

Análisis de la Fragilidad Ambiental Asociada a la Contaminación Del Recurso Hídrico Como Herramienta Para El Fortalecimiento de la Gobernanza Del Agua En La Cuenca Del Río Sinú

Environmental Fragility Analysis Due to Water Resource Pollution As A Tool For Strengthening Water Governance In The Sinu River Basin

**Mendoza-Fandiño, Jorge Mario ¹; Rosso-Pinto, Mauricio²; Tavera-Quiroz, Humberto Carlos³;
Coronado-Arango, Angélica⁴; Rios-Kerguelen, Juan Ricardo⁵; Anaya-Guzmán, Albert Antonio⁶;
Arrieta-López, Abeiro ⁷.**

1. Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba. Montería. Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5349-9958> . Email: jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co
2. Ingeniero Ambiental, magister en Ciencias Ambientales, Universidad Federal de São Carlos. São Carlos. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3919-4127> Email: mauriciorossop@correo.unicordoba.edu.co
3. Ingeniero Sanitario y Ambiental, magister en Recursos Hídricos, Universidad Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9176-7658> Email: htaveraq@gmail.com
4. Ingeniero Sanitario y Ambiental, especialista en administración ambiental de zonas costeras. Universidad Jorge Tadeo Lozano. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-3858> Email: acoronad@gmail.com
5. Ingeniero Sanitario y Ambiental, Magister en desarrollo y ambiente. Universidad Tecnológica de Bolívar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6604-5143>. Email: rioskerguelen@yahoo.es
6. Ingeniero Ambiental. Universidad de Córdoba. Montería. Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2714-0017> Email: alberthanaya30@gmail.com
7. Biólogo, Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales. Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3311-2570> Email: albeiro.arrieta@cvs.gov.co

Recibido: 18/12/2020
Aceptado: 09/03/2021

Cite this article as: J. Mendoza, M. Rosso-Pinto , H. Tavera-Quiroz ,A. Coronado-Arango,J. Rios-Kerguelen,A. Anaya-Guzmán y A. Arrieta-López “Análisis de la Fragilidad Ambiental Asociada a la Contaminación Del Recurso Hídrico Como Herramienta Para El Fortalecimiento de la Gobernanza Del Agua En La Cuenca Del Río Sinú”, *Prospectiva*, Vol 19, N° 2, 2021.

<https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2606>

RESUMEN

La calidad del agua de cualquier fuente específica puede ser evaluada mediante la medición de parámetros físicos, químicos y biológicos, cuyos valores al ser comparados con los límites normativos, determinan o no la peligrosidad para la salud humana y ecosistémica. Sin embargo, esta técnica puede implicar altos costos y complicaciones operacionales. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) se posicionan como herramientas útiles y prácticas para la evaluación de fenómenos ambientales a escalas de cuencas hidrográficas, realizando estimaciones robustas para la identificación y análisis de posibles impactos a la calidad del agua, con base en el estudio integral de las características ambientales del territorio y la dinámica de uso y ocupación de este. El objetivo de este trabajo fue analizar la fragilidad ambiental de la cuenca del río Sinú, frente a la contaminación del recurso hídrico, como herramienta para el

fortalecimiento de la gobernanza del agua en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), para ello se realizó un mapa de calidad del agua con el método de interpolación por distancia inversa ponderada, utilizando como insumo los resultados del Índice de Calidad del Agua desarrollado a partir del monitoreo fisicoquímico en varios puntos del río Sinú. Posteriormente se realizó una consulta a expertos por el método analítico jerárquico, para ponderar los atributos ambientales que dieron origen al mapa de fragilidad ambiental asociado a la calidad del agua. Los resultados mostraron que la cuenca del río Sinú posee una calidad media muy homogénea a lo largo de su trayectoria, y que las áreas más frágiles corresponden al bajo Sinú, indicando la importancia de direccionar medidas de mitigación que permitan la restauración ecológica, promuevan la adaptación al cambio climático y fortalezcan la Gestión Integral del Recurso Hídrico y la gobernanza del agua.

Palabras clave: fragilidad ambiental, calidad de agua, cuenca hidrográfica, gobernanza del agua, AHP.

ABSTRACT

The quality of water from any specific source can be evaluated by measuring physical, chemical and biological parameters. Those values, when compared with regulatory limits, determine the danger to human and ecosystem health. However, this technique can involve high costs and operational complications. Geographic Information Systems (GIS) are useful tools for evaluating environmental problems in a hydrographic basin, making strong estimates for the identification and analysis of possible impacts on water quality, based on in the holistic study of the environmental characteristics and dynamics of Land Use and Land Cover Change. The aim of this research was to analyze the environmental fragility of the Sinú river basin due to water resource contamination, as a tool for strengthening water governance and the water resources integral management. A water quality map by Inverse Distance Weighting (IDW) method was made from Water Quality Index (WQI) results. Afterward, a survey among experts was carried through the Analytical Hierarchical Method (AHP) to assess the environmental attributes that constitute the map. The results showed the Sinú river basin has a very homogeneous average quality throughout its trajectory, and the most fragile areas are located in the lower Sinú region. This indicates the importance of direct mitigation measures that allow ecological restoration promote adaptation to change climate and strengthen the integral water resource management.

Keywords: environmental fragility, water quality, river basin, water governance, AHP

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural primordial para la supervivencia de los seres vivos en el planeta debido a la influencia directa que tiene sobre la salud y el bienestar, actuando como elemento clave para la conservación de los ecosistemas y protección de la biodiversidad [1]. A través de la historia, la presencia o ausencia de agua en las civilizaciones, ha marcado aspectos relacionados con la cultura, los hábitos, el tipo de ocupación y el desarrollo económico y tecnológico, pero también, su esencialidad, la ha hecho sujeto de conflictos, guerras y revoluciones sociales[2].

El agua, al ser utilizada por la sociedad como recurso, ha perdido reconocimiento de sus funciones sociales y naturales, y consecuentemente, las relaciones simbólicas, culturales, afectivas y religiosas, existentes entre el ser humano y el agua se han debilitado, generando pérdida de interés en su cuidado y protección [3]. Este proceso, incentivado por el desarrollo acelerado de un mundo moderno, se ha derivado en impactos a las fuentes hídricas naturales, tanto superficiales como subterráneas, alterando la biodiversidad y la dinámica ecosistémica debido a la disposición inadecuada de residuos sólidos y líquidos [4].

Colombia cuenta con una importante base de recursos naturales y es un país caracterizado por su gran biodiversidad, posicionándose como uno de los países más ricos del mundo en recursos hídricos, con una disponibilidad de 2.132 km³/año [5]. Sin embargo, se han evidenciado diversos impactos derivados de procesos de deforestación y contaminación hídrica [6]. Las nuevas formas de producción han generado cambio de patrones y variabilidad climática con una incidencia importante en la preservación y conservación de los recursos naturales. El país es más vulnerable por la falta de lluvias y la ocurrencia de eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes, así mismo se evidencia la falta de control y fiscalización en la normativa ambiental generando ineficiencia en el instrumento y, con ello, la perpetuación de impactos sobre el recurso hídrico, tanto en su calidad como cantidad [7]. Específicamente, en el departamento de Córdoba, en términos de agua superficial, existe una amplia variedad de ecosistemas que determinan la abundante oferta hídrica, esta se constituye en uno de los activos más importantes del departamento con derivación en cinco (5) grandes cuencas, caracterizadas por su fertilidad y alto índice de escorrentía superficial y subterránea, estas son: río Sinú, río San Jorge, río Canalete, Costanera y Amansaguapos [8]. No obstante, los cambios en el uso y cobertura del suelo principalmente en relación al incremento de pastos, ha llevado a la fragmentación de bosques naturales como consecuencia de la ganadería extensiva y a la contaminación del agua por el uso de agroquímicos para la actividad agrícola [7], [9].

La calidad del agua de cualquier fuente específica puede ser evaluada mediante la medición de parámetros físicos, químicos y biológicos, cuyos valores al ser comparados con los límites normativos, determinan o no la peligrosidad para la salud humana y ecosistémica [10]. Estas técnicas de medición requieren del

monitoreo continuo de variables cuantitativas en diferentes puntos de la fuente hídrica y normalmente resultan costosos y abarcan evaluaciones más locales. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) se posicionan como herramientas útiles y prácticas para la evaluación de fenómenos ambientales a escalas de cuencas hidrográficas, realizando estimaciones robustas para la identificación y análisis de posibles impactos a la calidad del agua, con base en el estudio integral de las características ambientales del territorio y la dinámica de uso y ocupación del mismo [11].

Teniendo en cuenta que la calidad del agua y la seguridad hídrica son preocupaciones políticas fundamentales para el bienestar social, y que la escasez hídrica configura una de las principales amenazas de conflicto mundial, es necesario desarrollar investigaciones para fortalecer institucional e interinstitucionalmente la gestión integral del recurso hídrico, aportando información que permita la gobernanza efectiva del agua, considerando los puntos de vista de los diferentes actores de la sociedad [3], [12]. En este sentido, contar con información dinámicamente actualizada en relación a parámetros fisicoquímicos como: temperatura, color, turbiedad, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), presencia de nitratos, sulfatos y fosfatos, metales pesados, oxígeno disuelto, pH y conductividad, y parámetros microbiológicos, como: coliformes totales y fecales, ayuda a entender la composición y dinámica de los agentes contaminantes y contribuyen en la evaluación de la calidad de agua de los cuerpos loticos y lenticos, permitiendo la oportuna toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales y demás entidades departamentales y/o municipales[5].

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar la fragilidad ambiental de la cuenca del río Sinú, frente a la contaminación del recurso hídrico, como herramienta para el fortalecimiento de la gobernanza del agua en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), integrando en el análisis técnicas facilitadoras de toma de decisiones como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Este artículo fue desarrollado en el marco del convenio de Ciencia, Tecnología e Innovación 014 del año 2020, dado entre la Universidad de Córdoba y la Corporación Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

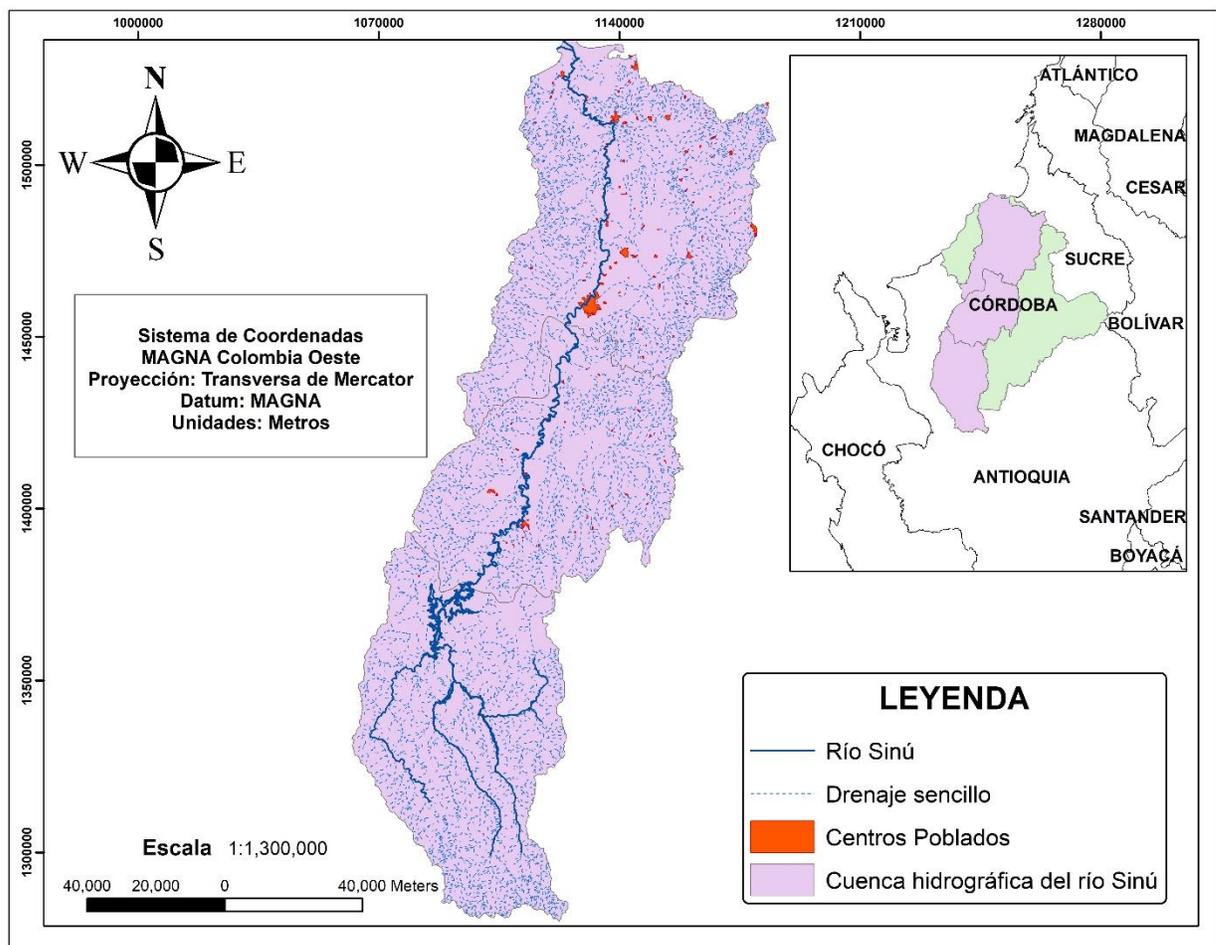
Área de estudio

La cuenca hidrográfica del Río Sinú tiene un área aproximada de 1.395.244 hectáreas de las cuales el 93% corresponde al departamento de Córdoba; el 6% a Antioquia y el 1% al departamento de Sucre. El perímetro de la cuenca del río Sinú es de 857.077 kilómetros que se extienden por las divisorias de aguas que la limitan [13]. Como se puede observar en la Figura 1.

El río Sinú es un cauce de alta dinámica fluvial evidenciada por su sistema sinuoso o meándrico en el cual se presentan varios procesos dinámicos del cauce así: a) frentes de sedimentación y erosión, b) desplazamiento lateral, c) desplazamiento frontal, d) cierre de meandros y e) formación de meandros opuestos [14].

La cuenca del río Sinú, en el contexto hidrográfico nacional, es una de las más representativas, y en la Costa Atlántica es la cuenca más extensa propia de un departamento. Los municipios que integran los territorios de la cuenca hidrográfica del Río Sinú en el Departamento de Córdoba son, de sur a norte: Tierralta, Montelíbano, Valencia, Planeta Rica, Montería, Canalete, Cereté, San Carlos, Ciénaga de Oro, San Pelayo, Cotorra, Sahagún, Chinú, San Andrés de Sotavento, Chimá, Momil, Purísima, Lorica, San Bernardo del Viento y San Antero; en el Departamento de Sucre, Sampedrés y Sincelejo y en el Departamento de Antioquia el municipio de Ituango [13].

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: IGAC (2015); CVS (2006)

Obtención de los atributos físicos evaluados

Los atributos del medio físico fueron mapeados con base a la información disponible en las bases de datos cartográficas de Colombia. El uso y cobertura del suelo para el año 2012, último mapa oficial realizado por el IDEAM bajo la metodología de Corine Land Cover, 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 [15]. Adicionalmente, con los datos obtenidos del monitoreo realizado durante el convenio en diferentes puntos del río Sinú, se realizó un mapa de calidad de agua que fue integrado al análisis de fragilidad ambiental.

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 a la clasificación altimétrica del Modelo Digital de Elevación (MDE), que fue obtenido de la plataforma Alaska Satellite Facility, específicamente del satélite Alos Palsar, con una resolución espacial de 12.5 metros. Finalmente, se obtuvieron los datos de precipitación de la plataforma de Consulta de Datos Hidrometeorológicos del IDEAM (DHIME), se seleccionaron 6 estaciones meteorológicas localizada en los municipios de la cuenca del río Sinú, 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.

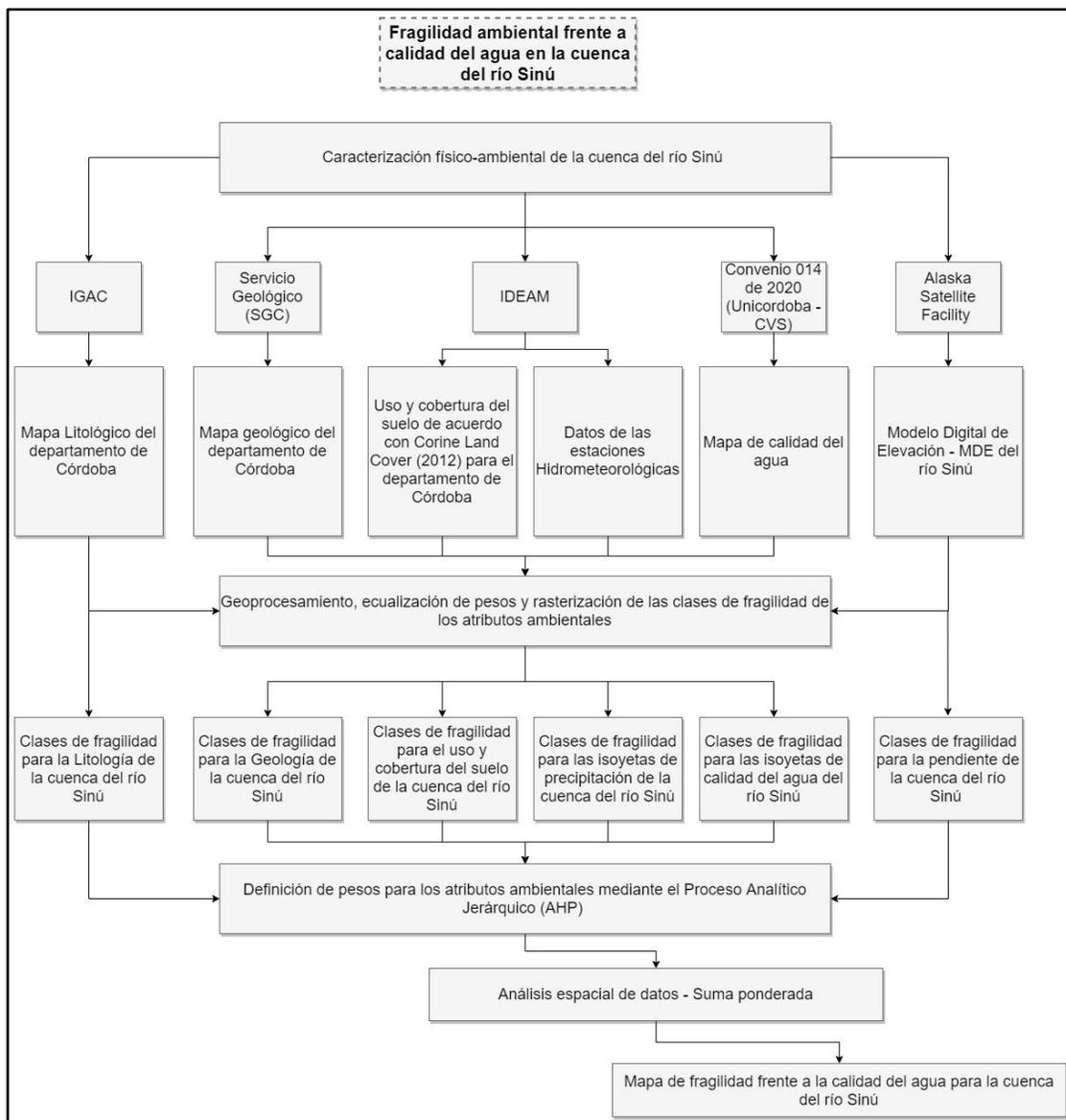
La determinación del ICA se realizó mediante dos campañas de monitoreo. La primera jornada fue en el año 2019, durante el periodo comprendido desde el 15 de mayo al 22 de mayo, caracterizado por presentarse en el transcurso de la temporada de lluvias bajas, la segunda jornada se presentó durante los días 27 y 28 de agosto de 2019, periodo caracterizado por presentarse en el transcurso de la temporada de lluvias. Y en el marco del 2020, teniendo en cuenta el contexto de la pandemia por COVID 19, se tomaron muestras de calidad de agua durante octubre y noviembre, evaluando

los siguientes parámetros: DBO₅, pH, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, fósforo total, hierro total y manganeso total, temperatura y oxígeno disuelto.

2.1. Análisis de fragilidad del ecosistema

El esquema metodológico presentado en la Figura 2, representa el procedimiento desarrollado para la elaboración del mapa de fragilidad frente a la calidad del agua para la cuenca del río Sinú.

Figura 2. Modelo cartográfico de fragilidad ambiental frente a la calidad del agua



Fuente: Adaptado de Carvalho et al. (2019)

Clasificación de los atributos ambientales

El análisis de fragilidad ambiental frente a la calidad del agua 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 [16], [17]. Por este motivo, los estudios integrados de un territorio deben estar encaminados al entendimiento de la dinámica de los ecosistemas bajo 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 [16].

En este sentido, a lo largo de las últimas décadas, diversos estudios han adoptado este principio, caracterizando y clasificando 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. Por ello, tomando como base varios estudios de fragilidad ambiental [17]–[22], 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.

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 artificiales; zonas pantanosas; lagunas costeras; mares y océanos; estanques para acuicultura marina; pantanos costeros; zonas arenosas naturales; nubes;	Tejido urbano continuo; tejido urbano discontinuo; cereales; pastos arbolados; bosque abierto; 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	Aeropuertos; zonas de extracción minera; tierras desnudas y degradadas; pastos limpios; pastos enmalezados; canales; zonas quemadas; obras hidráulicas; zonas industriales o comerciales.

Atributo Ambiental	Pesos de fragilidad asignados a las clases de los atributos ambientales		
	Baja 1	Media 2	Alta 3
		secundaria o en transición; cultivos permanentes arbóreos; vegetación acuática sobre cuerpos de agua: otros cultivos transitorios	
Geología	Cretáceo inferior; cretáceo superior; paleoceno-eoceno	Triásico; langhiano-tortoniano; aquitaniano-burdigaliano; haloceno; lutetiano-bartoniano; mesiniano-zancleano; turoniano-maastrichtiano	Cuaternario; rupeliano-burdigaliano; plioceno; turoniano-maastrichtiano; thanetiano-ypresiano
Litología	Cuerpo de agua; arcillolitas con intercalaciones de areniscas y materiales calcáreos; arcillolitas, areniscas y conglomerados, con lentes calcáreos; diferentes tipologías de rocas ígneas;	Complejo de areniscas calcáreas, arcillolitas y limolitas; lodolitas y areniscas con presencia de materiales calcáreos y gravas cuarzosas; lodolitas, arcillolitas y areniscas conglomeráticas; lodolitas, areniscas y conglomerados.	Diferentes tipologías de rocas sedimentarias; sedimentos coluvio-aluviales; finos y otros tipos de sedimentos; zona urbana.
Precipitación anual (mm)	>1400 mm P ≤ 2500 mm	≥ 1000 mm P ≤ 1400 mm y > 2500 mm P ≤ 3000 mm	< 1000 mm P > 3000 mm
Pendiente	[0% - 3%]	(3% - 20%]	> 20%
Calidad del agua	ICA mayor o igual a 0.8	ICA mayor a 5.0 y menor a 0.8	ICA Menor o igual a 5.0

Fuente: elaboración propia a partir de Ross (1994); Ruhoff et al. (2005); Manfré et al. 2013; Massa y Ross (2012); Carvalho et al. (2019).

Proceso Analítico Jerárquico para valoración de los atributos ambientales

La ponderación por pesos de los diferentes atributos ambientales se realizó mediante el proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), el cual ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios ambientales después de ser introducido por primera vez en 1970 por Thomas Satty [23]. Este instrumento permite realizar comparación por pares de criterios, y estima pesos a cada una de las interacciones, para obtener una jerarquización global dando como resultado la importancia relativa de cada una de las variables en relación con las otras [24].

El juicio de comparación fue realizado por un panel de 10 expertos, que calificaron la significancia de cada atributo en una escala numérica del 1 al 9, donde 1 simboliza igualdad de importancia, y el rango comprendido entre 2 y 9 que tan importante es un elemento con respecto al otro [25]. Los expertos

seleccionados son profesionales e investigadores del área de recursos hídricos, que por su experiencia y área de trabajo poseen una comprensión integral de la dinámica hidrológica y la gobernanza del agua. Para la obtención de los datos, se realizó la determinación de pesos relativos de forma individual a partir de las respuestas de cada experto, usando la escala numérica establecida mediante la herramienta *AHP Priority Calculator*, disponible en el enlace: <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php>.

El valor numérico asignado con base en el juicio de valor y concepto de los expertos permite inferir radios de importancia. Este resultado contiene información de las preferencias de cada uno de los componentes con referencia a los otros [26]. La matriz de preferencia se caracteriza por ser positiva, recíproca y transitiva, y por lo tanto consistente; bajo estas propiedades se puede generar el vector de clases que contiene la información implícita y que define los pesos de los diferentes criterios evaluados [27].

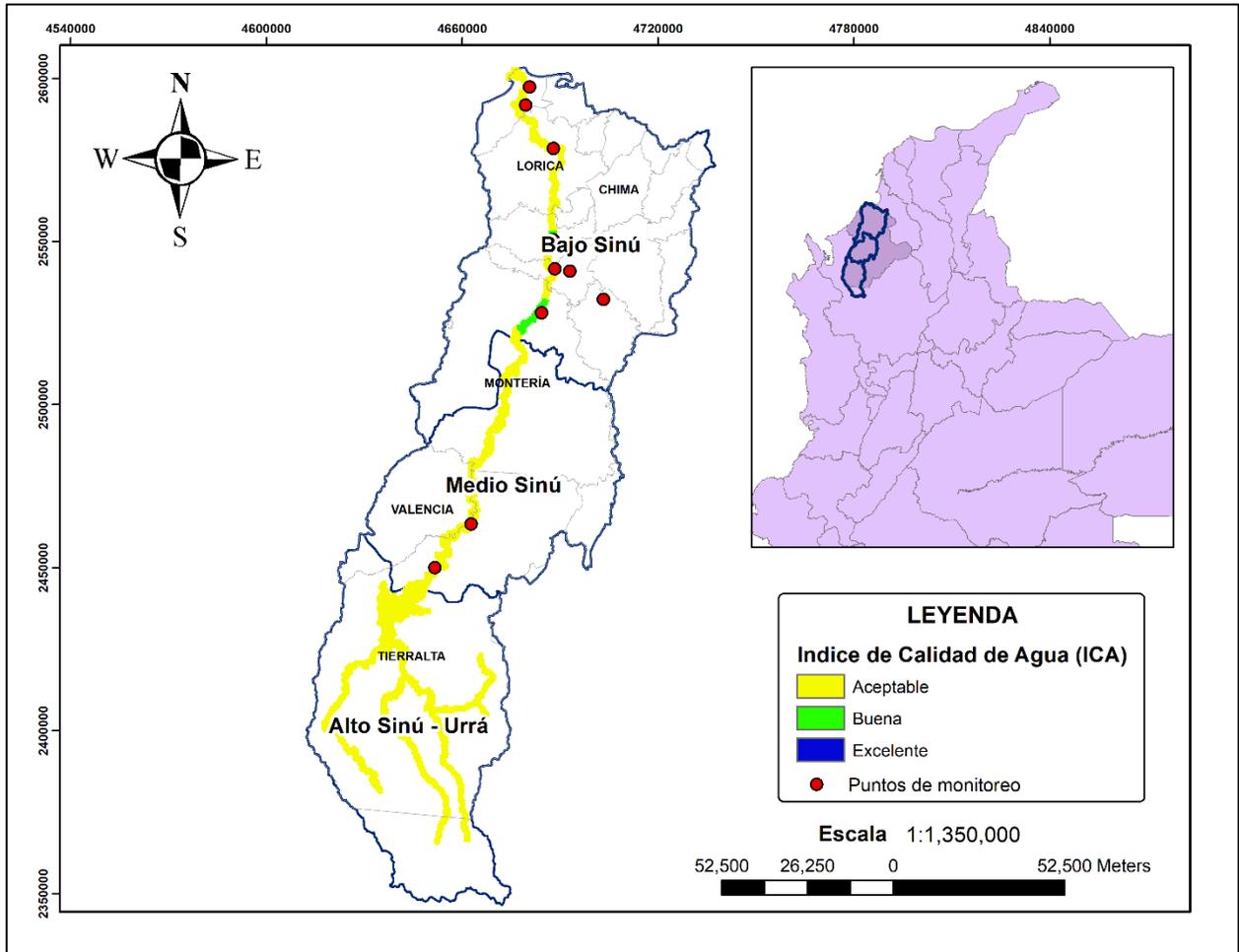
3. RESULTADOS

Los resultados del estudio integran la realización del mapa de calidad del agua, a partir del Índice de Calidad de Agua (ICA) para el río Sinú, donde se contemplan los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos monitoreados durante las campañas establecidas en el convenio de Ciencia, Tecnología e Innovación 014 del año 2020 (Los parámetros medidos fueron: Coliformes Fecales, pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días, Nitratos, Fosfatos, Cambio de la Temperatura, Turbidez, Sólidos disueltos totales y Oxígeno Disuelto). Posteriormente, se determinaron los pesos de ponderación de cada parámetro y se realizó el mapa de fragilidad ambiental frente a la calidad del agua.

Mapa de calidad del agua

El mapa de calidad del agua se realizó a partir de los monitoreos llevados a cabo en diferentes puntos del río Sinú. El resultado permite evidenciar que en la mayor parte del trayecto se presenta un Índice de calidad del Agua aceptable, que indica que es apto para consumo humano, riego e industria pero que requiere de un tratamiento especial. Adicionalmente, en el tramo localizado al norte de la ciudad de Montería, el ICA obtenido presentó buena calidad, por lo tanto, es apto para consumo humano con tratamientos convencionales[28]. Finalmente, los resultados del monitoreo muestran que en ninguna sección del trayecto del río Sinú, se presenta una calidad del agua excelente, o inferior a aceptable. La Figura 3, presenta el mapa realizado.

Figura 3. Índice de Calidad del Agua del río Sinú

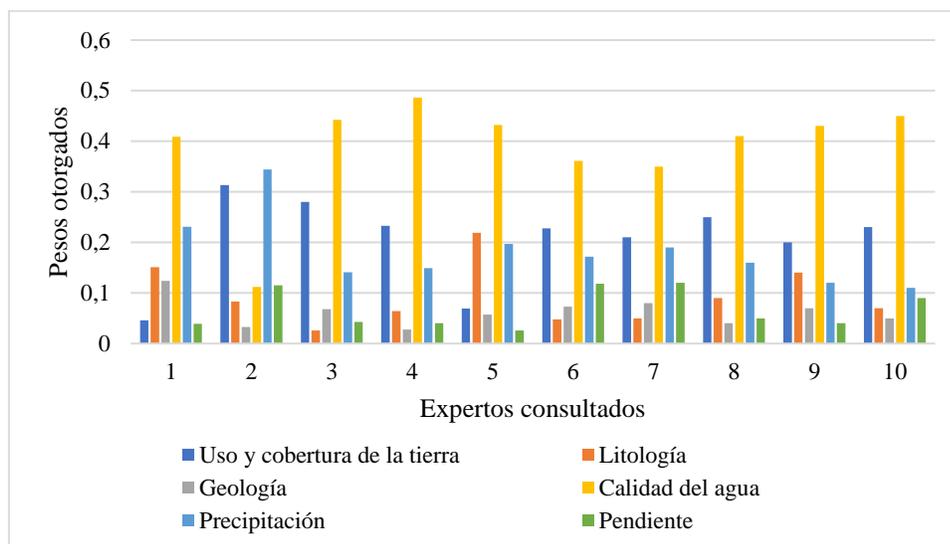


Fuente: Elaboración propia (2020)

Cálculo de pesos mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El proceso de comparación par a par mediante la metodología AHP, se realizó haciendo uso de la herramienta AHP Priority Calculator. Cada experto realizó un total de 15 comparaciones par a par con referencia a los atributos de evaluación seleccionados. Con base en esta información se obtuvieron las matrices de importancia y los vectores de clase. Los resultados de pesos de atributos por cada experto se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Pesos relativos de cada atributo por experto



Fuente: elaboración propia (2020)

Se puede evidenciar que, existe una tendencia clara en la predominancia del atributo “calidad del agua” debido a la relación directa con la variable que se quiere estudiar, toda vez que representa un dato exacto de fragilidad asociado a indicadores como el ICA en la cuenca del río Sinú. Posteriormente, la cobertura de la tierra y la precipitación, interactúan y condicionan la dinámica hídrica de un sistema, el tipo de uso del suelo, por ejemplo, es fundamental para estimar posibles fuentes de contaminación y el volumen de agua que precipita, a su vez, indica el comportamiento de la escorrentía y de la infiltración. Los demás atributos ambientales, a pesar de haber recibido un menor peso, también se relacionan con la calidad del agua, pues las propiedades químicas del suelo, condicionan la calidad de las fuentes hídricas. Así mismo, las altas pendientes en cuencas hidrográficas están asociadas al transporte rápido, que por su dinámica genera mayor arrastre de sedimentos y de los contaminantes asociados a estos. Finalmente, los resultados promediados entre los expertos, para la ponderación de atributos ambientales se presentan en la Tabla 2. La obtención de un índice de consistencia menor al 10% permitió validar el método aplicado.

Tabla 2. Pesos ponderados por atributo ambiental

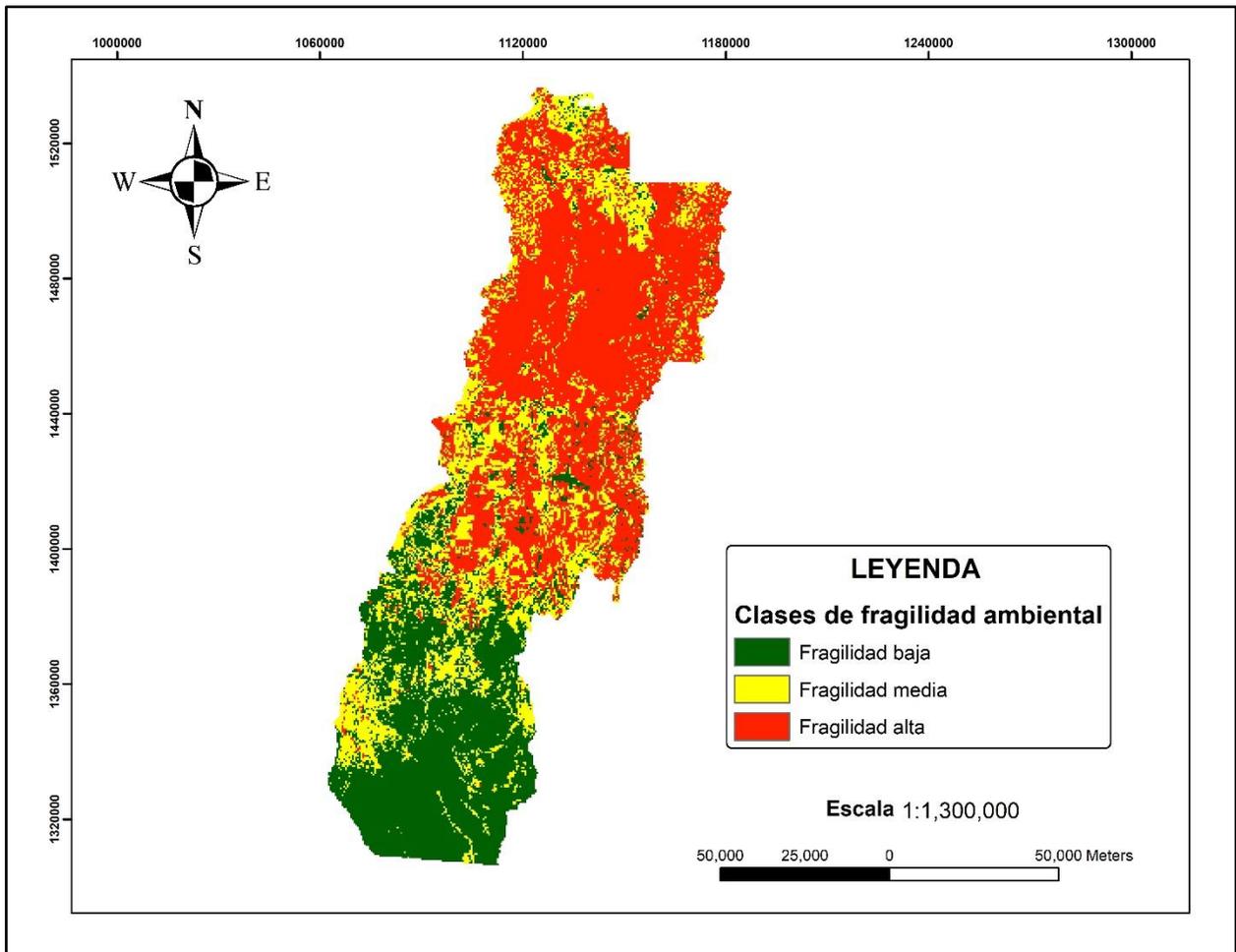
Atributos ambientales	Peso de ponderación	Porcentaje (%)
Uso y cobertura de la tierra	0,2059	20,59
Litología	0,0941	9,41
Geología	0,0623	6,23
Calidad del agua	0,3882	38,82
Precipitación	0,1814	18,14
Pendiente	0,0681	6,81

Fuente: elaboración propia (2020)

Mapa de fragilidad ambiental frente a la calidad del agua

Mediante la herramienta de suma ponderada, se realizó la sobreposición de las capas de información en formato *ráster*, las cuales se clasificaron conforme se estableció en la Tabla 1, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). El resultado permitió obtener un mapa de fragilidad ambiental frente a la calidad del agua, en la cuenca del río Sinú (Ver Figura 5). Es clave indicar que el atributo de calidad del agua, valorado con un 38,82% por los expertos encuestados, tuvo un comportamiento muy uniforme en toda la cuenca, recibiendo una clasificación media. Por tal motivo, no existe una incidencia fuerte de este parámetro en el mapa de fragilidad generado, identificándose que, la cuenca del río Sinú posee una calidad de agua media. De esta manera, los atributos cuyo peso denotan la heterogeneidad del mapa, se relacionan con el uso y cobertura del suelo, las precipitaciones, litología, pendientes y geología.

El mapa de fragilidad muestra valores elevados en la cuenca baja del río Sinú, donde la cobertura del suelo boscosa es carente y la geología y litología están más asociadas a suelos de materiales finos y sedimentos. El mapa denota la importancia de proteger las áreas de nacimientos de agua, evidenciando que existen zonas afectadas con fragilidad media probablemente asociada a la deforestación en el Parque Nacional Natural Paramillo [29]. La cuenca alta del río Sinú posee una mejor calidad del agua, de conformidad con los resultados obtenidos por Hernández-Álvarez et al (2021) en la determinación del ICA de la quebrada Jui, afluente del río Sinú localizada en la cuenca alta; donde a partir de monitoreos en época seca y de lluvias, se obtuvieron valores de ICA superiores a 70 en más del 90% de las muestras tomadas [30]. Sin embargo, a medida que el curso hídrico hace su trayectoria por los municipios, los vertimientos y la contaminación con residuos sólidos liberados generan impactos en su calidad. Galeano, Álvarez & Palencia (2017) encontraron que el río Sinú posee en términos generales una buena calidad. No obstante, en sus cuencas media y baja, donde el río va siendo impactado por aguas residuales domésticas e industriales y la minería de arena y grava, el valor de los índices tiende a disminuir un poco [31]. Este proceso de contaminación paulatina tiene impactos más severos en el bajo Sinú, donde los demás atributos ambientales evaluados indican una condición altamente frágil del territorio ante la disminución de la calidad del agua.

Figura 5. Fragilidad ambiental de la cuenca del río Sinú frente a la calidad del agua

Fuente: elaboración propia (2020)

4. CONCLUSIÓN

La fragilidad ambiental frente a la calidad del agua es una herramienta que permite identificar las áreas vulnerables de una cuenca hidrográfica. El análisis realizado para la cuenca del río Sinú, en primer lugar, permitió evidenciar que la calidad del agua, a través del ICA, se encuentra mayoritariamente en una clase aceptable, es decir, el agua del río Sinú es apta para consumo humano, siempre que se realicen tratamientos especiales para la remoción de la carga contaminante. Por otro lado, la suma ponderada de los atributos ambientales (calidad del agua, uso y cobertura de la tierra, geología, litología, precipitación y pendiente), cuyos pesos fueron valorados por diez expertos en recursos hídricos, mostró que la fragilidad alta, se encuentra en la cuenca baja del río Sinú, donde debido a la dinámica hídrica y a los procesos paulatinos de contaminación del agua que se dan a lo largo de la cuenca, se manifiestan los mayores impactos al recurso

hídrico. Es decir, la cuenca hidrográfica del río Sinú, posee condiciones propias del territorio que la hacen frágil ante la contaminación hídrica, hecho que configura un efecto sinérgico y puede incrementar la magnitud de los impactos ambientales. En ese sentido, es fundamental direccionar medidas de intervención y mitigación, de tal manera que se logren mejorar o rehabilitar las condiciones del territorio que influyen en la alta fragilidad. Entre las principales medidas, se encuentra la reforestación, la mitigación de la erosión ribereña, protección de rondas hídricas y el fortalecimiento de procesos de adaptación al cambio climático y de resiliencia ambiental. Estas medidas deben ser basadas en un proceso adecuado y consciente de toma de decisiones para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y la gobernanza del agua, involucrando los diferentes actores ambientales y sociales de todo el territorio.

AGRADECIMIENTOS

*Los autores agradecen al Convenio 014 de 2020 celebrado entre la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge CVS con la Universidad de Córdoba como fuente de financiación para la obtención de esta publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Tyagi, B. Sharma, P. Singh, y R. Dobhal, «Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index», *Am. J. Water Resour.*, vol. 1, n.º 3, pp. 34-38, oct. 2020, doi: 10.12691/ajwr-1-3-3.
- [2] V. Dictoro y F. Hanai, «Análise da relação homem-água: a percepção ambiental dos moradores locais de cachoeira de emas – SP, bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu», *RAEGA*, vol. 36, p. p.92-120, 2016.
- [3] E. G. Stets *et al.*, «Landscape Drivers of Dynamic Change in Water Quality of U.S. Rivers», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n.º 7, pp. 4336-4343, abr. 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b05344.
- [4] R. Bhatia y D. Jain, «Water quality assessment of lake water: a review», *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 2, n.º 2, pp. 161-173, jun. 2016, doi: 10.1007/s40899-015-0014-7.
- [5] L. E. Gualdrón Durán, «Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físicoquímicos y biológicos», *Din. Ambient.*, n.º 1, pp. 83-102, dic. 2018, doi: 10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593.
- [6] J. Marrugo-Negrete, J. Pinedo-Hernández, S. Marrugo-Madrid, y S. Díez, «Assessment of trace element pollution and ecological risks in a river basin impacted by mining in Colombia», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, n.º 1, pp. 201-210, ene. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10356-4.
- [7] N. Suarez, «Análisis espacio temporal del uso del suelo y sus efectos en el clima local y la oferta hídrica en la cuenca del río Canalete, Córdoba – Colombia», Maestría en ciencias ambientales, Universidad de Córdoba, Montería, 2019.
- [8] CVS y Fundación Bosques Humedales., «Convenio especial de cooperación científica y tecnológica entre la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge – CVS Y la Fundación Bosques y Humedales para Diseñar e Implementar una red de monitoreo de calidad de agua.» 2016.
- [9] D. M. A. Gómez, A. A. M. Tovar, F. M. T. Botero, D. de J. G. Suárez, y L. F. C. Serna, «Estudio del modelamiento de la calidad del agua del Río Sinú, Colombia», *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 12, n.º 22, pp. 33-44, 2013.

- [10] T. Rajaei, S. Khani, y M. Ravansalar, «Artificial intelligence-based single and hybrid models for prediction of water quality in rivers: A review», *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 200, p. 103978, may 2020, doi: 10.1016/j.chemolab.2020.103978.
- [11] M. J. R. Pinto, «Avaliação de condições ambientais de nascentes de cursos de água: ferramenta de subsídio à gestão de recursos hídricos e ao planejamento de bacias hidrográficas», 2019.
- [12] N. González, «Desafíos de la gobernanza ambiental: una aproximación a las implicaciones de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en Colombia», p. 25, 2017.
- [13] Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge - CVS, «Plan de acción para la atención de la temporada de lluvias en el Departamento de Córdoba.» 2018.
- [14] CVS y UNINORTE, «Estudios y diseños de las obras de Ingeniería para la protección contra la erosión lateral causada por el río Sinú en Tierralta - Córdoba». 2005.
- [15] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra*. 2010.
- [16] J. Tricart, *ecodinâmica*, n.º 1. Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, Secretaria de ..., 1977.
- [17] J. L. S. Ross, «Análise Empírica Da Fragilidade Dos Ambientes Naturais Antropizados», *Geography Department, University of Sao Paulo*. pp. 63-74, 1994, doi: 10.7154/rdg.1994.0008.0006.
- [18] E. M. Massa y J. L. S. Ross, «Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP», *Rev. Dep. Geogr.*, vol. 24, pp. 57-79, 2012.
- [19] J. V. R. Guerrero, J. A. de Lollo, L. E. Moschini, y R. Lorandi, «Carta de Fragilidade Ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do rio Clarinho, SP Environmental Fragility chart as an instrument for planning and conservation of aquifer units: the case of Clarinho river watershed, SP», *Cad. Geogr.*, vol. 28, n.º 53, pp. 385-403, 2018.
- [20] A. P. P. Carvalho *et al.*, «Environmental Fragility to Erosion in an Anthropogenic Watershed in the Northeast of the State of São Paulo, Brazil», *Anuário Inst. Geociências - UFRJ*, vol. 42, n.º 3, pp. 7-18, sep. 2019, doi: 10.11137/2019_3_07_18.
- [21] Y. Gao y H. Zhang, «The study of ecological environment fragility based on remote sensing and GIS», *J. Indian Soc. Remote Sens.*, vol. 46, n.º 5, pp. 793-799, 2018.
- [22] L. A. Manfré, A. M. da Silva, R. C. Urban, y J. Rodgers, «Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region)», *Environ. Earth Sci.*, vol. 69, n.º 3, pp. 947-957, jun. 2013, doi: 10.1007/s12665-012-1979-2.
- [23] T. Satty, «Thomas L. Saaty», *International Series in Operations Research and Management Science*, vol. 147. pp. 577-591, 2011, doi: 10.1007/978-1-4419-6281-2_31.
- [24] D. R. Macedo, R. M. Hughes, P. R. Kaufmann, y M. Callisto, «Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome», *Sci. Total Environ.*, vol. 635, pp. 1267-1279, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.216.
- [25] P. H. Dos Santos, S. M. Neves, D. O. Sant'Anna, C. H. de Oliveira, y H. D. Carvalho, «The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications», *J. Clean. Prod.*, vol. 212, pp. 119-138, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.270.
- [26] J. Willmer Escobar, «Metodología para la toma de decisiones de inversión en portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP», *Contaduría Adm.*, vol. 60, n.º 2, pp. 346-366, 2015, doi: 10.1016/S0186-1042(15)30004-8.
- [27] H. Lara y H. Osorio, «Cálculo del vector de preferencias del proceso analítico jerárquico bajo el enfoque de optimización», *Publicaciones En Cienc. Tecnol.*, vol. 1, n.º 2, pp. 52-61, 2007.
- [28] P. Torres, C. H. Cruz, y P. J. Patiño, «Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica», *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 8, n.º 15, p. 16.
- [29] A. Cuellar y M. Cardona, «Deforestación por cultivos de coca: Efecto en los Parques Nacionales Naturales de Colombia», Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes, 2019.

- [30] Urdedys Hernandez-Alvarez, Jose Pinedo-Hernandez, Roberth Paternina-Urbe, y José Marrugo-Negrete, «Evaluación de calidad del agua en la Quebrada Jui, afluente del río Sinú, Colombia», *Rev. UDCA Actual. Divulg. Científica*, vol. 24, n.º 1, feb. 2021, Accedido: mar. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1678>.
- [31] C. A. B. Galeano, K. L. Álvarez, y P. A. E. Palencia, «Análisis comparativo de indicadores de la calidad del agua del río Sinú municipio de Montería, Córdoba.», p. 10, 2017.