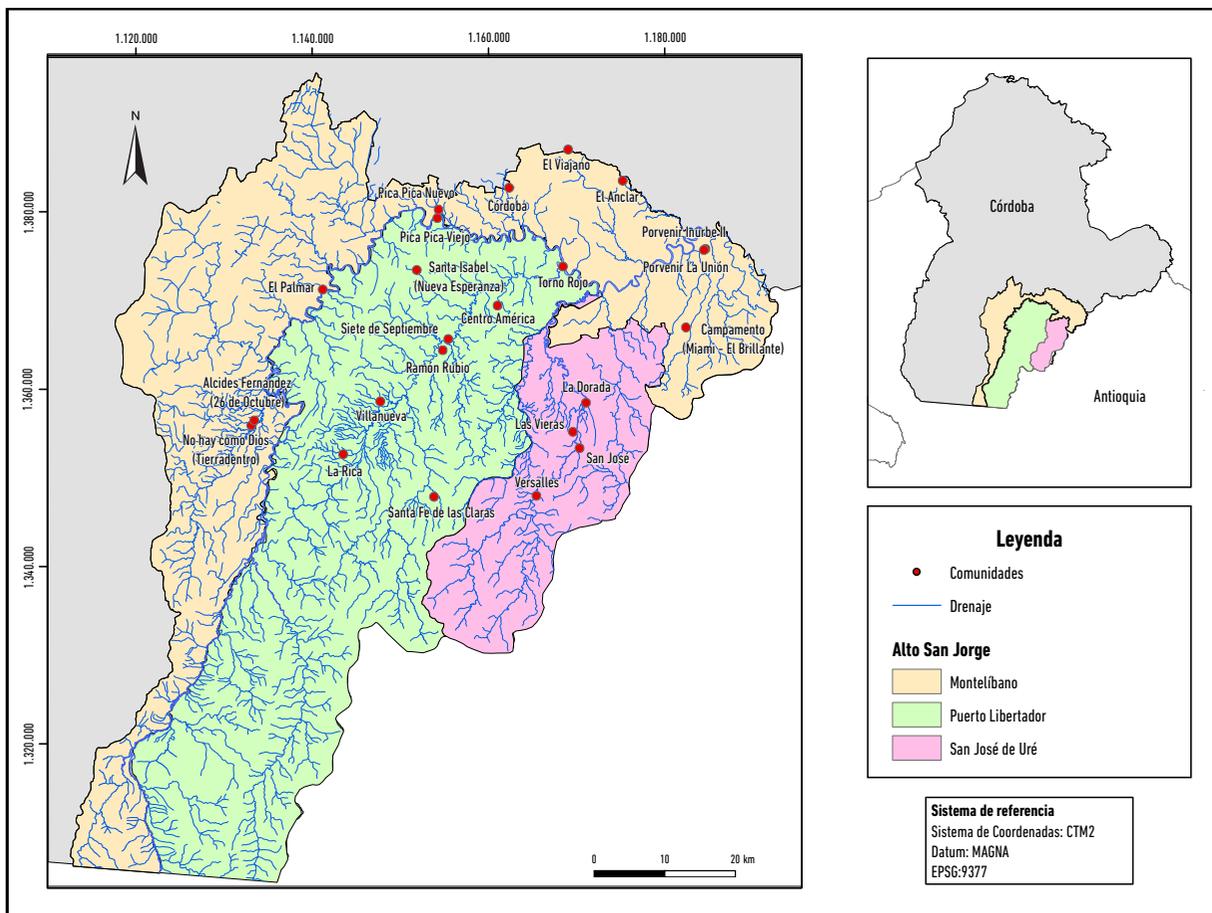


Figura 1. Localización del área de estudio.
Datos: IGAC 2022.

específicamente del satélite Alos Palsar, con una resolución espacial de 12,5 metros. Por último, se obtuvieron los datos de precipitación de la plataforma de Consulta de Datos Hidrometeorológicos del IDEAM (2022), se seleccionaron 22 estaciones meteorológicas localizadas en los municipios de estudio y los municipios vecinos de los departamentos de Córdoba y Antioquia, se calculó la media anual de precipitación en cada punto y se aplicó la interpolación IDW o interpolación mediante distancia inversa ponderada, la cual determina los valores de celda

a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Los mapas de pendiente y precipitación fueron ajustados para el área de estudio a una escala de 1:500.000.

Análisis de fragilidad del ecosistema

El esquema metodológico presentado en la Figura 2, representa el procedimiento desarrollado para la elaboración del mapa de fragilidad del ecosistema de la subzona hidrográfica del Alto San Jorge.

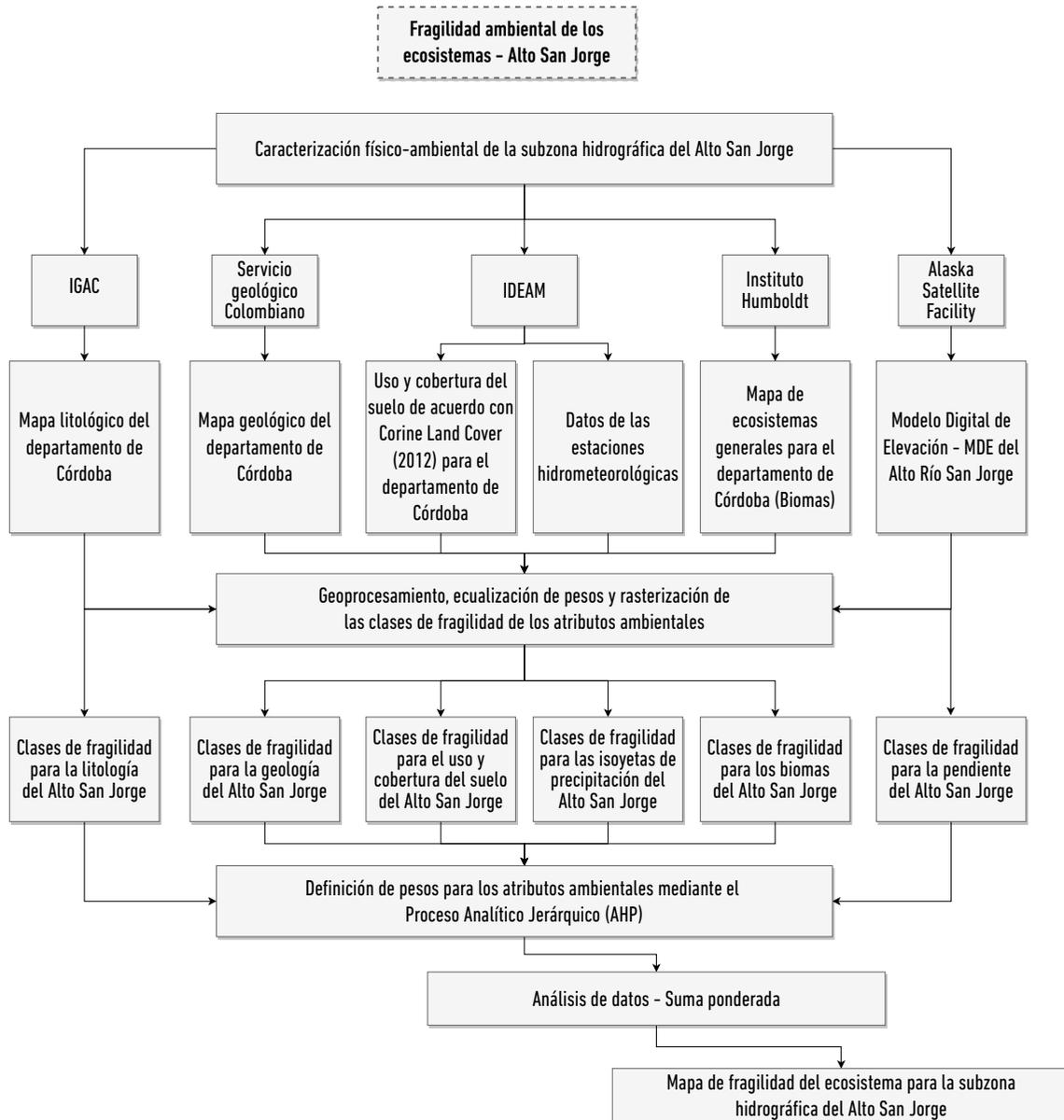


Figura 2. Procedimiento metodológico para fragilidad del ecosistema. Fuente: modificado a partir de Carvalho et ál. 2019, 11.

Clasificación de los atributos ambientales

El análisis de fragilidad del ecosistema tuvo como enfoque la perspectiva de integración del paisaje defendida por Tricart (1977) y Ross (1994) quienes explican que el equilibrio dinámico del ambiente se ha perdido progresivamente a medida que las sociedades intervienen con mayor intensidad en la exploración de los recursos naturales. Por este motivo, los estudios integrados de un territorio deben estar encaminados al entendimiento de la dinámica de los ecosistemas en diferentes escenarios, que representen y cuantifiquen la interacción humana y su relación con los impactos ambientales evidenciados. Ese proceso permitirá el conocimiento de las fragilidades de los ambientes naturales, de tal manera que sea posible plantear estrategias para el ordenamiento ambiental del territorio involucrando la teoría de los sistemas (Tricart 1977).

En este sentido, a lo largo de las últimas décadas, diversos estudios han caracterizado y clasificado los atributos ambientales que participan del equilibrio ecosistémico y determinado que cuantas más intervenciones antrópicas se evidencien en un proceso natural, más lejos del equilibrio ecológico y dinámico se encontrará el sistema.

Teniendo en cuenta los estudios de fragilidad ambiental de Ross (1994); Ruhoff et ál. (2005); Manfré et ál. (2013); Massa y Ross (2012); Gao y Zhang (2018); Dalla et ál. (2015); Cruz et ál. (2017); Guerrero et ál. (2018) y Carvalho et ál. (2019), se definieron los valores de fragilidad ambiental ecualizados, en una escala de 1-3 para cada clase de los diferentes atributos ambientales incorporados en el estudio, tal como se muestra en la Tabla 1. Cabe resaltar que la clasificación para biomas se hizo con base en el reporte de alertas de las subzonas hidrográficas del río Sinú y San Jorge realizado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA 2019), en el cual se clasifica en nivel crítico E, el estado de los orobiomas andinos y subandinos presentes en la zona. Para este caso, también se consideró que la clase denominada “ecosistemas transformados” se asocia a la fragilidad alta, debido a la intensidad de la intervención antrópica (ANLA 2019).

Proceso analítico jerárquico para valoración de los atributos ambientales

El análisis de la fragilidad ambiental del ecosistema consiste en un estudio cualitativo que inicia con el análisis sectorial de los atributos ambientales identificados (cobertura de la tierra, biomas, geología, litología, precipitación anual, pendiente), para luego construir una herramienta integradora que a través de la asignación de valores establezca relaciones de menor a mayor fragilidad (Sales y Do Nascimento 2019). Para este análisis se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico —en adelante, AHP—, el cual ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios ambientales después de ser introducido por primera vez en 1970 por Thomas Satty (Vargas 2011), el cual se basa en un juicio de comparación par a par.

La asignación de pesos fue realizada por un panel de diez expertos, que calificaron la significancia de cada atributo en una escala numérica del 1 al 9, en la cual 1 simboliza igualdad de importancia, y el rango comprendido entre 2 y 9 muestra qué tan importante es un elemento con respecto al otro (Santos et ál. 2019). Para la recolección de los datos asociados a su proceso de comparación, se realizó la determinación de pesos relativos de forma individual usando la escala numérica de preferencia con el instrumento AHP Priority Calculator (disponible por acceso web).

El valor numérico asignado según el discernimiento y concepto de los expertos, permite inferir radios de importancia. El resultado del proceso analítico jerárquico es una comparación binaria estructurada en una matriz, que contiene información de las preferencias de cada uno de los componentes con referencia a los otros (Escobar 2015). Al ser una matriz de doble entrada, se ubican los atributos para evaluar en filas y columnas, de forma que coincidan en un cuadrante, posteriormente se comparan par a par y se les asigna un valor relativo, como se observa en la Tabla 2. De esta forma, la casilla A1.2 corresponde a la comparación del atributo 1 respecto al atributo 2; si el valor correspondiente a esta casilla es 5, quiere decir que el atributo 1 es 5 veces más importante que el atributo 2. La configuración de la matriz ubica en la diagonal principal comparaciones equitativas con valor de 1 que corresponden a la comparación de la importancia que tiene un atributo respecto a sí mismo (Escobar 2015).

Tabla 1. Pesos de fragilidad asignados a las clases de los atributos ambientales

Atributo ambiental	Pesos de fragilidad asignados a las clases de los atributos ambientales		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Cobertura de la tierra	Bosque denso; bosque fragmentado; plantación forestal; bosque de galería y ripario; herbazal; arbustal; ríos; lagunas, lagos y ciénagas naturales; cuerpos de agua superficiales; zonas pantanosas.	Tejido urbano continuo; tejido urbano discontinuo; cereales; pastos arbolados; mosaico de cultivos; mosaico de pastos y cultivos; mosaico de pastos con espacios naturales; mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; mosaico de cultivos con espacios naturales; vegetación secundaria o en transición; cultivos permanentes arbóreos.	Aeropuertos; zonas de extracción minera; tierras desnudas y degradadas; pastos limpios; pastos enmalezados.
Geología	Cretacio inferior; cretácico superior	Triásico; langhiano-Tortoniano	Cuaternario; rupeliano-burdigaliano; plioceno; turoniano-maastrichtiano; thanetiano-ypresiano.
Litología	Cuerpo de agua; rocas ígneas (diabasas, basaltos y andesitas) y depósitos de cenizas volcánicas; rocas ígneas ultra-básicas (peridotitas); rocas ígneas (arcillolitas con intercalaciones de limolitas y areniscas) y recubrimiento discontinuo de cenizas volcánicas; rocas ígneas (brechas y tobas) y sedimentarias (areniscas calcáreas); rocas ígneas (diabasas, basaltos y andesitas), rocas sedimentarias (limolitas, arcillolitas y areniscas), con recubrimiento discontinuo de cenizas volcánicas; rocas ígneas (volcánicas), metamórficas (esquistos) y sedimentarias (lodolitas y areniscas); rocas ígneas ultra-básicas y sedimentarias (arcillolitas y areniscas arcillosas); rocas ígneas (diabasas, basaltos, tobas y dioritas), con cobertura discontinua de cenizas volcánicas; rocas ígneas (basaltos, dioritas, andesitas); rocas ígneas (diabasas y basaltos) y depósitos de cenizas volcánicas.	Complejo de areniscas calcáreas, arcillolitas y limolitas; arcillolitas, areniscas y conglomerados, con lentes calcáreas; rocas sedimentarias (arcillolitas, areniscas calcáreas y conglomerados); rocas sedimentarias (areniscas, arcillolitas y conglomerados); sedimentos finos y muy finos; sedimentos mixtos; zona urbana; lodolitas, areniscas y conglomerados; rocas metamórficas (esquistos); rocas sedimentarias (arcillolitas, areniscas, calizas); rocas sedimentarias (areniscas, arcillolitas, grawacas), con inclusiones de rocas meta sedimentarias.	Sedimentos finos y gruesos que alternan con capas de grava cuarzosas; sedimentos coluvio-aluviales; sedimentos finos sobre capas de arcillas lateríticas; sedimentos heterogéneos; aluviones medios a gruesos; aluviones mixtos recientes.
Precipitación anual (mm)	[2.100–2.900]	[1.800–2.100] y [2.900–3.200]	< 1.800–> 3.200
Pendiente	[0 %–3 %]	(3 %–20 %)	> 45 %
Biomás		Orobiomas andinos y sub-andinos	Ecosistemas transformados

Fuente: Ross 1994; Ruhoff et ál. 2005; Manfré et ál. 2013; Massa y Ross 2012; Gao y Zhang 2018; Dalla et ál. 2015; Cruz et ál. 2017; Guerrero et ál. 2018; Carvalho et ál. 2019; ANLA 2019.

Nota: la clasificación fue realizada con base en los criterios identificados mediante la revisión bibliográfica de los autores citados y el análisis de los atributos físicos del territorio.

La matriz de preferencia se caracteriza por ser positiva, recíproca y transitiva, y por lo tanto consistente; con estas propiedades se puede generar el vector de clases que contiene la información implícita y que define los diferentes criterios evaluados, clasificándolos por orden de prioridad (Lara y Osorio 2007). Los resultados

obtenidos son validados a través del radio de consistencia, el cual debe mantenerse en valores menores o iguales al 10 % (Elejalde 2019). Finalmente se define el rango de prioridad global conforme al concepto de los pesos relativos calculados.

Tabla 2. Modelo matriz de comparaciones par a par

Atributos	1	2	3	4	5	6
1	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6
2	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5	A2.6
3	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6
4	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
5	A5.1	A5.2	A5.3	A5.4	A5.5	A5.6
6	A6.1	A6.2	A6.3	A6.4	A6.5	A6.6

Fuente: Escobar 2015.

Estimación del riesgo de los ecosistemas frente a contaminación del aire

Los contaminantes criterio priorizados y monitoreados en la subzona hidrográfica del Alto San Jorge, de acuerdo con las exigencias de la Resolución 2254 de 2017 y teniendo en cuenta las operaciones de las fuentes fijas, móviles y del área de industrias y minería fueron: material particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}), material particulado menor o igual a 2,5 micras ($PM_{2,5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2). Para la modelación, se utilizó el software AERMOD, un modelo gaussiano de dispersión de aire que analiza de forma intuitiva, robusta y estable la concentración y deposición de la contaminación atmosférica originada por diversas fuentes considerando el comportamiento de las variables meteorológicas. De esta forma, se obtuvieron mapas de isopletas de concentración de los contaminantes según el periodo de exposición (Cimorelli et ál. 2005; Ferreyro Monticelli et ál. 2020).

Se procedió a estimar el riesgo de los ecosistemas ante la contaminación atmosférica presente en el Alto San Jorge, y para ello se utilizó la matriz de riesgos de amenaza vs. vulnerabilidad, en la cual la amenaza corresponde a los niveles de los contaminantes criterio en la atmósfera y la vulnerabilidad está representada por la fragilidad del ecosistema.

En este sentido, se establecieron clases de amenaza para las concentraciones de cada contaminante criterio, utilizando como referencia los límites permisibles definidos por el Programa Cooperativo Internacional sobre Monitoreo, de los efectos de la contaminación del aire en ecosistemas, específicamente en la sección 7.2 que abarca la química del aire y en la cual se recomienda mantener los niveles de SO_2 para un día por debajo de los $0,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de NO_2 anual a $0,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para evitar afectaciones sobre el suelo, la vegetación y la fauna (Finnish Environment Institute 2013).

El trabajo hecho por De Marco et ál. (2019) y denominado *Impactos de la contaminación del aire en la salud humana y del ecosistema, e implicaciones para la directiva nacional de límites de emisión: percepciones de Italia*, indica que la deposición del NO_2 y de ozono troposférico constituyen la mayor amenaza para la salud ecosistémica porque puede afectar la composición de especies, la diversidad de plantas, el balance de nutrientes y aumentar la susceptibilidad al estrés secundario y los factores de perturbación, así como la defoliación de la copa de los árboles. En dicho estudio, se consideró que valores anuales de NO_2 inferiores a $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representaban una amenaza baja, y valores superiores a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ una amenaza alta. Por su parte, para SO_2 valores diarios inferiores a $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ constituyeron una amenaza baja, y superiores a $4,0$ una amenaza alta. Finalmente, los autores realizaron el monitoreo para $PM_{2,5}$ y los resultados mostraron que valores anuales menores a $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representaban una amenaza baja, y mayores que $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ una amenaza alta.

La clasificación realizada para la amenaza también consideró los límites anuales de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ establecidos en la Resolución 2254 de 2017 de Colombia, los cuales corresponden a 50 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (MinAmbiente 2017). De igual forma, se tomó como referencia para PM_{10} el valor establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que define un límite anual máximo de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS 2018). La Tabla 3 muestra las clases de amenaza establecidas.

Tabla 3. Clases de amenaza para los contaminantes criterio

Contaminantes	Clases de amenaza para los contaminantes criterio		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
NO_2 anual	< 0,41	(0,41-3,5]	> 3,5
SO_2 día	< 1,0	(1,0-4,0]	> 4,0
PM_{10} anual	< 20	(20-50]	> 50
$PM_{2,5}$ anual	< 5,5	(5,5-23]	> 23

Fuente: Finnish Environment Institute 2013; De Marco et ál. 2019; MinAmbiente 2017; OMS 2018.

Nota: tabla de Excel elaborada a partir de los criterios identificados en la revisión bibliográfica de los autores citados y el análisis de los modelos desarrollados en AERMOD.

Para la definición de las clases de fragilidad de cada uno de los contaminantes, se realizó la reclasificación

de los archivos ráster resultantes de la modelación desarrollada con el software AERMOD, de acuerdo con los límites y las categorías establecidas (véase tabla 3). Posteriormente, se estimó el riesgo de afectación del ecosistema asociado a la contaminación atmosférica, teniendo en cuenta que: riesgo = fragilidad del ecosistema amenaza del ecosistema, como se observa en la Figura 3 (Pritchard 2000).

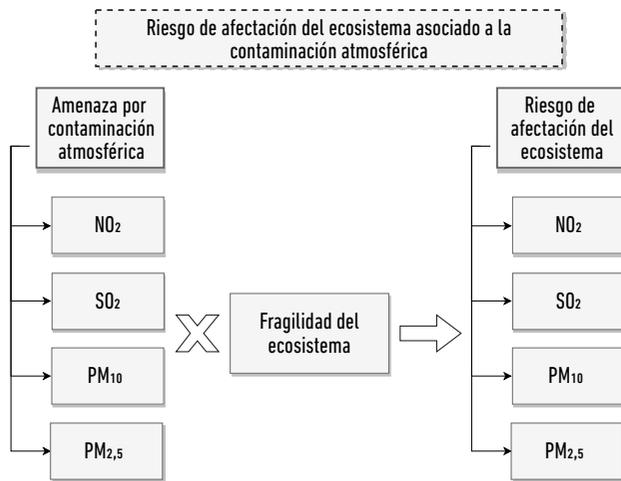


Figura 3. Esquema metodológico para estimación del riesgo. Datos: elaborado a partir de Pritchard 2000.

Resultados y discusiones

Los resultados en la determinación de los pesos de fragilidad se obtuvieron a partir de la consulta a expertos, la cartografía de fragilidad del ecosistema y, por último, la estimación del riesgo de afectación del ecosistema debido a la contaminación atmosférica. A continuación, se describen y explican cada uno de los procesos.

Determinación de los pesos de fragilidad del ecosistema

Cada experto realizó 15 comparaciones par a par de los atributos seleccionados, y con base en esta información se obtuvo las matrices de importancia en las cuales se refleja el grado de prevalencia de un atributo frente al otro de acuerdo con una escala numérica que va de 1 a 9. Los pesos relativos de cada atributo por experto, se presentan en la Figura 4.

Posteriormente, se verificó la consistencia de los resultados obtenidos, por medio del índice de relación de consistencia cuyo valor debe ser menor que el 10 %. La Tabla 4 agrupa los valores correspondientes al radio de consistencia.

Dado que los resultados obtenidos cumplieron con el índice de consistencia, se procedió con el análisis multicriterio y se realizó el promedio de los pesos relativos de cada experto. Los resultados se presentan en la Tabla 5 y la jerarquización final de los atributos ambientales en la Figura 5.

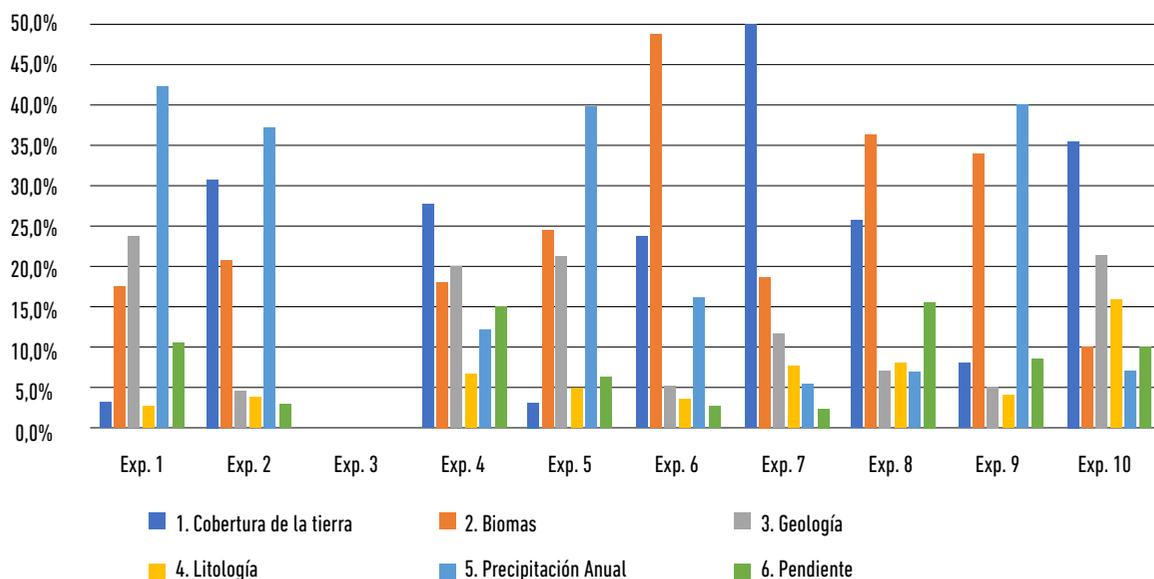
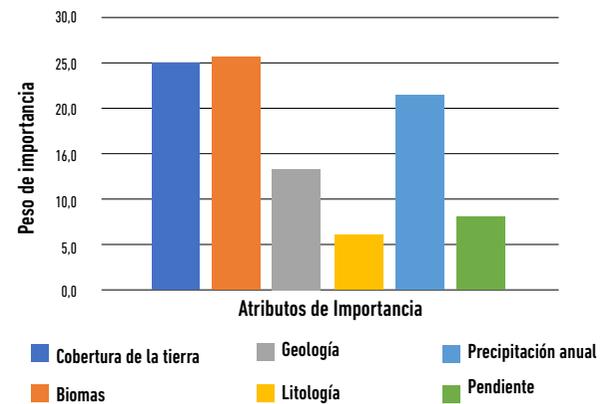


Figura 4. Pesos relativos de cada atributo por experto.

Tabla 4. Radios de consistencia de criterios por experto

Expertos	Radio de consistencia	Evaluación
1	8,0 %	Aceptable
2	9,0 %	Aceptable
3	5,3 %	Aceptable
4	9,9 %	Aceptable
5	3,5 %	Aceptable
6	6,7 %	Aceptable
7	7,5 %	Aceptable
8	5,3 %	Aceptable
9	7,1 %	Aceptable
10	7,2 %	Aceptable

**Figura 5.** Jerarquización de los atributos.**Tabla 5.** Vector de pesos ponderados

Expertos	Cobertura	Biomás	Geología	Litología	Precipitación	Pendiente
1	3,4 %	17,5 %	23,7 %	2,6 %	42,2 %	10,6 %
2	30,7 %	20,6 %	4,8 %	3,9 %	37,1 %	2,9 %
3	40,2 %	29,7 %	12,1 %	4,7 %	5,9 %	7,4 %
4	27,6 %	18,1 %	20,2 %	6,7 %	12,3 %	15,1 %
5	3,2 %	24,5 %	21,2 %	5,0 %	39,7 %	6,5 %
6	23,7 %	48,6 %	5,3 %	3,6 %	16,1 %	2,7 %
7	53,8 %	18,7 %	11,6 %	7,8 %	5,5 %	2,5 %
8	25,8 %	36,3 %	7,2 %	8,1 %	7,0 %	15,6 %
9	8,0 %	33,8 %	5,3 %	4,0 %	40,1 %	8,6 %
10	35,5 %	9,9 %	21,6 %	15,9 %	7,1 %	10,0 %
Promedio	25,2 %	25,8 %	13,3 %	6,2 %	21,3 %	8,2 %

Fragilidad del ecosistema para la subzona hidrográfica del Alto San Jorge

Los atributos ambientales considerados para el análisis de fragilidad del ecosistema fueron reclasificados, como se muestra en la Figura 6.

Teniendo en cuenta el geoprocesamiento para la Figura 7 (explicado en la figura 2 y la tabla 1), se pudo establecer el siguiente orden de clases de fragilidad alta con mayor porcentaje para los diferentes atributos ambientales: biomás (alta: 83,3 %, media: 16,7 % y baja: 0 %), geología (alta: 59,54 %, media: 29,38 % y baja: 11,08 %), cobertura del suelo (alta: 39,17 %, media: 32,1 % y baja: 28,73 %), pendiente (alta: 23,12 %, media: 50,77 % y baja: 26 %), litología (alta: 10,2 %, media: 54,27 % y baja: 35,53 %) y precipitación (alta: 2,5 %, media: 30,32 % y baja: 67,3 %).

La fragilidad alta en los biomás estuvo condicionada por la presencia de ecosistemas transformados en la mayor parte de la subzona hidrográfica del Alto San Jorge. Por

su parte, la fragilidad alta en el atributo geología fue influenciada por la presencia de arenitas líticas de granos decrecientes que van de conglomeráticas a grano fino, caracterizadas por presentar intercalaciones con lodolitas y olitostromas de calizas micríticas pertenecientes a la edad del Thanetiano-Ypresiano, así como por lodolitas, arenitas lodosas, arenitas líticas, cherts, calizas, tobas y aglomerados localmente cataclásitas del Turoniano-Maastrichtiano. Esta geología se caracteriza por dar origen a suelos superficiales o moderadamente profundos, con drenaje artificial moderadamente excesivo, con texturas moderadamente gruesas y medias, relacionadas con la presencia mayoritaria de gravillas y fragmentos gruesos en la superficie y dentro del perfil. También se evidenció zonas con geología caracterizada por la presencia de arenitas ferruginosas de grano fino a conglomeráticas intercaladas con shales calcáreos y carbón del Rupeliano-Burdigaliano y depósitos aluviales y de llanuras aluviales del Cuaternario,

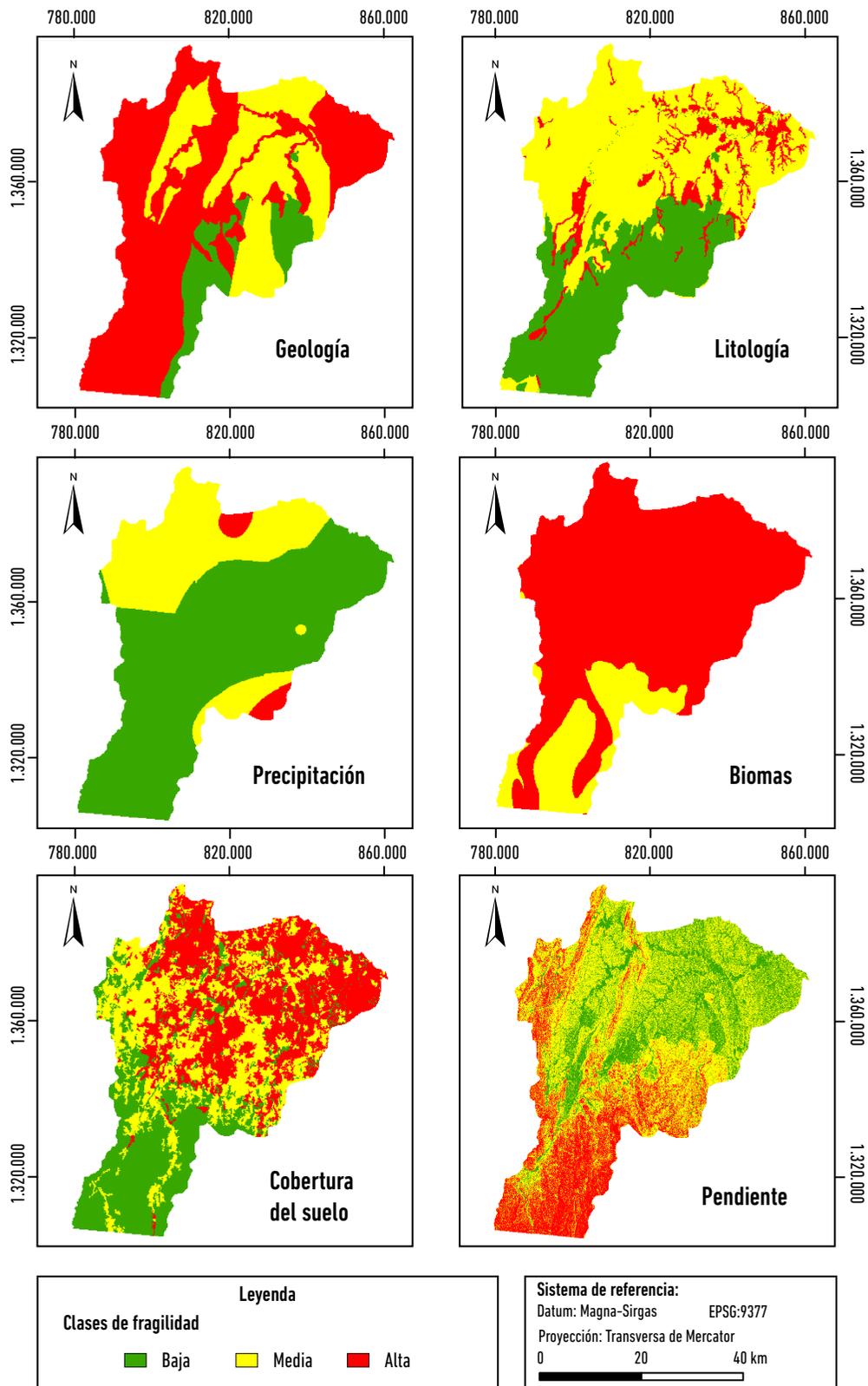


Figura 6. Clases de fragilidad de los atributos ambientales.
 Datos: elaborado a partir de MDE obtenido en Alaska Satellite Facility 2022; IDEAM 2022, IGAC 2022, SGC 2022, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 2022.

clases que dan origen a suelos imperfectamente drenados con susceptibilidad a encharcamientos o inundación.

La fragilidad alta para el atributo cobertura del suelo está representada por una amplia presencia de áreas en las cuales los pastos limpios representan un porcentaje de cubrimiento mayor al 70 %, y donde la realización de prácticas de manejo (tales como limpieza, encalamiento o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizado impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas, lo cual disminuye la biodiversidad. Las condiciones ambientales en estas zonas permiten la circulación de contaminantes atmosféricos a diferentes distancias y velocidades y debido a la ausencia de vegetación, la captura de carbono como medida de mitigación es limitada. Así, el traslado de la contaminación magnifica la amenaza, la hace más dispersa y se convierte en un punto crítico para la fragilidad.

Específicamente, las zonas de extracción minera y las tierras desnudas y degradadas aumentan la fragilidad del ecosistema, debido a la emisión de contaminantes atmosféricos y sustancias tóxicas que pueden alterar la calidad del agua y del suelo, lo cual genera impactos en la dinámica y el equilibrio ecosistémico como los descritos por Democker (2011). Por su parte, las pendientes mayores al 45 % distribuidas principalmente sobre la zona sur del área de estudio, en donde el relieve se torna más montañoso, también representan clase de fragilidad alta, lo que constituye amenazas como fuertes escorrentías con posibles deslizamientos en masa, pérdida de cobertura vegetal y erosión.

La litología y la precipitación fueron los atributos ambientales que representaron el menor porcentaje de la clase de fragilidad alta. En el caso de la litología, está denotada por la presencia de sedimentos finos y gruesos que alterna con capas de grava cuarzosas, así como sedimentos coluvio-aluviales, sedimentos finos sobre capas de arcillas lateríticas y sedimentos heterogéneos, con aluviones de medios a gruesos. Estos suelos son susceptibles a erosión laminar y poseen fertilidad de moderada a baja, aunque son considerados profundos y bien drenados, a excepción de los sedimentos coluvio-aluviales, típicos de suelos superficiales, con inundaciones periódicas e imperfectamente drenados. Finalmente, la precipitación se extiende a lo largo del área de estudio con fragilidad baja, cuyos rangos varían entre los 2.100 mm y 2.900 mm anuales. No obstante, en la zona norte del Alto San Jorge se evidenciaron regiones cuya precipitación está alrededor de los 1.700 mm anuales y hacia el sureste, regiones que alcanzan y superan los 3.000 mm anuales, categorizadas como fragilidad alta.

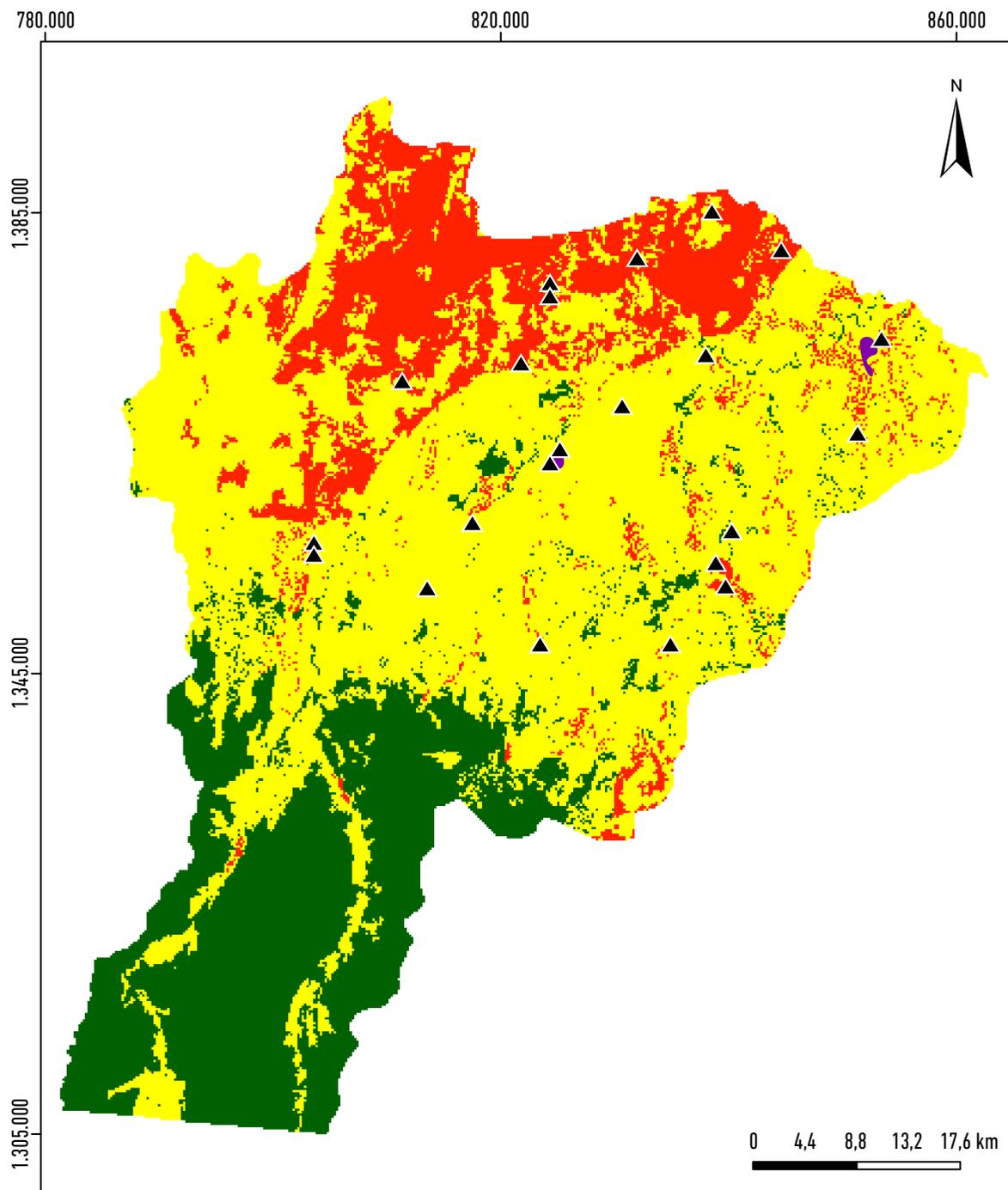
El resultado de la suma ponderada de los diferentes atributos ambientales, al tener en cuenta los pesos promedio establecidos (véase tabla 5) fue la generación del mapa de fragilidad del ecosistema de la subzona hidrográfica del Alto San Jorge, que se muestra en la Figura 7. De la distribución de las clases de fragilidad en el área se puede inferir que al norte de los municipios de Montelíbano y Puerto Libertador predomina una alta fragilidad del ecosistema, por el hecho de considerarse un bioma transformado, donde predominan coberturas del suelo que obedecen a amplias extensiones de pastos limpios y enmalezados, tierras desnudas o degradadas y zonas identificadas para la extracción minera, que es una de las principales actividades económicas de la región, cuyos impactos en la dinámica y el equilibrio de los ecosistemas han sido bien estudiados (Castillo 2016).

Por otro lado, al analizar la clase de fragilidad predominante alrededor de los cascos urbanos de los tres municipios, se observa una interfaz media-alta, dada por la presión antrópica sobre los recursos naturales que, consecuentemente, genera impactos sobre la dinámica y el equilibrio de los ecosistemas aledaños y elimina recursos naturales que aportan a la biodiversidad y a la contención de la contaminación atmosférica. La clase de fragilidad baja predomina hacia el sur donde se encuentran las reservas naturales de bosque denso y nativo que marca el inicio del noreste del Parque Nacional Natural Paramillo, donde las comunidades habitantes son escasas y la actividad minera no se desarrolla a gran escala.

De esta manera, el mapa de fragilidad permite relacionar de forma clara los impactos de la actividad minera y de las concentraciones poblacionales hacia el norte del área de estudio, sobre la dinámica y el equilibrio de los ecosistemas, lo cual se convierte en una herramienta para el fortalecimiento del ordenamiento territorial de esta región. Es importante entender que los ecosistemas con cierto grado de afectación o fragilidad, cuando son expuestos a altas concentraciones de diferentes contaminantes atmosféricos emitidos durante la actividad minera y la producción de energía, pueden sufrir daños irreversibles, que impactan fuertemente la diversidad biológica y ponen en riesgo la salud humana, toda vez que se trata de la zona donde habita la mayor parte de la población del Alto San Jorge.

Amenaza del ecosistema por contaminación atmosférica

El resultado de amenaza debido a la emisión de contaminantes atmosféricos como SO_2 , NO_2 , $PM_{2,5}$ y PM_{10} fue realizado a partir de la modelación de la dispersión de



Leyenda	
■ Centros urbanos	▲ Centros poblados
Fragilidad del ecosistema	
■ Baja	■ Media
	■ Alta

Sistema de referencia:
Datum: Magna-Sirgas
EPSG:9377
Proyección: Transversa de Mercator

Figura 7. Mapa de fragilidad del ecosistema – Alto San Jorge.
 Datos: procesado a partir de la suma ponderada de la clasificación de fragilidad ambiental de cada atributo.

los contaminantes en la atmósfera mediante AERMOD. El análisis se enfoca hacia el norte del Alto San Jorge, debido a la localización de las estaciones de monitoreo y el amplio desarrollo de actividades potencialmente contaminantes en esta zona.

La Figura 8 muestra las clases de amenaza: alta, media y baja, para cada contaminante de acuerdo con la clasificación establecida (véase tabla 3). Para analizar la amenaza por contaminación con SO_2 , se tuvieron en cuenta las concentraciones diarias modeladas, lo que mostró la predominancia de amenaza alta alrededor de los centros urbanos de los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré, así como del corregimiento

de Bocas de Uré, cercanos a zonas de explotación minera de ferróníquel y carbón; este hecho debe representar una alerta para las autoridades ambientales debido a la exposición ambiental constante de los ecosistemas, los cuales ya se encuentran en un proceso de deterioro ambiental, así como posibles impactos a la salud de las comunidades habitantes de estos centros poblados. Además, en el mapa de amenaza por SO_2 las clases media y alta ocupan más del 76 % del área modelada.

Por su parte, la amenaza para NO_2 , determinada a partir de las concentraciones anuales estimadas, no tuvo valores altos y presentó un nivel intermedio cercano a los centros urbanos de los municipios anteriormente mencionados.

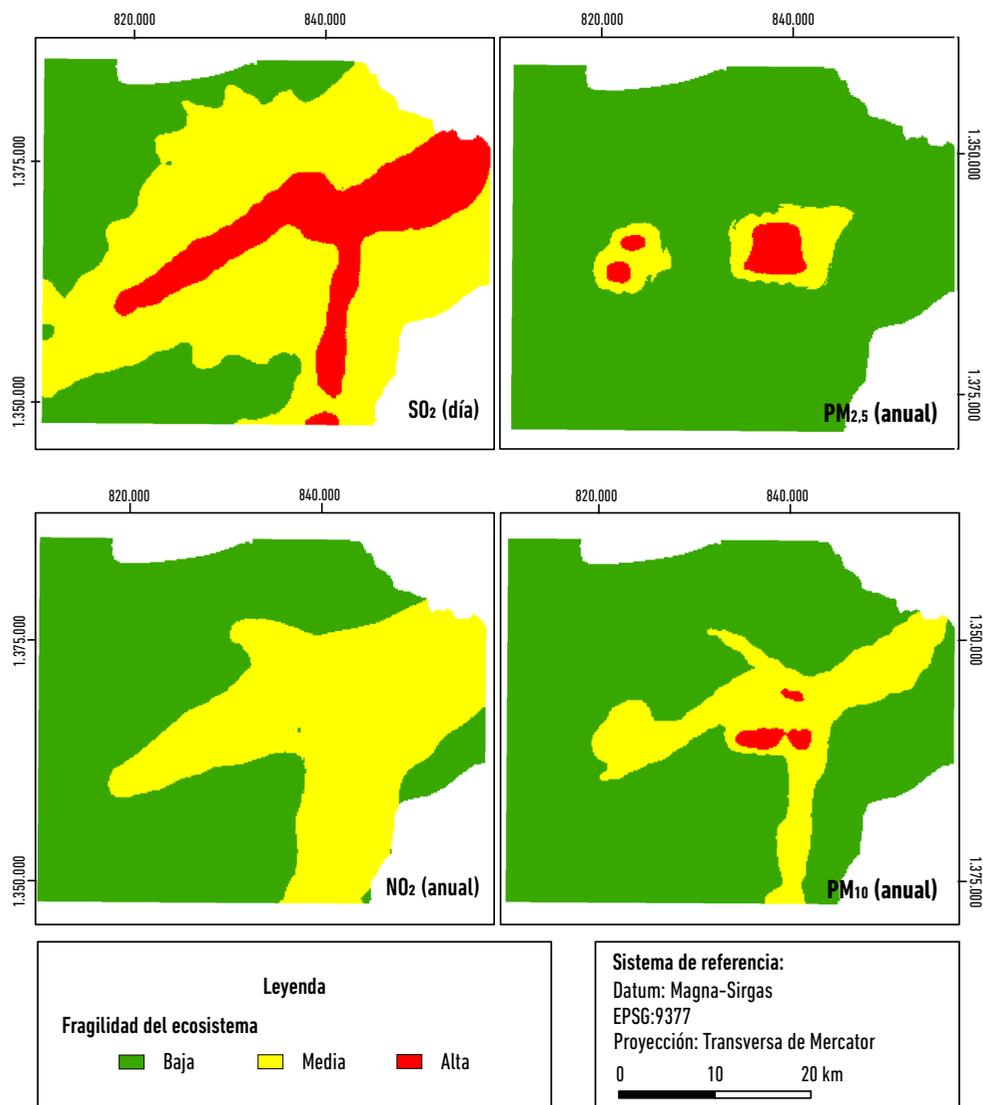


Figura 8. Clases de amenaza para los contaminantes atmosféricos.

Datos: elaborada a partir de la clasificación de fragilidad de las capas de cada contaminante atmosférico. Tomado de Finnish Environment Institute 2013; De Marco et ál. 2019; MinAmbiente 2017; OMS 2018.

En este sentido, cabe analizar la posible sinergia entre una amenaza alta por SO_2 y una amenaza media por NO_2 y los impactos que ambos gases tóxicos pueden ocasionar a ecosistemas estratégicos con características de fragilidad preexistentes, dada la explotación histórica de los recursos naturales renovables y no renovables en esta zona.

Por otro lado, la modelación de material particulado $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ arrojó un comportamiento espacial de la amenaza diferente, en el cual para $\text{PM}_{2,5}$ se evidenció la predominancia de la clase alta sobre las zonas de explotación de ferroníquel y carbón de Montelíbano y Puerto Libertador, particularmente en el centro poblado de Bocas de Uré y al casco urbano de Puerto Libertador. Sin embargo, para el caso de San José de Uré la amenaza baja ocupó más del 92 % del área modelada.

En síntesis, el comportamiento ambiental y espacial de la amenaza por $\text{PM}_{2,5}$ se podría entender de una forma más local, probablemente por la contención que la cobertura vegetal ejerce sobre el desplazamiento de las partículas finas, lo cual es una estrategia de mitigación de los impactos a la salud humana. Por último, al analizar la amenaza alta por PM_{10} se observó que esta circunda las áreas de amenaza alta por $\text{PM}_{2,5}$, lo cual confirma un efecto sinérgico causado por partículas finas y muy finas, que puede tener consecuencias más graves sobre los ecosistemas y la salud humana, específicamente en Bocas de Uré.

Estimación del riesgo de los ecosistemas frente a contaminación del aire

Se establecieron cinco clases para la estimación del riesgo de los ecosistemas frente a la emisión de cada uno de los contaminantes estudiados. La Figura 9 muestra los distintos escenarios de riesgo calculados a partir de la multiplicación de la fragilidad por la amenaza. Así, para SO_2 se evidenció un riesgo de medio a alto en las zonas cercanas a los centros poblados y las regiones donde se da la explotación de ferroníquel o carbón en Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré, lo cual indica que tanto la fragilidad como la amenaza toman valores altos en estas áreas y que, consecuentemente, habrá una necesidad más urgente de proponer medidas que busquen garantizar la recuperación ambiental de estos ecosistemas que han venido sufriendo impactos ambientales derivados de la actividad minera desde hace cerca de treinta años. Además, el mapa de riesgos por SO_2 se constituye como una herramienta que confronta las fragilidades propias del ecosistema y las características de la amenaza de la región, con potencial de ser utilizada en estrategias de ordenamiento

ambiental del territorio, lo que objetiva la protección de los ecosistemas circundantes cuyo riesgo se distribuye en bajo a medio y medio, y está cercano a los centros poblados El Anclar, Pica Pica Nuevo, El Palmar, Villanueva, La Rica y Corozalito. No obstante, si se considera el efecto sinérgico del riesgo medio y de medio a alto evidenciado para NO_2 , la necesidad de definir acciones en pro de la salud ecosistémica aumenta de manera significativa.

Finalmente, para material particulado $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$, se observó un compartimiento espacial del riesgo estimado para ecosistemas consecuente con el compartimiento espacial de la amenaza, lo cual se observa en la Figura 9, toda vez que la fragilidad en la zona norte del Alto San Jorge se caracterizó por una homogeneidad de la clase media. De esta forma, la fragilidad media y amenaza entre media y alta permitieron estimar una distribución del riesgo que se ubicó entre las clases de medio a alto y alto (valores entre 6 y 9), siendo predominante la primera; dicho riesgo también se caracteriza por ser más local sobre la región de Montelíbano y Puerto Libertador donde hay explotación de ferroníquel y carbón.

El resultado del riesgo estimado se torna más grave al tener en cuenta los efectos sinérgicos que podrían tener todos los contaminantes atmosféricos emitidos al tiempo en la misma región durante varios años, si se considera que la suma de los impactos ocasiona impactos de magnitudes mayores y con ellos un deterioro de los ecosistemas y de la biodiversidad que podría ser irreversible. En este sentido, se hace un llamado a las autoridades ambientales competentes, así como a las entidades municipales y otros tomadores de decisiones, para que en sus acciones examinen el establecimiento de medidas determinantes para la mitigación de este riesgo, así como de estrategias de prevención y gestión para las áreas categorizadas con niveles bajos y medios, que de no preverse podrían, progresivamente, empeorar sus condiciones y agravar los impactos sobre la dinámica y el equilibrio de los ecosistemas.

Conclusiones

La contaminación atmosférica genera impactos a los ecosistemas terrestres y forestales que tienen un papel clave en la prestación de servicios ecosistémicos (De Marco et ál. 2019). La precipitación ácida formada a partir del dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en la atmósfera ocasiona efectos tóxicos sobre las plantas, los animales y los organismos acuáticos. Además, a largo plazo conduce al deterioro progresivo de la calidad del

suelo, la acidificación de las aguas y suelos por lixiviación de nutrientes y eutrofización (Democker 2011).

Los contaminantes del aire influyen en el ciclo de nutrientes, el ciclo del carbono y el suministro de agua. También disminuyen los porcentajes de cobertura vegetal e impiden que los árboles y la vegetación absorban contaminantes (Carvalho y Szlafsztein 2019). La acumulación y sobrecarga de nutrientes en los cuerpos de agua produce

proliferación de algas, pérdida de oxígeno y de la vida acuática, y finalmente devastación de la diversidad biológica. Por otro lado, la concentración de sustancias nocivas puede afectar directamente el agua potable, como producto de la filtración al agua subterránea de las sustancias que se depositan en el suelo (Michel y Seidling 2016).

La región del Alto San Jorge, y de manera específica los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador y

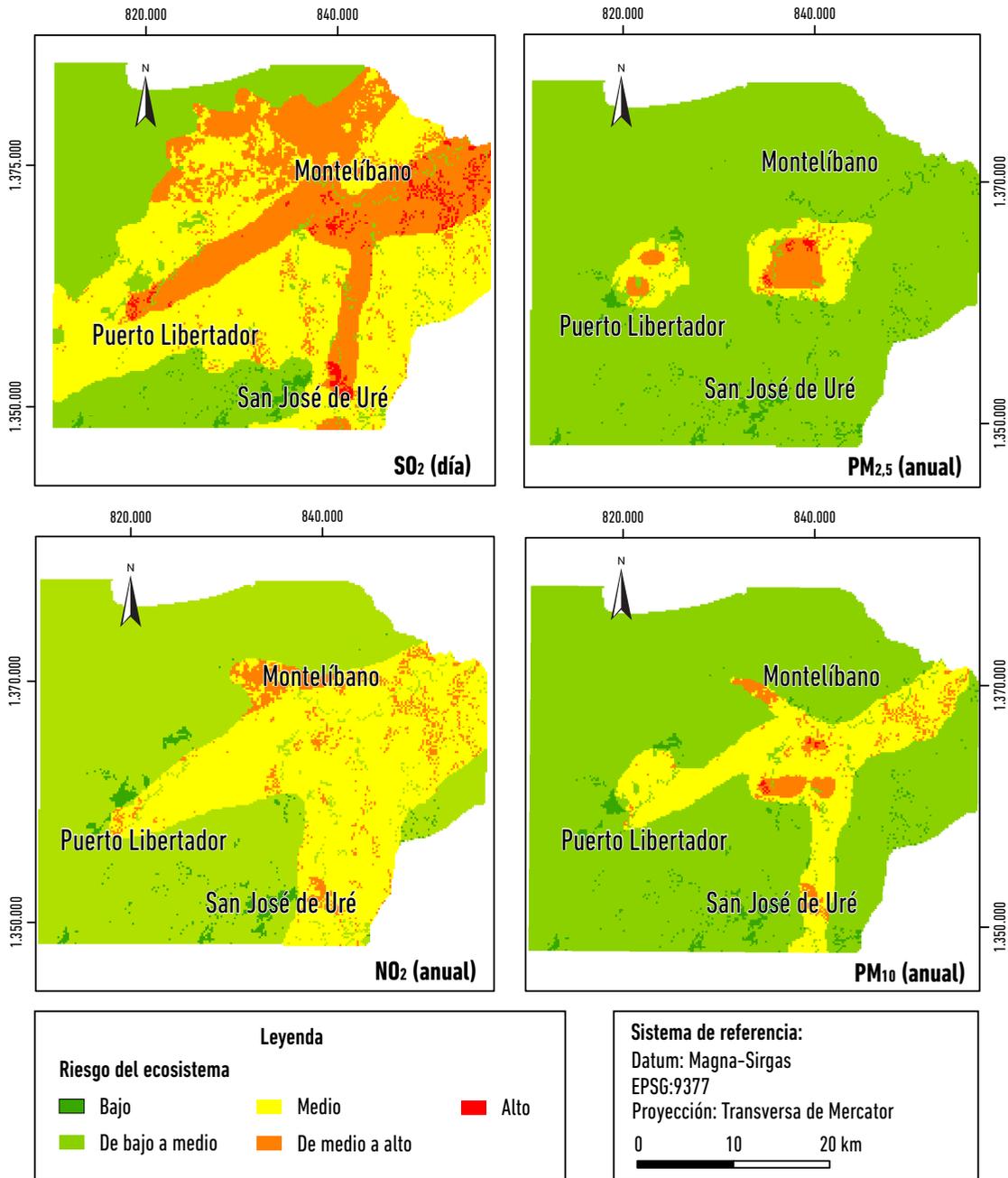


Figura 9. Riesgo de afectación del ecosistema asociado a contaminantes atmosféricos. Datos: procesados a partir de la suma ponderada de la clasificación de fragilidad ambiental de cada atributo.

San José de Uré, incluidos los diferentes corregimientos o las veredas, por sus actividades económicas principales, son susceptibles a los impactos ambientales de la contaminación atmosférica. En este sentido, se planteó analizar la fragilidad ambiental, identificar la amenaza de los contaminantes y estimar el riesgo de afectación de los ecosistemas, relacionando las posibles afectaciones a la salud ambiental como consecuencia de la emisión de contaminantes atmosféricos resultantes del desarrollo de las actividades minero-energéticas.

Las clases de fragilidad del ecosistema se obtuvieron a partir de la metodología de Ross (1994) y la consulta a expertos, por medio del Proceso Analítico Jerárquico que permitió el cálculo de pesos para la suma ponderada de todos los atributos. Los resultados de fragilidad en su orden de más alto porcentaje fueron: biomas cobertura del suelo, pendiente, litología y precipitación.

Posteriormente, se identificó la amenaza y se observó una clara predominancia de la clase alta para SO_2 alrededor de los cascos urbanos de Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré, así como del corregimiento de Bocas de Uré, cercanos a zonas de explotación minera de ferroníquel y carbón. En cambio, para NO_2 la amenaza fue media en la mayor parte del área modelada.

Por su parte, la amenaza por la emisión de material particulado tuvo un comportamiento ambiental y espacial local, principalmente en las zonas aledañas a la explotación de ferroníquel y carbón. Para finalizar, se establecieron cinco clases para la estimación del riesgo de los ecosistemas frente a la emisión de cada uno de los contaminantes estudiados, las cuales fueron calculadas a partir de la multiplicación de la fragilidad por la amenaza. En este sentido, al considerar que el resultado de la fragilidad en la zona norte del Alto San Jorge estuvo dominado por la clase media, con algunas áreas altas, se obtuvo un comportamiento espacial del riesgo consecuente con el comportamiento espacial de la amenaza.

El resultado del riesgo estimado se torna más grave al tener en cuenta los efectos sinérgicos que podrían tener todos los contaminantes atmosféricos emitidos al tiempo en la misma región durante varios años. Entonces, se hace un llamado a las autoridades ambientales competentes, así como a las entidades municipales y demás tomadores de decisiones, para que como parte de sus acciones consideren el establecimiento de medidas determinantes para la mitigación de este riesgo, así como de estrategias de prevención y gestión para las áreas categorizadas con niveles bajos y medios, que de no preverse

podrían, de manera progresiva, presentar afectaciones serias a la dinámica y el equilibrio de sus ecosistemas.

Referencias

- Alaska Satellite Facility. 2022. "Earth Data." Consultado el 9 de mayo de 2022. <https://search.asf.alaska.edu/>
- ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales). 2019. *Reporte de alertas subzonas hidrográficas del río Sinú y San Jorge*. Bogotá: ANLA. Consultado el 10 de mayo de 2021. https://www.anla.gov.co/o1_anla/documentos/biblioteca/27-01-2021-anla-rash-rio-sinu-alto-san-jorge.pdf
- Arroyave-Maya, María del Pilar, Martha Isabel Posada Posada, David J. Nowak, y Robert E. Hoehn. 2018. "Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el Valle de Aburrá." *Colombia Forestal* 22 (1): 5-16. <https://doi.org/10.14483/2256201x.13695>
- Asif, Z., Zhi Chen, y Z. Zhu. 2019. "An Integrated Life Cycle Inventory and Artificial Neural Network Model for Mining Air Pollution Management." *International Journal of Environmental Science and Technology* 16 (4): 1847-1856 <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1813-9>
- Carvalho, Ana Paula, João Vitor Roque Guerrero, Elton Vicente Escobar Silva, Mauricio José Rosso Pinto, Renata Maria Guerreiro Fontoura Costa Vaz, Camila Tavares Pereira, Reinaldo Lorandi, José Augusto de Lollo, y Luiz Eduardo Moschini. 2019. "Fragilidade ambiental à erosão em uma bacia hidrográfica antropizada no nordeste do estado de São Paulo, Brasil." *Anuário do Instituto de Geociências* 42 (3): 7-18. https://doi.org/10.11137/2019_3_07_18
- Carvalho, Roberta Mendonça De, y Claudio Fabian Szlafsztein. 2019. "Urban Vegetation Loss and Ecosystem Services: The Influence on Climate Regulation and Noise and Air Pollution." *Environmental Pollution* 245: 844-52. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>
- Castillo, Danika Andrea. 2016. "Zoneamento ambiental de Puerto Libertador-Córdoba como insumo para a determinação da capacidade de receber a mineração." *Periódico Técnico E Científico Cidades Verdes* 4 (9): 1-21. <https://doi.org/10.17271/231786044920161299>
- Cimorelli, Alan, Steven Perry, Akula Venkatram, Jeffrey Weil, Robert Paine, Robert Wilson, Russell Lee, Warren Peters, y Roger Brode. 2005. "AERMOD: a Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization." *Journal of Applied Meteorology* 44 (5): 682-93. <https://doi.org/10.1175/JAM2227.1>
- Cocheci, Radu Matei, Ioan Ianoș, Cătălin Niculae Sârbu, Anthony Sorensen, Irina Saghin, y George Secăreanu. 2019. "Assessing Environmental Fragility in a Mining Area for Specific Spatial

- Planning Purposes." *Moravian Geographical Reports* 27 (3): 169-82. <https://doi.org/10.2478/mgr-2019-0013>
- Conpes (Consejo Nacional de Política Económica y Social). 2018. "Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible." Consultado 20 de octubre de 2021. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>
- Costa, Carlos Wilmer, Fabiola Geovanna Piga, Mayra Cristina de Moraes, Mariana Dorici, Evandro de Castro Sanguineto, José Augusto de Lollo, Luiz Eduardo Moschini, Reinaldo Lorandi, y Leandro José Oliveira. 2015. "Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras-Araras, SP." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20 (4): 946-958. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p946-958>
- Cruz, Bruna, L. A. Manfré, D. S. Ricci, D. Brunoro, L. Appolinario Jr., y J. A. Quintanilha. 2017. "Environmental Fragility Framework for Water Supply Systems: a Case Study in the Paulista Macro Metropolis Area (SE Brazil)." *Environmental Earth Sciences* 76 (12): 441. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6778-3>
- Dalla Corte, Ana Paula, Ângela Maria Klein Hentz, Betina Doubrawa, y Carlos Roberto Sanquetta. 2015. "Environmental Fragility of Iguazu River Watershed, Paraná, Brazil." *Bosque* 36 (2): 287-97. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200014>
- De Marco, Alessandra, Chiara Proietti, Alessandro Anav, Luisella Ciancarella, Iliara D'Elia, Silvano Fares, Maria Francesca Fornasier, Lina Fusaroe, Maurizio Gualtieri, Fausto Manes, Aldo Marchetto, Mihaela Mircea, Elena Paoletti, Antonio Piersanti, Michela Rogora, Luca Salvati, Elisabetta Salvatori, Augusto Screpanti, y Cristina Leonardi. 2019. "Impacts of Air Pollution on Human and Ecosystem Health, and Implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy." *Environment International* 125: 320-33. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.064>
- Democker, James. 2011. "Direct Cost Estimates for the Clean Air Act Second Section 812 Prospective Analysis." U.S. Environmental Protection Agency. Consultado el 5 de junio de 2022. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/costfullreport.pdf>
- Dimitriou, Anastasia, y Vasilina Christidou. 2011. "Causes and Consequences of Air Pollution and Environmental Injustice as Critical Issues for Science and Environmental Education." En *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*, editado por Mohamed K. Khallaf, 216-238. Grecia: Universidad de Thessaly.
- Elejalde, Katherine Yasmín. 2019. "Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en la priorización de enfermedades infecciosas bovinas en el Ecuador." Tesis de Médico Veterinario Zootecnista, Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Escobar, John Willmer. 2015. "Metodología para la toma de decisiones de inversión en portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP." *Contaduría y Administración* 60 (2): 346-366. [https://doi.org/10.1016/S0186-1042\(15\)30004-8](https://doi.org/10.1016/S0186-1042(15)30004-8)
- Ferreiro Monticelli, Davi de, Jane Meri Santos, Harerton Oliveira Dourado, Davidson Martins Moreira, y Neyval Costa Reis Jr. 2020. "Assessing Particle Dry Deposition in an Urban Environment by Using Dispersion Models." *Atmospheric Pollution Research* 11 (1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.07.010>
- Finnish Environment Institute. 2013. "International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems." Consultado el 24 de junio de 2021. <https://www.syke.fi/nature/icpim>
- Foro FSN FAO, Agricultural Development Economics Division. 2015. "Aprovechar los beneficios de los servicios ecosistémicos para una intensificación ecológica eficaz en la agricultura." FAO. Consultado el 24 de junio de 2021. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/1566344d-6d20-47ec-bb44-21ee3673522f/>
- Gao, Yang, y Hongmei Zhang. 2018. "The Study of Ecological Environment Fragility Based on Remote Sensing and GIS." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 46 (5): 793-799. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0759-1>
- Gimenes, Filipe Biaggioni Quessada, y Oswaldo Filho. 2013. "Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (sig)." *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, no. 1994: 6564-6571.
- Guerrero, João Vitor Roque, José Augusto de Lollo, Luiz Eduardo Moschini, y Reinaldo Lorandi. 2018. "Carta de fragilidade ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do rio Clarinho, SP." *Caderno de Geografia* 28 (53): 385-403. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2018v28n53p385-403>
- Guzmán-Manrique, Jhon, y Andrés Camilo Flórez-García. 2019. "Fragmentación del paisaje empleando análisis multitemporal de imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ en el municipio de Montelíbano, Córdoba-Colombia." *Gestión y Ambiente* 22 (1): 31-41. <https://doi.org/10.15446/ga.v22n1.76116>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2022. "Sistema de Pronósticos Hidrológicos y Alertas Temprana." Consultado el 6 de junio de 2022. <http://fews.ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2022. "Datos e información cartografía." Consultado el 6 de junio de 2022. <https://www.igac.gov.co/es/ide/datos-e-informacion/cartografia>

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2022. "Visor geográfico." Consultado el 6 de junio de 2022. <http://i2d.humboldt.org.co/visor-I2D/>
- Lara, Hugo, y Hecmy Osorio. 2007. "Cálculo del vector de preferencias del proceso analítico jerárquico bajo el enfoque de optimización." *Publicaciones en Ciencias y Tecnología* 1 (2): 52-61.
- Manfré, Luiz Augusto, Alexandre Marco da Silva, Rodrigo Custódio Urban, y John Rodgers. 2013. "Environmental Fragility Evaluation and Guidelines for Environmental Zoning: a Study Case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian Region)." *Environmental Earth Sciences* 69 (3): 947-57. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1979-2>
- Massa, Eric Macedo, y Jurandy Luciano Sanches Ross. 2012. "Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevoso na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP." *Revista do Departamento de Geografia* 24: 57-79. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0024.0004>
- Michel, Alexa, y Walter Seidling, 2016. *International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, y Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft*. Viena: BFW, Bundesforschungszentrum für Wald.
- MinAmbiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). 2017. "Resolución 2254. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones." Consultado el 6 de junio de 2022. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2018. "Calidad del aire." OMS. 2 de mayo de 2018. Consultado el 16 de abril de 2021. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Pritchard, Paul. 2000. *Environmental Risk Management*. Londres: Earthscan.
- Rodríguez, María José. 2019. "Contaminación atmosférica en la ciudad de Murcia y medidas de actuación." Tesis de maestría en Prevención de Riesgos Laborales, Universidad Miguel Hernández, Alicante (España).
- Rojas Isaza, Daniela, Julián Salazar Cataño, Daniel Montoya Escobar, y Édinson Muñoz Ciro. 2019. "Problemática de la contaminación del aire en Colombia y estrategias de solución para la calidad del aire en Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Antioquia). Resumen Introducción." *Revista Ambiental Éolo* (18) 13: 109-111.
- Ross, Jurandy Luciano Sanches. 1994. "Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados." *Geography Department, University of Sao Paulo* 8: 63-74. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- Ruhoff, Anderson Luis, Bernardo Sayão Penna e Souza, Enio Giotto, y Rudiney Soares Pereira. 2005. "Lógica Fuzzy e zoneamento ambiental da bacia do Arroio Grande." Conference XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, de 16 a 21 de abril em Goiania, Brasil.
- Sales, Lícia Benicio, y Flávio Rodrigues Do Nascimento. 2019. "Geomorfologia e fragilidade ambiental na classificação de paisagens em bacias hidrográficas." *Revista Equador* 9 (1): 246-265.
- Santos, Paulo Henrique Dos, Sandra Miranda Neves, Daniele Ornaghi Sant'Anna, Carlos Henrique de Oliveira, y Henrique Duarte Carvalho. 2019. "The Analytic Hierarchy Process Supporting Decision Making for Sustainable Development: an Overview of Applications." *Journal of Cleaner Production* 212: 119-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.270>
- Saxena, Pallavi, y Saurabh Sonwani. 2019. *Criteria Air Pollutants and Their Impact on Environmental Health*. Singapore: Springer Singapore.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). 2022. "Geoportal SGC." Consultado el 6 de junio de 2022. <https://www.sgc.gov.co/>
- Sirombra, Martín Gonzalo. 2019. "Servicios ecosistémicos: dispersión de frutos y semillas." *Revista de Biología Tropical. Serie de Blog* 3. <https://doi.org/10.15517/rbt.voi3.36964>
- Tricart, Jean. 1977. *Ecodinâmica*. Río de Janeiro: Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente (SUPREN).
- Vargas, Luis. 2011. "Thomas L. Saaty." En *International Series in Operations Research and Management Science*, editado por A. Assad y S. Gass, 577-591. Boston: Springer Boston, MA.
- WHO (World Health Organization). 2017. "Ambient Air Pollution: a Global Assessment of Exposure and Burden of Disease." Consultado el 6 de abril de 2021. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- Zou, Xiang, Muhammad Azam, Talat Islam, y Khalid Zaman. 2016. "Environment and Air Pollution Like Gun and Bullet for Low-Income Countries: War for Better Health and Wealth." *Environmental Science and Pollution Research* 23 (4): 3641-3657.

Mauricio José Rosso-Pinto

Ingeniero ambiental con maestría en Ciencias Ambientales y candidato a doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Federal de São Carlos (Brasil). Docente de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Córdoba (Colombia) para el área de geociencias y evaluación de impacto ambiental. Experiencia en formulación y ejecución de proyectos de investigación y extensión en el área ambiental, principalmente en el de contaminación ambiental, modelación ambiental y salud ambiental.

Ana Karina Pérez-Peñate

Ingeniera ambiental con maestría en Gestión y Administración Ambiental egresada de la Universidad Arturo Prat del estado de Chile. Con experiencia en formulación y ejecución de proyectos de investigación y extensión en el área ambiental, principalmente en la mitigación y gestión del cambio climático.

Yhonattan Méndez Nobles

Ingeniero sanitario y ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), con maestría en Gestión Ambiental de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ), candidato a Ph. D. en Sostenibilidad, con más de doce años de experiencia como consultor y asesor en temas de sostenibilidad en los sectores público y privado, gestión del cambio climático territorial y formulador de proyectos ante el Fondo Verde del Clima en temas de WASH con organismos de cooperación internacional. Actualmente se desempeña como docente investigador en la UPB.

Humberto Tavera Quiroz

Ingeniero sanitario y ambiental con maestría en Recursos Hídricos, candidato a doctor en Ingeniería de Recursos Hídricos por la Universidad del Norte. Docente de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Córdoba para el área de tecnologías ambientales, química ambiental, y amenazas naturales y tecnológicas. Experiencia en formulación y ejecución de proyectos de recursos hídricos, de investigación y extensión en el área ambiental, sanitaria y modelación y análisis de datos ambientales.

Jorge Cárdenas de La Ossa

Profesional en Ingeniería Sanitaria y Ambiental involucrado en el trabajo social, de investigación, diseño, construcción y formación. Con una experiencia de más de quince años, especialmente en el campo de la ingeniería sanitaria y ambiental, la gestión del riesgo y el desarrollo sostenible, con conocimientos de estándares internacionales de ambiente y de salud pública.

María Alejandra Martínez Macea

Ingeniera ambiental con maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad de Córdoba. Integrante del Grupo de Aguas, Química Aplicada y Ambiental de la misma institución desde 2018. Experiencia en formulación y ejecución de proyectos de investigación y extensión en el área ambiental, principalmente en el área de contaminación ambiental, estrategias de remediación y la salud ambiental.

Sofía Torres Sena

Ingeniera sanitaria y ambiental egresada de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería. Experiencia en apoyo de proyectos de ingeniería ambiental basados en modelación ambiental, educación ambiental y gestión ambiental.