

Aplicación de modelo 4D para el análisis de impactos económicos, sociales y ambientales. Caso de estudio para un proyecto hidroeléctrico

Application of a 4D Model for the Analysis of Economic, Social, and Environmental Impacts: A Case Study of a Hydroelectric Project

Juan Felipe Laverde-Salazar¹ , Gloria Patricia Jaramillo-Álvarez² , María Adelaida Torres-Sánchez³ 

¹Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín-Colombia, juan.laverde@pascualbravo.edu.co, ²Universidad Nacional de Colombia, Medellín-Colombia, gjjarami@unal.edu.co, ³Universidad Nacional de Colombia, Medellín-Colombia, matorres@unal.edu.co

Cómo citar / How to cite

Laverde-Salazar, J. P., Jaramillo-Álvarez, G. P., y Torres-Sánchez, M. A. (2025). Aplicación de modelo 4D para el análisis de impactos económicos, sociales y ambientales. Caso de estudio para un proyecto hidroeléctrico. *Revista CEA*, 11(27), e3349. <https://doi.org/10.22430/24223182.3349>

RESUMEN

Objetivo: validar la aplicabilidad de un modelo de análisis de impactos en 4D (dimensiones multidecisor, multicriterio, multitemporal y multiespacial) en proyectos hidroeléctricos. El modelo permite identificar y priorizar los impactos más importantes e influyentes, comparándolos con los impactos previamente identificados en estudios publicados sobre la hidroeléctrica Hidroituango, para reconocer disparidades en las afectaciones reales.

Diseño/metodología: se utilizó, inicialmente, una metodología exploratoria obteniendo información contextual y comparando los resultados del modelo con los datos publicados por el proyecto hidroeléctrico. En una segunda fase, se empleó la metodología Analytic Hierarchy Process (AHP), un modelo cuantitativo de simulación estadística para jerarquizar los impactos dentro de un sistema complejo, asignando pesos relativos a los criterios de evaluación y comparando los planteados por la evaluación de impacto ambiental con los arrojados por el modelo.

Resultados: los resultados mostraron discrepancias entre los impactos identificados en la evaluación de impacto ambiental y los arrojados por el modelo. Este permitió identificar impactos no considerados en el análisis original, como los efectos sobre comunidades locales y áreas de influencia indirecta, además de evidenciar la interrelación entre los impactos, algunos que no son graves pero tienen un mayor efecto debido a su influencia en otros aspectos del proyecto.

Conclusiones: el análisis previo del proyecto no consideró adecuadamente ciertos impactos, especialmente los relacionados con las comunidades cercanas. El modelo 4D demostró su utilidad para identificar y priorizar impactos que podrían haberse pasado por alto, destacando la necesidad de realizar análisis multidimensionales para apoyar planes de manejo ambiental más completos y equilibrados.

Originalidad: este estudio propone un enfoque multidimensional para el análisis de impactos, destacando el modelo 4D para mejorar la gestión ambiental al identificar influencias entre impactos y priorizar aquellos más influyentes, además de abordar el desequilibrio de cargas sobre actores, etapas, aspectos sociales, económicos, entre otros.

Palabras clave: efectos de las actividades humanas, modelo de simulación, análisis multicriterio, proyecto hidroeléctrico, evaluación del impacto ambiental.

Highlights

- El modelo 4D analiza impactos en múltiples dimensiones interrelacionadas.
- Identifica impactos clave según influencia, magnitud y duración.
- Ofrece un insumo previo al proceso de evaluación de impacto ambiental.
- Mejora la estructuración de planes de manejo ambiental en hidroeléctricas.
- Aporta un enfoque novedoso para proyectos de infraestructura complejos.

ABSTRACT

Objective: To validate the applicability of a 4D impact analysis model—incorporating multi-decision-maker, multi-criteria, multi-temporal, and multi-spatial dimensions—in hydroelectric projects. The model serves to identify and prioritize the most significant impacts and to compare them with those reported in published studies on the Hidroituango hydroelectric project, thereby revealing discrepancies in actual effects.

Design/Methodology: First, an exploratory approach was applied to gather contextual information and compare the model's results with published data on the hydroelectric project. Then, the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology, a quantitative statistical simulation model, was employed to rank impacts within a complex system. This was done by assigning relative weights to the evaluation criteria and comparing the results of the Environmental Impact Assessment (EIA) with those generated by the 4D model.

Findings: The findings revealed discrepancies between the impacts identified in the EIA and those highlighted by the 4D model. The model brought to light impacts that had not been considered in the original analysis, such as those on local communities and areas of indirect influence. It also underscored interrelationships among impacts, showing that some minor effects can gain importance through their influence on other aspects of the project.

Conclusions: The initial project assessment overlooked certain impacts, especially those related to nearby communities. The 4D model proved useful for identifying and prioritizing these impacts, which emphasizes the need for multidimensional analyses to inform more comprehensive and balanced environmental management plans.

Originality: This study proposes a multidimensional approach to impact analysis and presents a 4D model as a tool to improve environmental management. The model identifies interrelated impacts, prioritizes those with the greatest influence, and addresses imbalances across actors, stages, and socioeconomic aspects.

Keywords: effects of human activities, simulation model, multicriteria analysis, hydroelectric project, environmental impact assessment.

Highlights

- The 4D model evaluates impacts across multiple interrelated dimensions.
- It identifies key impacts based on influence, magnitude, and duration.
- It provides input prior to the environmental impact assessment process.
- It supports the design of more robust environmental management plans for hydroelectric projects.
- It introduces a novel approach to complex infrastructure projects.

1. INTRODUCCIÓN

Los grandes proyectos de infraestructura para la generación de energía constituyen un mecanismo clave de progreso para los países (Shi et al., 2025), ya que permiten alcanzar diversos objetivos estratégicos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2021); entre ellos, una transición energética adecuada (Zubair Chishti et al., 2024). Esto facilita una menor dependencia de los combustibles fósiles y una mayor diversificación de la matriz energética (Berdysheva y Ikonnikova, 2021). Colombia cuenta con un amplio potencial en términos de energías renovables (Henao et al., 2019), especialmente la energía hidroeléctrica sobre la cual se han planteado diferentes proyectos (Robles Algarin y Rodríguez Álvarez, 2018). Puntualmente, el proyecto hidroeléctrico Hidroituango, ubicado en la cuenca del río Cauca, en el departamento de Antioquia (Suárez et al., 2022), ha sido el último gran proyecto de este tipo que se ha construido en el país (Fonseca-Reyes, 2024), del cual se esperan grandes beneficios para la región, como el aumento en la oferta energética nacional y la generación de empleo local (Morales Pardo, 2022).

De acuerdo con la regulación colombiana (Congreso de la República de Colombia, Ley 99, 1993), todo proyecto hidroeléctrico debe cumplir con ciertas condiciones para obtener su licencia ambiental, entre las que se identifica la evaluación de impacto ambiental (EVA) (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1993) y sobre la cual se construye el plan de manejo ambiental del proyecto, que plantea acciones de manejo adecuadas a cada uno de los impactos que se puedan generar (Glasson y Therivel, 2013). Sin embargo, se han identificado dos problemáticas clave en este proceso. Primero, la falta de análisis previo a la EVA que brinde más información para la construcción de los planes de manejo (Millard, 2023; Sengupta y Sengupta, 2022; Vidal y Asuaga, 2021). Por otra parte, en el caso específico de Hidroituango, la EVA fue elaborada con un enfoque centrado en el proyecto como actor principal, lo que llevó a omitir factores relevantes relacionados con las comunidades locales (Cuervo López, 2018; Grisales Medina et al., 2021; León Montealegre y Roa-García, 2023; Morales Pardo, 2022; Torres Sánchez, 2014), Asimismo, no se incluyeron áreas clave dentro del área de influencia, como las zonas ubicadas aguas arriba del embalse (Arias-Henao y Roca-Servat, 2022; Morales Pardo, 2022). Además, se asociaron de manera incorrecta los impactos a las distintas fases del proyecto (Castillo de Herrera, 2020; Torres Sánchez, 2014) y se emplearon criterios de evaluación de forma independiente, sin considerar la interrelación existente entre ellos (EPM Ituango, 2011).

En la presente investigación se pretende validar la aplicabilidad de un modelo en 4 dimensiones (espacial, temporal, decisor y criterios) que permita identificar factores de mejora en el análisis de

impactos ambientales generados por proyectos de infraestructura, específicamente el de Hidroituango.

La metodología se estructura en dos fases. Primero, una fase exploratoria, en la cual se identifican los documentos relevantes para construir el contexto de la investigación, obtener los datos para alimentar el modelo 4D de análisis de impactos (Laverde Salazar, 2024) y comparar los resultados arrojados con la información disponible. En la segunda fase se utiliza el modelo en 4 dimensiones propuesto por Laverde Salazar (2024). Este modelo emplea una simulación estadística y de operaciones matriciales para jerarquizar los impactos identificados en el proyecto y valorar su influencia en el sistema. En el modelo se incluyeron los impactos identificados en el estudio de impacto ambiental (EslA), utilizando criterios de magnitud y duración para valorar cada impacto, adicionando el criterio de influencia que aporta este modelo al análisis.

Además, en el presente documento se describe la situación de Colombia en términos energéticos y legales, así como el proceso de licenciamiento ambiental. Después, se describen los 3 pasos importantes con los cuales trabaja el modelo, incluyendo una breve explicación de la metodología. Finalmente, se plantean los resultados obtenidos luego de correr el modelo con los datos del proyecto hidroeléctrico Hidroituango y se presentan las principales conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, y en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por Colombia y promovidos internacionalmente, el país ha enfocado sus esfuerzos en avanzar hacia un proceso de transición energética para los próximos años (Congreso de la República de Colombia, Proyecto de Ley 274, 2023). Dicho proceso implica transformar la matriz energética del país, con el objetivo de reducir progresivamente la dependencia de los combustibles fósiles. En la actualidad, la energía térmica representa aproximadamente el 30% de la matriz energética en Colombia (XM, 2023) y, según lo planteado por Robles Algarin y Rodríguez Álvarez (2018), la capacidad de generación de energía por medio de hidroeléctricas lo ubica como el quinto país con mayor potencial.

Por otra parte, y tal como lo plantea la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2021), los proyectos de infraestructura, como los hidroeléctricos, cumplen un papel importante en el desarrollo económico, político y social de los países. Sin embargo, la construcción de estos proyectos genera impactos ambientales negativos a corto y a largo plazo (Campos-Medina y Noguer Aceitón, 2023), los cuales, en algunos casos, han desencadenado en conflictos socioambientales afectando incluso factores económicos de la población en las diferentes áreas de influencia de los proyectos (Chung Lau, 2023).

En términos de mitigar los impactos generados por los proyectos hidroeléctricos y otros de infraestructura, en Colombia existe un proceso conocido como licenciamiento ambiental, el cual es un requisito previo para su construcción y puesta en marcha. Dicho proceso fue establecido inicialmente en la Ley 99 de 1993 y actualizado en el Decreto 1076 (Presidencia de la República de Colombia, 2015), en donde se evalúa y se decide acerca del otorgamiento o no de las licencias basándose en estudios realizados por los diferentes proyectos. Este es explicado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2019) como el proceso que busca evaluar los posibles impactos

ambientales significativos que puede generar el proyecto y establecer las acciones de manejo para mitigarlos. En la Figura 1 se puede apreciar, de manera resumida, dicho proceso que comienza con la inscripción del proyecto, pasando por el diagnóstico ambiental de alternativas (DAA), EsIA y finalmente la decisión por parte de la entidad sobre otorgar o no la licencia.

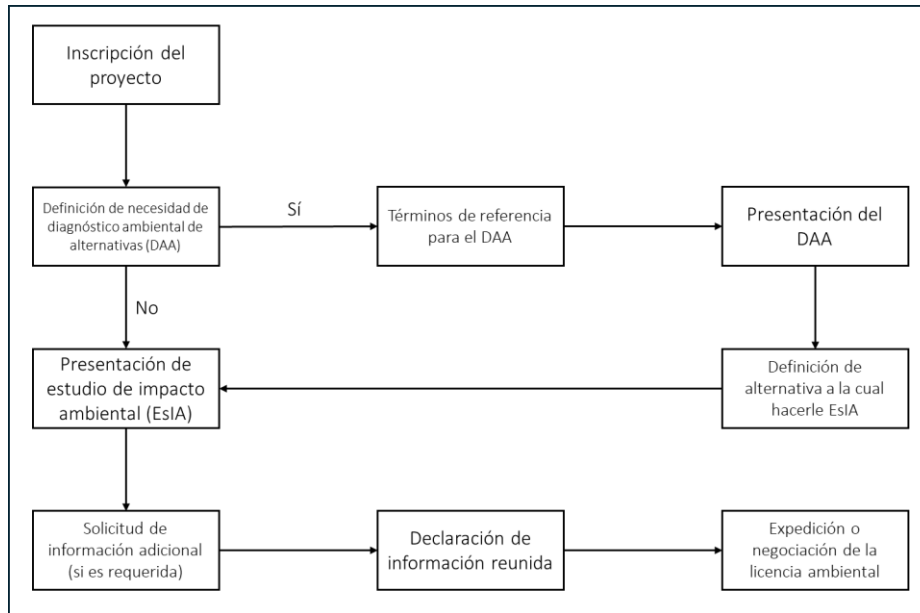


Figura 1. Proceso resumido del licenciamiento ambiental en Colombia.

Figure 1. Summary of the environmental licensing process in Colombia.

Fuente: Laverde-Salazar et al. (2023).

Dentro del EsIA se encuentran la EvIA y el análisis de riesgos como uno de los componentes importantes en el estudio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2017). Se han desarrollado diferentes metodologías para la EvIA que permiten realizar la evaluación, las cuales se apoyan en componentes teóricos, tecnológicos y de innovación para mejorar continuamente dicho proceso evaluativo (Laverde-Salazar et al., 2024). No obstante, se han evidenciado ciertas falencias en el proceso, especialmente en la identificación de los impactos en todas las dimensiones y sus influencias entre sí y en la comprensión de cómo dicha información puede usarse por medio de un correcto análisis para apoyar el diseño de los planes de manejo ambiental en los diferentes proyectos (Millard, 2023; Sengupta y Sengupta, 2022; Vidal y Asuaga, 2021).

Al presente, y con base en las falencias planteadas anteriormente, como la ausencia de un análisis previo a la evaluación, la exclusión de actores comunitarios clave y la falta de integración entre los impactos identificados, los planes de manejo ambiental cobran especial relevancia debido a que permiten tomar decisiones sobre proyectos que afectan el medio ambiente, especialmente en los proyectos de energía, dado que muestran algunas lagunas frente a las consideraciones de sostenibilidad de los proyectos y la relación inclusiva entre los impactos identificados y los planes de manejo ambiental (Grisales Medina et al., 2021). Por ejemplo, y tal como lo plantea Morales Pardo (2022) en su estudio, para el caso del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, el plan de manejo en el componente del patrimonio cultural tuvo que ser modificado debido a que desde la EvIA y la identificación de los impactos no se dimensionó correctamente la magnitud del impacto como tal.

En los proyectos hidroeléctricos, como Hidroituango, uno de los principales impactos está relacionado con el suministro de agua a las comunidades locales, lo que exige considerar estos riesgos en los planes de manejo ambiental, priorizando el ordenamiento de cuencas y microcuencas para mejorar la calidad del agua, favorecer la normalización de las especies del río y promover la reactivación económica (Arias-Henao y Roca-Servat, 2022; Morales Pardo, 2022).

En general, los proyectos hidroeléctricos tienen sus principales impactos sobre la comunidad rural, la cual en algunos casos se ve desprotegida desde los planes de manejo ambiental incrementando las inequidades territoriales (Arias-Henao y Roca-Servat, 2022). Los proyectos hidroeléctricos se justifican desde la importancia de suministrar energía y estabilizar el sistema energético, la eficiencia de la tecnología (Sheraz et al., 2024), la riqueza hídrica y topográfica favorable, la transición energética (Singh Garha et al., 2022; Ullah et al., 2024), la gobernanza técnica y el desarrollo del territorio, sobreponiendo estas justificaciones al reconocimiento cultural, la priorización de distribución de las aguas, entre otros, legitimando todo lo anterior por medio de una compensación económica, lo que ha llevado a al menos 8 proyectos adicionales a los 2 mencionados anteriormente, a estar inmersos en conflictos socioambientales no previstos en la EvIA y, por consiguiente, a tener un plan de manejo ambiental insuficiente (León Montealegre y Roa-García, 2023). Tal efecto de compensación económica se observa en la mayoría de las metodologías de EvIA, las cuales suelen enfocarse en análisis de costo-beneficio monetario (Asplund y Hjerpe, 2020), dejando de lado características como los costos sociales intangibles y difíciles de monetizar (Altaf et al., 2023).

Finalmente, y brindando contexto frente a los proyectos hidroeléctricos en Colombia, el proyecto Hidroituango es uno de los más importantes en el país por su capacidad de generación de cerca de 2400 MW, aproximadamente el 17 % del total de Colombia, siendo el último construido del tipo de hidroeléctrica con embalse (Castillo de Herrera, 2020). Adicionalmente, este tipo de proyectos concentran la mayor cantidad de impactos que se puedan generar en dicha actividad (Naranjo Silva y Álvarez del Castillo, 2021; Rahman et al., 2022). Por tanto, este será el proyecto que se utilizará para el presente estudio como caso de aplicación.

3. METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizó un modelo 4D, es decir, en 4 dimensiones: multicriterio, multidecisor, multitemporal y multiespacial, de análisis de impactos para proyectos de infraestructura, el cual puede ser encontrado en el trabajo planteado por Laverde Salazar (2024). Dicho modelo se compone de 3 pasos que se describen a continuación.

Clasificación de impactos

El modelo 4D identificó 148 impactos estandarizados, extraídos del listado de impactos ambientales específicos elaborado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). Posteriormente, se llevó a cabo una homologación con los impactos reportados por el proyecto EPM Ituango (2011), en la que se reconocieron 28 impactos, de los cuales 27 fueron finalmente homologados al listado base. Se hizo la homologación identificando, de todos los impactos reportados, aquellos relacionados con hidroeléctricas y comparándolos uno a uno con los de Hidroituango, los cuales se homologaron por

similitud. Se plantea la necesidad de homologación debido a que el listado emitido por la entidad gubernamental se da varios años después de la realización de la EvIA por el proyecto y a que en el estudio previo no se consideraron los efectos aguas arriba del embalse como objeto de estudio. Los impactos planteados por el proyecto se pueden ver en la Tabla 1. Cuando se habla de homologación, se hace referencia al proceso de emparejar los impactos identificados por el proyecto con los del modelo, para que ambos sigan una misma estructura de análisis y clasificación.

Tabla 1. Impactos del proyecto Hidroituango identificados en la EvIA

Table 1. Impacts of the Hidroituango project identified in the EIA

Número	Impacto
1	Modificación de la dinámica fluvial de aguas superficiales y navegabilidad del río Cauca
2	Cambios en la calidad de las aguas del embalse
3	Contaminación de corrientes superficiales y subterráneas
4	Afectación a la disponibilidad del recurso hídrico superficial y subterráneo
5	Transformación de ambientes lóticos a lénticos
6	Contaminación del aire
7	Modificación de la calidad del suelo
8	Modificación del paisaje
9	Afectación sobre los yacimientos arqueológicos identificados
10	Muerte y desplazamiento de especies faunísticas
11	Pérdida o fragmentación del hábitat
12	Proliferación de vectores de enfermedades
13	Cambio en la abundancia de las especies que conforman la comunidad de peces en la cuenca del río Cauca
14	Cambios en la estructura del biotopo y en las comunidades bénticas
15	Cambio en la cobertura vegetal
16	Transformación de los sistemas culturales de la población afectada directa o indirectamente
17	Efectos de presión migratoria ocasionados por la presencia del proyecto
18	Desplazamiento involuntario de población
19	Generación de expectativas
20	Incremento de enfermedades ocasionadas por la presencia del proyecto
21	Aumento de la presión por los recursos naturales
22	Interrupción o afectación de la infraestructura de transporte y conectividad
23	Afectación de la prestación de servicios públicos y sociales, incluyendo su infraestructura
24	Cambio en las actividades económicas
25	Generación de empleo e incremento de los ingresos de la población
26	Cambio en la tenencia de la tierra
27	Surgimiento de organizaciones de base y fortalecimiento de organizaciones comunitarias
28	Generación de conflictos motivados por la presencia del proyecto

Fuente: elaboración propia con base en EPM Ituango (2011).

Para la categorización de los impactos, se los relacionó con las dimensiones temporal, espacial y decisor, tal como lo plantea el modelo. Para ello, la metodología Analytic Hierarchy Process (AHP) permite evaluar y analizar diferentes impactos considerando múltiples criterios y múltiples dimensiones (Saaty, 2008). De lo anterior se obtiene un total de 420 impactos categorizados, los cuales cuentan con la estructura que se puede ver en la Figura 2. Si bien se homologaron 17 impactos del proyecto, estos fueron clasificados según las dimensiones temporal, espacial y decisor, lo que generó 420 registros categorizados. Esta desagregación permite una lectura más detallada del comportamiento de cada impacto dentro del modelo 4D.

El método AHP, desarrollado por Saaty (2008), es una metodología multicriterio ampliamente utilizada para la toma de decisiones complejas, que permite descomponer un problema en jerarquías y asignar pesos relativos a distintos criterios mediante comparaciones pareadas. Su principal ventaja radica en la posibilidad de integrar juicios cualitativos y cuantitativos de múltiples actores, facilitando la priorización de variables en escenarios de incertidumbre. En este estudio, el AHP se incorpora en la dimensión multicriterio del modelo 4D, como herramienta para ponderar la importancia relativa de los impactos ambientales según los expertos y actores involucrados.

De los 420 impactos categorizados arrojados por la aplicación del modelo, todos cuentan con la misma estructura. Por ejemplo, el impacto con nombre «Cambio en actividades productivas del sector primario», el cual tiene asignado el número 107 por la metodología, queda con la categorización «Proyecto-Aguas abajo del Embalse-Construcción-107. Cambio en actividades productivas del sector primario», en donde se relacionan cada una de las dimensiones y finalmente se le asigna un código para su fácil identificación en las gráficas: en este caso el código asignado es pcc 107. Ese mismo procedimiento se debe realizar con cada uno de los impactos identificados y homologados.

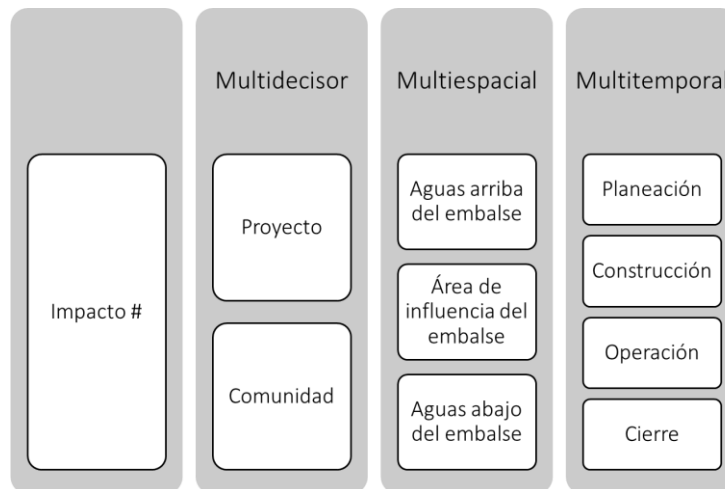


Figura 2. Proceso de categorización de los impactos en las dimensiones.

Figure 2. Process for categorizing impacts across dimensions.

Fuente: elaboración propia con base en Laverde Salazar (2024).

Identificación de la influencia de los impactos categorizados

De acuerdo con la descripción del modelo (Laverde Salazar, 2024), para esta parte del proceso se utiliza la metodología Dematel-Wings en la que se realiza un análisis matricial que permite modelar relaciones de interdependencia entre los diferentes elementos (impactos en este caso) de un sistema, usando un análisis en dos direcciones, el cual da como resultado la influencia total (o alcance) del elemento en el sistema (5) y el tipo de causalidad de dicha influencia (6). Adicionalmente, se debe considerar que esta metodología opera diferentes matrices (2). En una matriz cuadrada, C , se asignan pesos de la influencia directa de cada impacto i sobre los demás y en los elementos de la diagonal se asigna la fuerza del impacto en el sistema. Este último se determina por la cantidad de conexiones entrantes y salientes (Ding et al., 2020; Michnik, 2013). Tanto la influencia como la fuerza de los impactos categorizados se asignaron en una escala entre 0 y 4, siendo 0 nula y 4 muy alta (Laverde Salazar, 2024). A continuación, se pueden identificar las ecuaciones más importantes para el cálculo matricial y la explicación de estas.

Para una matriz X de $n \times n$, las filas se identifican con i y las columnas con j , es decir es decir X_{ij} = influencia directa del factor de la fila i en el factor de la columna j . Además, la matriz C es la matriz X normalizada (Ecuación 1). T representa la matriz de influencias totales, la cual se obtiene sumando las influencias directas e indirectas entre impactos. Estas últimas incluyen las de segundo, tercer y sucesivos órdenes, y pueden resumirse mediante la ecuación 2, que permite expresar esta acumulación de forma compacta.

$$C = \frac{X}{\text{Max}_{valor\ de\ T}} \quad (1)$$

$$T = C + C^2 + C^3 + \dots = \frac{C}{I-C} \quad (2)$$

Luego de obtener T (con términos T_{ij}) se puede calcular los vectores r_i = suma de los términos de la fila i de matriz T (Ecuación 3) y c_j = suma de los términos de la columna j de matriz T (Ecuación 4).

$$r_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

$$c_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (4)$$

Se obtiene como resultado la fuerza de las influencias dada o recibida del factor i (o j porque son iguales), representando el grado como medida de centralidad (5). Por otra parte, la relación representa el efecto neto de la contribución de un factor al sistema. Si el valor es positivo, el factor se clasifica como causal, mientras que si es negativo, se considera influenciado (6).

$$r_i + c_j \quad (5)$$

$$r_i - c_j \quad (6)$$

C es la matriz de influencias directas, T es la matriz de influencias indirectas (ver Tabla 2). De esta se deducen los valores r_i y c_j para poder calcular los 2 indicadores: influencia y tipo de causalidad,

respectivamente, de cada impacto *i*. Es importante aclarar que la Tabla 2 se encuentra resumida dado que la matriz total es de tamaño 420 x 420.

Tabla 2. Matriz T: resultado matricial de los impactos categorizados. Cifras en escala de millón.

Table 2. T Matrix: Results of categorized impacts (figures in millions)

	Proyecto-Embalse-Planeación-71. Modificación en el hábitat de las especies de	Proyecto-Embalse-Planeación-72. Reducción de la cobertura vegetal.	Proyecto-Embalse-Planeación-82. Modificación en la ocupación del territorio.	Proyecto-Embalse-Planeación-83. Cambio en la estructura demográfica.	Proyecto-Embalse-Planeación-85. Incremento de la población flotante.	⋮
Proyecto-Embalse-Planeación-71. Modificación en el hábitat de las especies de flora.	15.6081	3.9143	7.8125	0.0136	7.8131	...
Proyecto-Embalse-Planeación-72. Reducción de la cobertura vegetal.	11.7089	7.8113	11.7096	3.9115	0.0153	...
Proyecto-Embalse-Planeación-82. Modificación en la ocupación del territorio.	7.8099	7.8119	15.6095	3.9122	7.8120	...
Proyecto-Embalse-Planeación-83. Cambio en la estructura demográfica.	3.9126	3.9130	3.9137	11.7098	11.7108	...
Proyecto-Embalse-Planeación-85. Incremento de la población flotante.	7.8100	11.7101	11.7094	3.9122	3.9132	...
...

Fuente: elaboración propia.

Continuando con lo planteado en el modelo, se seleccionan los 30 impactos categorizados con mayor influencia en el sistema clasificándolos de mayor a menor influencia e identificando el tipo de causalidad que tienen. Para el presente trabajo se muestran solo 15 (ver Tabla 5), con la intención de reducir el modelo y facilitar la visualización de un conjunto representativo de resultados, aunque en la solución matricial se trabajan todos los impactos categorizados. Como lo plantea Michnik (2013), existen 2 tipos de causalidad: causal y afectado. En el primer caso, el impacto categorizado es el que afecta principalmente a los demás; por el contrario, en el segundo caso es el que se ve principalmente afectado por las relaciones con los otros impactos categorizados del sistema. De acuerdo con Laverde Salazar (2024), esto es completamente importante en términos de identificar cuál actor se está afectando, en qué área de influencia y en cuál etapa del proyecto.

Clasificación de impactos categorizados analizados con diferentes criterios

El modelo, al aplicar la dimensión multicriterio, utilizó la metodología AHP para jerarquizar los impactos categorizados según influencia, magnitud y duración, siendo estos últimos dos criterios

cualitativos evaluados con escalas predefinidas (ver Tabla 3). Los valores asignados se tomaron de la EVIA de EPM Ituango (2011), normalizando los pesos (7) y calculando la ponderación de cada criterio (Laverde Salazar, 2024). Según Saaty y Vargas (2013), los pesos pueden definirse libremente, permitiéndole al decisor establecerlos para evaluar los impactos categorizados.

Tabla 3. Criterios de evaluación para la jerarquización de impactos categorizados

Table 3. Evaluation criteria for ranking categorized impacts

Peso: 0.30	Peso: 0.09	Peso: 0.61
Influencia	Magnitud	Duración
Mayor influencia en el sistema, tomado del paso anterior.	Nulo = 0	No se presenta = 0
	Insignificante = 1	Ocasional = 1
	Moderado = 2	Temporal = 2
	Significativo = 3	Permanente = 3
	Crítico = 4	Donde: Ocasional: menor a 1 año. Temporal: entre 1 -10 años Permanente: mayor a 10 años

Fuente: elaboración propia con base en Berrío Giraldo (2014) y Francis y Bekera (2014).

Adicionalmente, para la normalización se usa la ecuación (7). En el proceso de normalización se aplican métodos que permiten estandarizar tanto los pesos asignados como los valores de los criterios evaluados, garantizando la comparabilidad entre ellos.

$$Z'_{ij} = \frac{Z_{ij} - Z_i^{min}}{Z_i^{max} - Z_i^{min}} \tag{7}$$

Según Saaty y Vargas (2013), Z'_{ij} representa el valor de la alternativa j en relación con el criterio i, Z_i^{min} , es el valor mínimo observado para el criterio i, y Z_i^{max} es el valor máximo observado para ese mismo criterio, lo que permite escalar los valores dentro de un rango normalizado entre 0 y 1.

Posteriormente, se ejecuta el cálculo que iguala las ponderaciones y los valores normalizados. Cada una de ellas, compuesta por muchos pasos que producen un valor numérico como elemento de categorización de las alternativas Saaty y Vargas (2013).

Finalmente, para la calificación definitiva (8) del AHP, $C_{AHP}(A_j)$ representa la puntuación final de la alternativa A_j , w_i es el peso asignado al criterio i, y Z'_{ij} es el valor normalizado de la alternativa j respecto al criterio i, sumando los productos ponderados de todos los criterios. Por tanto, la matriz de pagos (ver Tabla 4) queda construida de la siguiente manera.

$$C_{AHP}(A_j) = \sum_{i=1}^n w_i Z'_{ij} \tag{8}$$

Tabla 4. Matriz de pagos para la jerarquización de los impactos categorizados
 Table 4. Payoff matrix for ranking categorized impacts

	Criterios			Resultado: Decisión
	Influencia	Magnitud	Duración	
CEC 131	0.0051895	1	2	0.0488
PEC 25.	0.0051778	2	2	0.0481
CEC 148	0.0051739	2	2	0.0473
CEO 115	0.0051465	4	2	0.0449
PEP 101	0.0051465	2	1	0.0237
CEP 101	0.0051348	2	1	0.0213
PCO 119	0.005123	4	2	0.0400
PEC 108	0.0051153	4	3	0.0563
PCC 108	0.0051152	4	2	0.0384
PEC 109	0.0051113	4	2	0.0376
PEP 105	0.0050997	4	3	0.0530
PCP 112	0.0050958	3	1	0.0148
PCC 66.	0.0050958	2	3	0.0488
CEP 124	0.0050917	4	1	0.0157
CEC 101	0.0050879	2	2	0.0293
PCO 110	0.0050841	3	2	0.0302
PEO 2.	0.0050684	3	3	0.0448
CEC 100	0.0050605	2	2	0.0236
CEO 148	0.0050527	2	1	0.0041
PCC 3.	0.0050527	3	3	0.0415
PEC 111	0.0050527	3	3	0.0415
PEO 3.	0.0050489	3	3	0.0407
CCC 112	0.0050488	3	2	0.0229
CEP 119	0.005045	4	1	0.0059
PEC 41.	0.005045	3	3	0.0399
PEO 19.	0.0050449	2	3	0.0382
PCC 100	0.0050449	2	2	0.0204
PEC 39.	0.0050449	2	2	0.0204
PEC 43.	0.0050449	3	3	0.0399
PEP 134	0.005041	1	2	0.0179

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

De acuerdo con la Tabla 5, se puede identificar el ranking de los impactos categorizados de mayor influencia en el sistema. Dicha información, es importante porque permite comparar el análisis causal con el AHP, demostrando la importancia de evaluar cada impacto sobre diferentes criterios. Esta comparación demuestra lo relevante de evaluar cada impacto desde diferentes perspectivas,

dado que dependiendo de los criterios usados puede cambiar el ranking y la importancia del impacto en el sistema analizado.

Tabla 5. Ranking de los impactos categorizados por su influencia en el sistema según Dematel-Wings

Table 5. Ranking of categorized impacts based on system influence, as determined by the DEMATEL and WINGS method

Impactos categorizados	Código	Ranking	Tipo
Comunidad-Embalse-Construcción-131. Generación de conflictos relacionados con la distribución de beneficios.	CEC 131	1	Afectado
Proyecto-Embalse-Construcción-25. Aumento de la concentración de material particulado en el aire.	PEC 25.	2	Causal
Comunidad-Embalse-Construcción-148. Generación de expectativas institucionales.	CEC 148	3	Afectado
Comunidad-Embalse-Operación-115. Cambio en los sistemas productivos.	CEO 115	4	Afectado
Proyecto-Embalse-Planeación-101. Cambios en la cobertura, calidad y/o acceso a servicios de salud.	PEP 101	5	Afectado
Comunidad-Embalse-Planeación-101. Cambios en la cobertura, calidad y/o acceso a servicios de salud.	CEP 101	6	Causal
Proyecto-Cuenca Abajo del embalse-Operación-119. Disminución de la producción agrícola.	PCO 119	7	Causal
Proyecto-Embalse-Construcción-108. Cambio en actividades productivas del sector secundario.	PEC 108	8	Causal
Proyecto-Cuenca Abajo del embalse-Construcción-108. Cambio en actividades productivas del sector secundario.	PCC 108	9	Afectado
Proyecto-Embalse-Construcción-109. Cambio en la composición de la fuerza laboral local.	PEC 109	10	Afectado
Proyecto-Embalse-Planeación-105. Incremento o disminución de asentamientos no planificados.	PEP 105	11	Causal
Proyecto-Cuenca Abajo del embalse-Planeación-112. Alteración en las tendencias del empleo a corto plazo.	PCP 112	12	Causal
Proyecto-Cuenca Abajo del embalse-Construcción-66. Impacto en la salud de las poblaciones de especies acuáticas de importancia ambiental.	PCC 66.	13	Causal
Comunidad-Embalse-Planeación-124. Cambio en las actividades productivas.	CEP 124	14	Causal
Comunidad-Embalse-Construcción-101. Cambios en la cobertura, calidad y/o acceso a servicios de salud.	CEC 101	15	Causal

Fuente: elaboración propia.

Analizando en términos de influencia en el sistema, se puede observar que el impacto de mayor importancia es el «131. Generación de conflictos relacionados con la distribución de beneficios» durante la fase de construcción, en el área del embalse y relacionado a la comunidad. Este impacto es del tipo afectado, lo que señala que es la comunidad la que recibe la principal afectación por parte del proyecto, influyendo de manera directa e indirecta sobre otros impactos dentro de todo el sistema.

En segundo lugar, aparece el impacto «25. Aumento de la concentración de material particulado en el aire», de tipo causal, es decir que es generado en este caso por el proyecto, durante la construcción en el área del embalse. Esto sugiere que dicho impacto influencia mucho a otros impactos del sistema. Sin embargo, al aplicar el método AHP, este impacto pasa al quinto lugar de importancia (ver

Tabla 6), demostrando que al incluir en el análisis otros criterios diferentes a la influencia, se obtiene otro panorama que integra nuevas cuestiones que pueden afectar al sistema, tales como la magnitud del impacto y su duración.

Dicho lo anterior, y aplicando el proceso de AHP, se obtiene como resultado principal la matriz de decisión calculada con un promedio ponderado (ver Tabla 6), la cual permite jerarquizar en orden de importancia a tener en cuenta los impactos categorizados, es decir, el que se encuentra primero en el ranking es el impacto, la zona, la etapa del proyecto y el actor dentro del sistema sobre el cual se debe tener mayor control y sobre el cual se deberían enfocar los esfuerzos respecto a los planes de manejo ambiental.

Tabla 6. Matriz de decisión para el caso de Hidroitungo

Table 6. Decision matrix for the Hidroitungo case

	Criterios			Decisión	Ranking
	0.30	0.09	0.61		
Código	Influencia	Magnitud	Duración		
CEC 131	0.102	0.000	0.029	0.0488	3
PEC 25.	0.094	0.019	0.029	0.0481	5
CEC 148	0.091	0.019	0.029	0.0473	6
CEO 115	0.073	0.057	0.029	0.0449	7
PEP 101	0.073	0.019	0.000	0.0237	20
CEP 101	0.064	0.019	0.000	0.0213	23
PCO 119	0.056	0.057	0.029	0.0400	12
PEC 108	0.051	0.057	0.059	0.0563	1
PCC 108	0.051	0.057	0.029	0.0384	15
PEC 109	0.048	0.057	0.029	0.0376	17
PEP 105	0.040	0.057	0.059	0.0530	2
PCP 112	0.038	0.038	0.000	0.0148	28
PCC 66.	0.038	0.019	0.059	0.0488	4
CEP 124	0.035	0.057	0.000	0.0157	27
CEC 101	0.032	0.019	0.029	0.0293	19
PCO 110	0.030	0.038	0.029	0.0302	18
PEO 2.	0.019	0.038	0.059	0.0448	8
CEC 100	0.013	0.019	0.029	0.0236	21
CEO 148	0.008	0.019	0.000	0.0041	30
PCC 3.	0.008	0.038	0.059	0.0415	9
PEC 111	0.008	0.038	0.059	0.0415	10
PEO 3.	0.005	0.038	0.059	0.0407	11
CCC 112	0.005	0.038	0.029	0.0229	22
CEP 119	0.003	0.057	0.000	0.0059	29
PEC 41.	0.003	0.038	0.059	0.0399	13
PEO 19.	0.003	0.019	0.059	0.0382	16
PCC 100	0.003	0.019	0.029	0.0204	24
PEC 39.	0.003	0.019	0.029	0.0204	25
PEC 43.	0.003	0.038	0.059	0.0399	14
PEP 134	0.000	0.000	0.029	0.0179	26

Fuente: elaboración propia

En el estudio efectuado, centrándonos en los cuatro impactos más significativos de acuerdo con el ranking obtenido a través de la metodología AHP, sobresale en primer lugar el impacto clasificado como PEC 108: «Proyecto-Embalse-Construcción-108. Cambio en actividades productivas del sector secundario». Este efecto, categorizado como causal, tiene el lugar más elevado en la clasificación debido a su importancia en el sistema analizado y la interrelación que produce en las dimensiones espaciales, temporales y de los actores. Este efecto indica que, en el periodo de edificación del proyecto Hidroituango, se anticipan cambios importantes en las actividades económicas vinculadas al sector secundario, que comprende industrias y procesos de producción que podrían tener una relación directa o indirecta con el área de influencia del embalse. Frente al plan de manejo ambiental, este descubrimiento es crucial, dado que posibilita prever y elaborar tácticas concretas para atenuar los posibles impactos negativos en los participantes que dependen de estas actividades económicas, reduciendo el peligro de desintegración económica y promoviendo la sostenibilidad de las dinámicas de producción de la región. De acuerdo solo con el criterio de influencia (ver Tabla 5), este impacto aparecía en el noveno lugar de importancia, ganando 8 posiciones al ser evaluado con los otros criterios propuestos en el estudio.

En segundo lugar, se identificó el impacto como PEP 105: «Proyecto-Embalse-Planeación-105. Incremento o disminución de asentamientos no planificados», el cual tiene un lugar significativo en el ranking y representa un elemento crucial que requiere una gestión especial. Este efecto, vinculado a la fase de planificación del proyecto, señala que el progreso de Hidroituango podría fomentar la expansión de asentamientos no previstos en el área de influencia del embalse, lo que podría surgir debido a falsas expectativas en las comunidades locales. Tal fenómeno puede expresarse mediante un aumento desmedido de individuos en busca de oportunidades de trabajo o ventajas percibidas del proyecto, además del desplazamiento o deserción de residentes en ciertas áreas. Esta circunstancia debería dar lugar a una advertencia para las partes implicadas, dado que demanda un enfoque preventivo que incluya la administración de expectativas de la comunidad, la comunicación transparente sobre las auténticas consecuencias del proyecto y la puesta en marcha de políticas que guíen un desarrollo territorial balanceado. El presente estudio subraya la importancia de incorporar acciones de control y planificación urbana que reduzcan los potenciales efectos sociales y medioambientales relacionados. El impacto antes del proceso AHP se ubicaba en la posición 11 en términos de influencia sobre el sistema, lo cual lo lleva a ganar 9 posiciones de importancia al ser evaluado también con la magnitud y el tiempo de duración que el impacto tiene.

En tercer lugar, aparece el impacto CEC 131 «Comunidad-Embalse-Construcción-131. Generación de conflictos relacionados con la distribución de beneficios» con tipología de afectado; su análisis es importante en este punto, debido a que este actor aparece como un gran afectado dentro del sistema, es decir que recibe múltiples influencias en la red analizada, sus efectos se presentan al largo plazo y la magnitud de afectación es alta. En dicho caso, el proyecto debe incluir dentro de su plan de manejo estrategias importantes para reducir esos conflictos generados en términos de distribución de los beneficios durante la etapa de construcción en el área de influencia del embalse. Asimismo, y como se explicó previamente, este impacto es el más importante cuando se habla del criterio de influencia sobre el sistema; sin embargo, al evaluarse según los otros 2 criterios pierde dos posiciones en jerarquía. Esto demuestra la importancia de integrar más factores de análisis, dado que, si el estudio se hubiera quedado estrictamente con la métrica presentada en la Tabla 5, las acciones que se tomarían en el plan de manejo ambiental podrían no presentar los resultados esperados.

Además, en este acercamiento aparece el impacto PCC 66 «Proyecto-Aguas Abajo del embalse- Construcción-66. Impacto en la salud de las poblaciones de especies acuáticas de importancia ambiental». Es importante anotar que las estrategias de los planes de manejo no solo deben estar centradas en el área de influencia del embalse tal como se puede apreciar en este punto, en donde en cuarto lugar de prioridad aparece una afectación causada por el proyecto aguas abajo del embalse perturbando la salud de las especies acuáticas que tienen importancia ambiental, social y económica para la población y el medio ambiente.

La Figura 3 analiza la relación entre cuatro impactos clave del proyecto Hidroituango, seleccionados por ser los más influyentes en un sistema que considera tres dimensiones: espacial, actores y temporalidad.

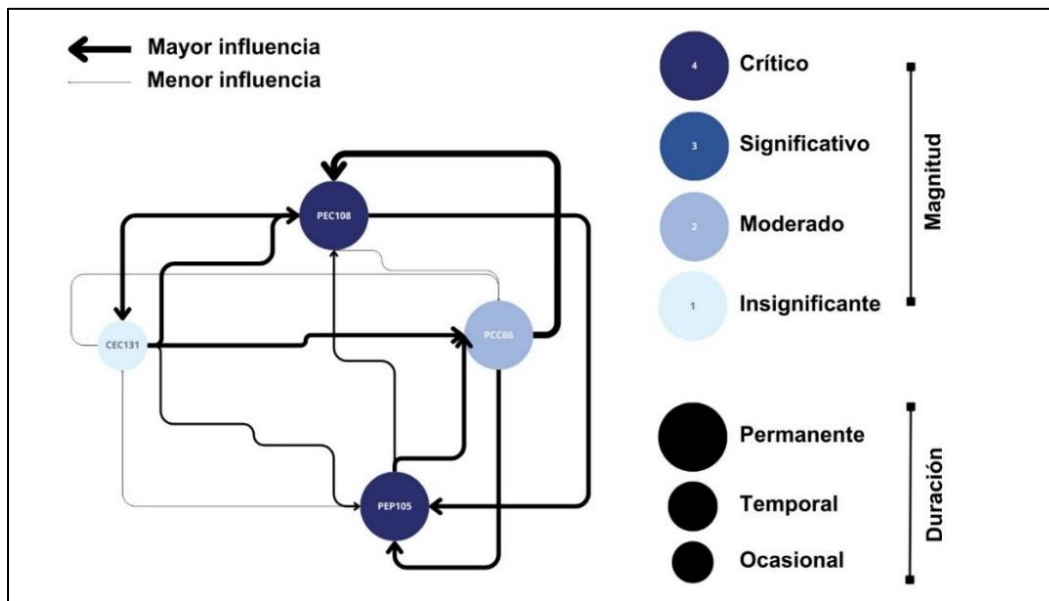


Figura 3. Red de los 4 impactos mayor ranqueados en la clasificación.

Figure 3. Network of the four highest-ranked impacts.

Fuente: elaboración propia.

Estos impactos, representados por los códigos PEC108, PEP105, PCC66 y CEC131, interactúan en diferentes magnitudes y duraciones, destacando las conexiones más significativas y el rol que cada impacto juega dentro de la red. La visualización permite identificar cómo ciertos impactos tienen una influencia predominante sobre otros, marcando una estructura jerárquica y dinámica que ilustra las interdependencias dentro del sistema.

De los cuatro impactos, PEC108 emerge como el nodo central del sistema, presentando una influencia crítica y permanente, ya que se encuentra conectado con mayor cantidad de flechas negras gruesas, lo que indica su papel dominante en la dinámica del sistema. En contraste, CEC131, con magnitud insignificante y duración ocasional, tiene una participación menos relevante, aunque no por ello prescindible. PEP105 y PCC66 ocupan posiciones intermedias, con influencias significativas y moderadas, respectivamente, y duraciones que varían entre permanente y temporal.

5. DISCUSIÓN

De acuerdo con el impacto categorizado de mayor ranking en el que se identifica el cambio en las actividades productivas del sector secundario, y tal como lo menciona en su estudio Christmann et al. (2020), los procesos económicos desde el sector productivo se basan en gran parte en el uso del suelo para un territorio específico. Se generan, por ello, conflictos cuando los actores del sistema quieren usar el suelo con una destinación diferente a la original, creando así un desfase entre oferta y demanda, un uso más limitado de los recursos y una desigualdad en la distribución de los costos y beneficios de la población. Ahora, puntualmente hablando sobre Hidroituango, la falta de participación ciudadana reflejada en los planes de manejo respecto a los usos adecuados y tradicionales del suelo ocasionó una visión opuesta entre la comunidad y el proyecto, comenzando una disputa por el uso, control y acceso de los recursos relacionados con la zona de interacción (Castillo de Herrera, 2020; Torres Sánchez, 2014). Por consiguiente, al no haber un uso claro del territorio y un aprovechamiento respecto a la extracción de materias primas, se ve afectado el sector secundario que debe conseguir dichos materiales en otras zonas más alejadas de la región (Böhm, 2020).

Por otra parte, respecto del impacto ubicado en segundo lugar sobre el incremento o la disminución de asentamientos no planificados, se encuentran 2 situaciones que no fueron tenidas en cuenta en los planes de manejo. La primera de ellas se refiere al informe preliminar que presentó el proyecto en donde informaba de la no existencia de etnias o comunidades indígenas en la región, desconociendo el cañón del río Cauca y su paisaje entre los saberes y tradiciones de la comunidad Embera Katío ubicados en el resguardo Jaidukama, que si bien no hacen parte del área de influencia directa o de inundación del proyecto, sí lo es su territorio (Cuervo López, 2018). La otra situación se refiere a la construcción de vías de acceso a la región, debido a que no siempre repercuten en el desarrollo local; por el contrario, en algunos casos incentivan la migración de la población a centros urbanos con mejores condiciones de calidad de vida (Medeiros y van der Zwet, 2020). Como lo menciona Cuervo López (2018), se debieron tener consideraciones importantes sobre las condiciones técnicas y sociales del hábitat, para que no emergiera una afectación en la comunidad que incluye principalmente temas laborales, movilización de personas especializadas de la ciudad a la región e impacto en la calidad de vida de todos los actores.

Asimismo, la distribución del agua debe considerar diferentes aspectos de la cuenca y la supervivencia de las especies de peces que son importantes en el desarrollo de la comunidad (León Montealegre y Roa-García, 2023). En este caso, se evidencia durante la fase de construcción una disminución sustancial en las poblaciones de peces, especialmente el bocachico que se presenta como base de la economía de toda la cuenca del río, afectando los ingresos de los lugareños en hasta un 80 % menos en promedio, lo que genera otros efectos como el desplazamiento sistemático a los grandes centros urbanos, inseguridad alimentaria y modificación en la cadena trófica del ecosistema (Torres Sánchez, 2014). Además, se generan efectos por el cambio en la calidad del agua durante esta misma fase de construcción, la cual es destinada para el uso agrícola y consumo humano (Arias-Henao y Roca-Servat, 2022).

Retomando cada uno de los impactos analizados, es importante acotar que, dada la relación causal entre los mismos como un sistema complejo, la existencia de uno puede generar la materialización de otros. En este escenario, resulta esencial una organización metódica y minuciosa de los planes de gestión ambiental, fundamentada en un estudio previo de los impactos que facilite la puesta en marcha de las medidas adecuadas. Para el proyecto Hidroituango, se llevó a cabo un estudio

individual de los impactos y se administraron algunos de estos. No obstante, se han materializado ciertos impactos, tanto en el corto como en el largo plazo, no solo en el área de influencia del embalse, sino también en las áreas de aguas superiores e inferiores. Estos impactos han surgido en varias fases del proyecto y han impactado a varios participantes involucrados.

Aunque este estudio se concentró únicamente en el caso de Hidroituango, es importante resaltar que el modelo 4D no corresponde a una metodología tradicional de evaluación de impacto ambiental, sino a un enfoque de análisis previo, orientado a estudiar las interrelaciones entre los impactos y sus efectos acumulativos en distintas dimensiones. Esta característica lo convierte en un aporte novedoso frente a los métodos existentes, pues permite identificar no solo los impactos más relevantes en términos de magnitud y duración, sino también aquellos que poseen una mayor influencia sobre otros, lo cual ofrece información estratégica para la estructuración de planes de manejo ambiental más completos y articulados. Si bien no se ha aplicado aún en otros proyectos, su diseño lo hace especialmente pertinente para contextos de alta complejidad, como otros proyectos hidroeléctricos en Colombia (El Quimbo, Sogamoso o Porce III), donde confluyen múltiples actores, áreas de influencia y relaciones socioambientales.

Respecto a las limitaciones, se reconoce que hasta el momento el modelo solo se ha aplicado al proyecto Hidroituango, por lo cual sería recomendable extender su aplicación a otros casos que permitan validar su alcance y robustez. Sin embargo, por las características del modelo, su mayor potencial se encuentra en proyectos de infraestructura concentrados y no lineales, como las hidroeléctricas con embalse, donde los impactos interactúan de manera más densa y compleja. La futura aplicación del modelo en estos escenarios podría ampliar el espectro de análisis, reforzar su validez externa y confirmar su utilidad como herramienta complementaria al proceso de evaluación ambiental, aportando así un insumo de gran valor para la toma de decisiones.

6. CONCLUSIONES

El establecimiento de un listado general de impactos por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia facilita una visión más integral de los posibles efectos que un proyecto puede generar. En el caso de Hidroituango, se observó que la cantidad de impactos identificados en su EsIA fue menor en comparación con lo que sugiere el modelo general. Este enfoque ampliado puede ser beneficioso para contribuir de manera efectiva a la elaboración de planes de manejo ambiental bien fundamentados.

La aplicación del modelo 4D ha permitido identificar algunas falencias en el caso de estudio. La clasificación de impactos de acuerdo con su causalidad, influencia y su jerarquización por importancia muestra una representación compleja de los impactos generados por la hidroeléctrica. Estos resultados coinciden con las discordancias documentadas en la literatura asociadas a análisis o investigación sobre Hidroituango, tales como las planteadas en el apartado de discusión.

Aunque, entre los resultados explicados no se encuentra explícitamente algún impacto categorizado que se asocie al área de influencia aguas arriba del embalse, este estudio le dio la visibilidad en el sistema y, por consiguiente, se permitió estudiar qué afectaciones directas o indirectas se pueden

encontrar en dicho espacio de la cuenca del río, esto dado a que, en la EvIA, el proyecto no incluyó dicha área en la evaluación.

Siendo consecuentes con el análisis que brinda el modelo, se identifica, por medio del indicador de tipo de causalidad, quién causa principalmente cada uno de los impactos y quién se ve directamente afectado o influenciado en el sistema de variables. Por ejemplo, en el caso de la generación de conflictos relacionados con la distribución de beneficios, se evidencia que es la comunidad la que recibe los efectos negativos en términos de la distribución de los beneficios, lo cual se ve también asociado con la pérdida de su base de sustento en el río, la distribución de los suelos y los cambios en la calidad de vida por la migración de personas especializadas hacia la región.

Como línea futura de investigación, se sugiere aplicar el modelo 4D a otros tipos de proyectos de infraestructura o fuentes de generación energética, con el fin de evaluar su adaptabilidad y alcance metodológico. Asimismo, se plantea la posibilidad de incorporar análisis de sensibilidad para explorar la robustez del modelo frente a diferentes configuraciones de criterios y actores, así como compararlo con herramientas tradicionales de evaluación ambiental en contextos diversos.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores de este documento declaran que no presentan conflictos de interés financiero, profesional o personal que pueda influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos o las interpretaciones propuestas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Para el desarrollo de este proyecto todos los autores han realizado una contribución significativa, especificada a continuación:

Juan Felipe Laverde-Salazar: autor principal, aporta en la ejecución del modelo, la alimentación de los datos y el análisis de los resultados, generando las conclusiones basadas en los hallazgos del estudio. Respecto al manuscrito, aporta redacción y estructuración del documento.

Gloria Patricia Jaramillo-Álvarez: asesoría frente al modelo, cómo aplicar correctamente cada una de las metodologías y el enfoque que se le debe dar al estudio. Respecto al manuscrito, aporta redacción, bibliografía en el componente metodológico y correcciones frente a la redacción general.

María Adelaida Torres-Sánchez: clasificación y categorización de los impactos, así como homologación de los presentados por el proyecto frente a los que plantea el modelo. Asesoría, bibliografía y redacción frente al contexto de la información, especialmente en el componente legal colombiano.

DECLARACIÓN USO HERRAMIENTAS IA

Durante la realización de esta investigación, los autores utilizaron ChatGPT para dudas en redacción y validación de correcta traducción al idioma inglés de los componentes que así lo requerían. Luego de emplear esta herramienta/servicio, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido según sea necesario y asumen total responsabilidad por el contenido de la publicación.

REFERENCIAS

- Altaf, M., Salah Alaloul, W., Musarat, M. A., y Hannan Qureshi, A. (2023). Life cycle cost analysis (LCCA) of construction projects: sustainability perspective. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12071-12118. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02579-x>
- Arias-Henao, J. D., y Roca-Servat, D. (2022). Ecología política de las hidroeléctricas. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 19. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr19.eph>
- Asplund, T., y Hjerpe, M. (2020). Project coordinators' views on climate adaptation costs and benefits—justice implications. *Local Environment*, 25(2), 114-129. <https://doi.org/10.1080/13549839.2020.1712340>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2019). *ABC del Licenciamiento*. ANLA. https://www.anla.gov.co/01_anla/tramites-y-servicios/servicios/abc-del-licenciamiento-ambiental
- Berdysheva, S., y Ikonnikova, S. (2021). The Energy Transition and Shifts in Fossil Fuel Use: The Study of International Energy Trade and Energy Security Dynamics. *Energies*, 14(17), 5396. <https://doi.org/10.3390/en14175396>
- Berrío Giraldo, L. I. (2014). *Selección y priorización de impactos ambientales de proyectos de desarrollo lineal para su posterior valoración económica – Líneas de Transmisión* - [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53860>
- Böhm, M. L. (2020). Criminal Business Relationships Between Commodity Regions and Industrialized Countries: The Hard Road From Raw Material to New Technology. *Journal of White Collar and Corporate Crime*, 1(1), 34-49. <https://doi.org/10.1177/2631309X19887681>
- Campos-Medina, F., y Noguer Aceitón, V. (2023). Construcción de nuevas territorialidades; el territorio como horizonte para la acción en la reforma energética chilena. *Revista de Geografía Norte Grande*, (85), 1-21. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022023000200101>
- Castillo de Herrera, M. (2020). Hidroituango revisitado. Contextualización y reflexiones desde un conversatorio. *Citas*, 5(1), 147-172. <https://doi.org/10.15332/24224529.6078>

- Christmann, G. B., Ibert, O., Jessen, J., y Walther, U.-J. (2020). Innovations in spatial planning as a social process – phases, actors, conflicts. *European Planning Studies*, 28(3), 496-520. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1639399>
- Chung Lau, H. (2023). Decarbonization of ASEAN's power sector: A holistic approach. *Energy Reports*, 9, 676-702. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.209>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021, 16 de marzo). *Panorama Social de América Latina 2020*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46687-panorama-social-america-latina-2020>
- Congreso de la República de Colombia. (1993, 23 de diciembre). Ley 99 de 1993. Ley general ambiental de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Congreso de la República de Colombia. (2023). Proyecto de Ley 274 de 2023. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-05-texto-conciliado-PND.pdf>
- Cuervo López, I. N. (2018). *Factores de desarrollo local en un hábitat afectado por proyectos de desarrollo hidroeléctrico: proyecto Hidroeléctrico Ituango, Antioquia, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64022>
- Ding, R.-X., Palomares, I., Wang, X., Yang, G.-R., Liu, B., Dong, Y., Herrera-Viedma, E., y Herrera, F. (2020). Large-Scale decision-making: Characterization, taxonomy, challenges and future directions from an Artificial Intelligence and applications perspective. *Information Fusion*, 59, 84-102. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.01.006>
- EPM Ituango. (2011). *Capítulo 5. Actualización Estudio de Impacto Ambiental - Evaluación Ambiental*. justiciaambientalcolombia.org. https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2018/05/d-phi-eam-eia-cap05-c0006_eval.pdf
- Francis, R., y Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004>
- Fonseca-Reyes, Á. J. (2024). Outside of conflict? Notes on the implementation of Hidroituango in Antioquia Northwestern (Colombia). *URVIO Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (38), 100-113. <https://doi.org/10.17141/urvio.38.2024.6140>
- Glasson, J., y Therivel, R. (2013). *Introduction To Environmental Impact Assessment*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315881218>
- Grisales Medina, M. F., Suárez Muñoz, J. M., y Forero González, D. R. (2021). *Análisis de impactos ambientales en proyectos de gran envergadura en Colombia acorde al estándar P5®* [Tesis de maestría, Universidad EAN]. Repositorio Universidad EAN. <http://hdl.handle.net/10882/10619>

- Henao, F., Rodríguez, Y., Viteri, J. P., y Dyner, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.099>
- Laverde Salazar, J. F. (2024). *Modelo 4D –Multicriterio/Multidecisor/Multitemporal/Multiespacial- para la evaluación de impactos en proyectos de infraestructura: Caso hidroeléctricas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86177>
- Laverde-Salazar, J. F., Torres, M. A., y Cardona Valencia, D. (2023). Análisis comparativo de la Evaluación de Impacto Ambiental, Evaluación ex ante y ex post. *Revista ION*, 36(3). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023002>
- Laverde-Salazar, J. F., Torres Sánchez, M. A., Cardona Valencia, D., y Álvarez Osorio, M. C. (2024). El papel de la tecnología e innovación en la mejora de la Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) en proyectos de infraestructura: Una revisión a los proyectos hidroeléctricos. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E65), 302-315. <https://www.risti.xyz/issues/ristie65.pdf>
- León Montealegre, V. A., y Roa-García, M. C. (2023). La justicia hídrica en los discursos sobre la asignación del agua para el sector hidroeléctrico en Colombia. *Campos En Ciencias Sociales*, 11(1). <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/campos/article/view/8123>
- Medeiros, E., y van der Zwet, A. (2020). Sustainable and Integrated Urban Planning and Governance in Metropolitan and Medium-Sized Cities. *Sustainability*, 12(15), 5976. <https://doi.org/10.3390/su12155976>
- Michnik, J. (2013). Weighted Influence Non-linear Gauge System (WINGS) – An analysis method for the systems of interrelated components. *European Journal of Operational Research*, 228(3), 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.007>
- Millard, S. (2023). Macroeconomics and Climate Change. *National Institute Economic Review*, 264, 1-7. <https://doi.org/10.1017/nie.2023.18>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Listado de impactos ambientales específicos 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Listado-de-Impactos-Ambientales-Especificos-2021-V.4.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2017). *Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental - EIA en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica*. https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos_referencia/terminos_de_referencia_eia_hidroelectricas.pdf

- Morales Pardo, H. J. (2022). *Análisis del impacto socioambiental de las hidroeléctricas El Quimbo e Hidroituango en Colombia* [trabajo de pregrado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8954>
- Naranjo Silva, S., y Álvarez del Castillo, J. (2021). An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review. *Journal of Energy Research and Reviews*, 8(1), 10-20. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v8i130201>
- Presidencia de la República de Colombia. (2015, 26 de mayo). *Decreto 1076 de 2015*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Rahman, A., Farrok, O., y Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- Robles Algarin, C., y Rodríguez Álvarez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacio*, 39(34), 10-26. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/18393410.html>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Saaty, T. L., y Vargas, L. G. (2013). *Decision Making with the Analytic Network Process*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>
- Sengupta, U., y Sengupta, U. (2022). SDG-11 and smart cities: Contradictions and overlaps between social and environmental justice research agendas. *Frontiers in Sociology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2022.995603>
- Singh Garha, N., Garcia Mira, R., y González-Laxe, F. (2022). Energy transition narratives in Spain: A case study of As Pontes. *Sustainability*, 14(18), 11177. <https://doi.org/10.3390/su141811177>
- Sheraz, M., Qin, Q., Zubair Mumtaz, M., y Hussain Khan, M. (2024). Moving toward sustainable goals 7 and 13: An inclusive mechanism to achieve environmental sustainability through digitalization and energy transition in OECD countries. *Journal of Environmental Management*, 369, 122288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122288>
- Shi, X., Gao, X., Li, R., Hou, K., Song, Y., y Lu, Z. (2025). The Impact of Electricity Grid Development on Economic Growth and Energy Consumption in Anhui Province: A Seemingly Unrelated Regression-Based Analysis. *Sustainability*, 17(7), 3193. <https://doi.org/10.3390/su17073193>
- Suárez, B., Vera Rodríguez, J. D., Botero, F., Suárez Agudelo, B. H., y Giraldo Jiménez, W. (2022). Hidroituango intake gate closure-Emergency conditions. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (104), 140-151. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210847>

Aplicación de modelo 4D para el análisis de impactos económicos, sociales y ambientales. Caso de estudio para un proyecto hidroeléctrico

Torres Sánchez, M. A. (2014). *Análisis de nuevas dinámicas territoriales por proyectos de infraestructura y su influencia en la generación de conflictos socio ambientales. Caso de estudio: Hidroituango* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47235>

Ullah, S., Niu, B., y Saeed Meo, M. (2024). Digital inclusion and environmental taxes: A dynamic duo for energy transition in green economies. *Applied Energy*, 361, 122911. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122911>

Vidal, A., y Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones. Una revisión de la literatura. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, (18), 84-122. <https://intercostos.org/ojs/index.php/riic/article/view/33>

XM. (2023). *Capacidad efectiva neta*. Paratec. <https://informeanual.xm.com.co/informe/pages/xm/21-capacidad-efectiva-neta.html>

Zubair Chishti, M., Sharif, A., Xu, Q., y Deep Sharma, G. (2024). Toward sustainable development: Revealing the dynamic impacts of the belt and road initiative on energy transition. *Sustainable Development*, 32(6), 7069-7095. <https://doi.org/10.1002/sd.3069>



SE PARTE DE
NUESTRA COMUNIDAD EN

 [Sistema de Revistas Científicas ITM](#)

 [@sistemaderevistasITM](#)

 [@sistemaderevistasITM](#)