

Un enfoque desde la sustentabilidad: análisis de ciclo de vida como herramienta para la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Colombia

An Approach to Sustainability: Life Cycle Assessment as Tool for Decision-Making in the Development of Hydroelectric Power Projects in Colombia

Leonel Alexander Martínez-Vallejo^a, Hernán G. Cortés-Mora^b,
Johann Andrés Méndez-Alcázar^c, José Ismael Peña-Reyes^{d, e}

RESUMEN

La capacidad instalada para generación de energía hidroeléctrica constituye el 69,2% de la matriz energética de Colombia, lo cual se debe a las características geográficas y a los recursos hídricos de este país. Aunque esta forma de generación es considerada renovable, las hidroeléctricas implican la construcción de presas y depósitos de agua (áreas inundadas) que, además de impactos ambientales en las comunidades, el suelo, el agua y el entorno en general, generan gases de efecto invernadero. Nuevas centrales hidroeléctricas se construirán en el país, por lo que se sugiere evaluarlas bajo una perspectiva de la sustentabilidad, entendida como la articulación de variables sociales, económicas, ambientales y culturales en búsqueda de un equilibrio a lo largo del tiempo. Se propone para esto el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como una herramienta para determinar impactos ambientales de proyectos hidroeléctricos. Este trabajo revisa cómo el enfoque de sustentabilidad puede apoyarse en herramientas ampliamente utilizadas en los proyectos de ingeniería como el ACV y el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVs) para conocer el impacto de proyectos hidroeléctricos en todas sus fases, abordando las dimensiones ambientales y sociales. La dimensión económica no se tuvo en cuenta, abriendo el camino para nuevos aportes. Se concluye que existe la necesidad de iniciar la construcción de una línea base de información para aplicar herramientas como el ACV y el ACVs, orientada a la sustentabilidad para proyectos de hidroeléctricas, tanto para los que se encuentren en planeación, como los que operan actualmente. Se sugieren aspectos para tener en cuenta en la toma de decisiones con el fin de contribuir a la sustentabilidad para futuros proyectos.

PALABRAS CLAVE: sustentabilidad; generación hidroeléctrica; Análisis de Ciclo de Vida (ACV); Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVs); represas.

ABSTRACT

In Colombia, hydroelectric power generation constitutes 69,2% of the energy mix due to the geographical characteristics and water resources available in this country. Although this form of generation is considered renewable, hydroelectric plants involve the construction of dams and water reservoirs (flooded areas), which cause soil, water, ecological and social impacts in general, and generate greenhouse gases. The construction of new hydroelectric plants is being projected in Colombia, so it is necessary to adopt a sustainability perspective which articulates social, economic, ecological and cultural variables, seeking a long-lasting balance. The Life Cycle Assessment (LCA) is proposed as an ideal tool to determine the environmental impacts of hydroelectric projects. This paper reviews how the sustainability approach can be based on widely used tools in engineering projects, such as the Life Cycle Assessment (LCA) and the Social Life Cycle Assessment (S-LCA). The goal is to recognize the environmental impacts of hydroelectric projects, addressing the assessment of environmental and social dimensions. The economic dimension was not included, thus opening the way to new contributions. As a conclusion, there is a need to build a baseline information on hydroelectric projects to apply tools like LCA and S-LCA, with sustainability guidelines, including projects in the planning phase and those currently in operation. Finally, relevant aspects for decision-making are suggested to contribute to the sustainability of future projects.

KEY WORDS: Sustainability, hydropower generation; Life Cycle Assessment (LCA); Social Life Cycle Assessment (SLCA); Dam.

a Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación de Calidad del Aire (GICA) y Grupo de investigación en Tecnologías e Innovación para el Desarrollo Comunitario (GITIDC). Bogotá, Colombia. ORCID Martínez-Vallejo, L.: 0000-0002-7305-630X

b Universidad Nacional de Colombia, Dirección Nacional de Extensión, Innovación y Propiedad Intelectual; Coordinación del Programa Ingeniería Sustentable (PINSUS); Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial; Grupo de Investigación en Tecnologías e Innovación para el Desarrollo Comunitario (GITIDC). Bogotá, Colombia. ORCID Cortés-Mora, H.G.: 0000-0001-8541-5245

c Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Ambiental; Grupo de Investigación en Calidad del aire (GICA); Programa de Ingeniería Sustentable (PINSUS). Bogotá, Colombia. ORCID Mendez-Alcazar, J.A.: 0000-0002-9947-6433

d Universidad Nacional de Colombia, Dirección Nacional de Extensión, Innovación y Propiedad Intelectual; Facultad de Ingeniería; Grupo de Investigación en Tecnologías e Innovación para el Desarrollo Comunitario (GITIDC). Bogotá, Colombia. ORCID Peña-Reyes, J.I.: 0000-0003-2582-3903

e Autor de correspondencia: jipenar@unal.edu.co

Recepción: 02 de marzo de 2020. Aprobación: 31 de mayo de 2021. Publicación: 02 de septiembre de 2021



Introducción

A los proyectos de generación eléctrica se les atribuyen beneficios como el empleo y el acceso a energía, el crecimiento económico, el avance de la industria y el mejoramiento en el acceso a la tecnología. Sin embargo, de acuerdo con Torres *et al.* (2014) se dejan de lado los innumerables impactos socioambientales que generan y se subestima la magnitud de la afectación, lo cual es cuestionable y pone en duda que los beneficios reales compensen las afectaciones negativas. Estos impactos varían según la fase, ya sea en la construcción, la operación o el desmantelamiento.

En general las represas se construyen para diversos fines. Su función principal es la generación de energía hidroeléctrica, pero también se incluyen el suministro de agua potable, el riego, el control de inundaciones y la recreación. En Colombia cerca del 70% de la generación eléctrica se realiza por medio de centrales hidroeléctricas (Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, 2018). Para finales de 2019 se tenía conocimiento de tres proyectos hidráulicos que ya contaban con sus diseños definitivos y un cronograma de construcción establecido, y 27 proyectos de hidroeléctricas en fase de factibilidad (UPME, 2019). Esto ratifica la intención de continuar con este mecanismo como la principal forma de producción de energía eléctrica en el país.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad, para llevar a cabo cualquier tipo de obra deberían considerarse variables sociales, económicas, ambientales y culturales en búsqueda de un equilibrio que se mantenga en el tiempo (Cortés-Mora, 2018). Esto a partir de una adecuada planeación que permita conocer los posibles impactos antes de su ejecución y los impactos latentes después de cumplida la vida útil de la estructura (Stamford, 2020).

Por lo anterior, se considera necesario adoptar herramientas durante el proceso de licenciamiento ambiental que permitan hacer una evaluación de los impactos sociales, económicos, ambientales y culturales siguiendo la perspectiva de la sustentabilidad, proponiendo para este marco el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVs), ampliamente utilizados en la ingeniería. Para esto, el artículo aborda el enfoque de sustentabilidad, los aspectos ambientales y sociales de los

proyectos hidroeléctricos, y cierra con la discusión del ACV y del ACVs enfocados en las fases de construcción, operación y desmantelamiento, junto con las recomendaciones y conclusiones.

Enfoque de sustentabilidad

El mundo no sustentable

El mundo no sustentable como consecuencia de la crisis del conocimiento, evidenciada en la crisis ambiental de las décadas de 1960 y 1970, define el surgimiento de un saber ambiental que cuestiona el modelo de racionalidad de la modernidad (Leff, 2011). Este saber indaga las dimensiones urbanas, técnicas, burocráticas, industriales, capitalistas e individualistas del desarrollo concebido por el norte global.

De acuerdo con Morin (2011), el desarrollo como se ha concebido ha sometido, destruido o manipulado todo lo vivo en la naturaleza, incluyendo el ser humano, el aire y el agua, convirtiéndolos en mercancías. Esto pone en peligro la biosfera al darle la espalda a la degradación creada. De hecho, Herrera *et al.* (2004) indican que es sorprendente cómo organizaciones financieras, incluso el Banco Mundial, caracterizan como un ascenso triunfal esta vía de desarrollo que ha sido determinada como insustentable por cerca de 100 líderes participantes en la Cumbre de Río de Janeiro.

Esta situación alerta sobre la forma como el mundo se está preparando para sobrellevar la crisis ambiental; en particular, cómo se están preparando las futuras generaciones para vivir y desarrollarse profesionalmente en este contexto. De allí emerge el concepto de sustentabilidad como enfoque paradigmático que permite enfrentar la crisis ambiental actual.

Sustentabilidad

De acuerdo con Cortés-Mora (2018), el concepto de sustentabilidad debe tener una perspectiva de futuro sin desconocer la historia que ha generado la crisis actual, por lo tanto, debe reconocer y pugnar por resarcir los daños causados, así como tener un enfoque transformador. En este sentido, este autor propone la siguiente definición:

La sustentabilidad es una propiedad que posee un agente (sea un individuo, un colectivo, un humano o un no humano) y que está situada en un tiempo y un espacio concreto, para atender sus necesidades y las de la comunidad de vida que le acompaña, a la vez que busca minimizar y revertir los impactos negativos producidos por el desarrollo humano, generando las condiciones para que las necesidades de las generaciones futuras sean cubiertas, mejorando la condición humana en un futuro ecológicamente sano y habitable. Incorpora aspectos subjetivos y objetivos determinados por la interacción con las propiedades de su entorno, articulando las variables sociales, económicas, ambientales y culturales en búsqueda de un equilibrio entre éstas para que se mantengan a lo largo del tiempo (Cortés-Mora, 2018, p. 63).

Hidroeléctricas y sustentabilidad

La toma de decisiones sobre las cuestiones de proyectos hidroeléctricos es de vital importancia para garantizar el acceso a energía eléctrica en Colombia. Las centrales hidroeléctricas son una fuente de energía considerada renovable y el país posee una condición topográfica que favorece este tipo de generación (Amaya y Guzmán, 2016). No obstante, es necesario revisar los elementos asociados con su sustentabilidad.

Hasta hace poco, la evaluación del impacto ambiental de los proyectos de grandes represas no se reconocía por completo debido a la incertidumbre del problema. Sin embargo, Fearnside (2014), Premalatha *et al.* (2014) y Yang (2016) han señalado que la construcción de presas genera conflictos que son típicamente multidimensionales, complejos y dinámicos, subrayando cómo la medición (con una visión holística) de la sostenibilidad de este tipo de proyectos de infraestructura es de gran importancia para los responsables de la toma de decisiones al momento de implementar una política energética sostenible y sustentable en naciones donde son viables.

De acuerdo con esta complejidad, para empezar a construir una vía hacia la sustentabilidad es necesario estimar la mayoría de los impactos ambientales y sociales que se generan en todo el ciclo de vida de los proyectos hidroeléctricos. Este aspecto es abordado a continuación a través del Análisis de Ciclo de Vida y Análisis de Ciclo de Vida social.

Aspectos ambientales de los proyectos hidroeléctricos

Los aspectos ambientales involucrados en la construcción de presas y que pueden ocasionar impactos son una lista extensa en cada una de las etapas de construcción, operación o desmantelamiento. En cada caso se deben tener en cuenta las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas y ambientales presentes en la cuenca hidrográfica, así como los esquemas constructivos y operativos de ingeniería (Osorio, 2018; Yuguda *et al.*, 2020).

Una presa que crea un reservorio o que desvía agua hacia una central hidroeléctrica puede obstruir la migración de peces y cambiar la temperatura natural del agua, sus condiciones químicas, las características del flujo del río y las cargas de sedimentos. Todos estos cambios pueden afectar la ecología y las características físicas de un río, además de tener efectos negativos en el cambio de uso del suelo, las plantas nativas y los animales dentro y alrededor de él. También, los embalses pueden cubrir áreas naturales importantes, tierras agrícolas o sitios arqueológicos (Arantes *et al.*, 2019; United States Energy Information Administration, 2019; Wu *et al.*, 2019).

Además de estos impactos de diversa índole y magnitud, en el siglo XXI se considera que el cambio climático es el problema más importante para el planeta, por esta razón es de relevancia detallar el impacto de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provocadas en la producción de energía de origen hidráulico y definir los elementos del análisis de ciclo de vida que incorporan los aspectos ambientales de los proyectos hidroeléctricos.

Emisiones de GEI: contribución al cambio climático

La ONU (2019) en su último informe sobre ciencia climática, enfatiza la forma en que las obras de infraestructura en el mundo demandan recursos que son transformados en productos. Estos procesos, de forma directa o indirecta, ocasionan emisiones de CO₂ a la atmósfera, siendo éste el principal gas de efecto invernadero causante del aumento acelerado de temperatura en el planeta, también denominado cambio climático y recientemente crisis climática.

En la última década se ha visto un enfoque creciente en los problemas relacionados con el cambio

climático, dado que este ejerce una presión adicional sobre la tierra y su capacidad para apoyar y suministrar alimentos, agua, salud y bienestar. La ONU (2019) ha identificado como impulsores del cambio climático a la agricultura, la producción de alimentos y la deforestación, lo que ha provocado que los gobiernos internacionales desarrollen leyes y políticas ambientales para las industrias intensivas en energía que pueden ayudar a reducir sus emisiones antropogénicas de GEI.

Kemenes *et al.* (2011) encontraron que las presas hidroeléctricas pueden liberar cantidades significativas de GEI a partir de un estudio en Balbina, Brasil. De igual forma, Barros *et al.* (2011) y Delsontro *et al.* (2010) hallaron que las represas tropicales emiten más GEI que en otras latitudes, como Suiza. Por su parte, Song *et al.* (2018) estimaron las emisiones para presas ubicadas en regiones boreales y templadas en 3 a 70 g CO₂ eq/kWh, en comparación con las de regiones tropicales que varían de 8 a 6.647 g CO₂ eq/kWh. Estos estudios consideraron evaluaciones de ciclo de vida en sus metodologías.

Las emisiones se generan principalmente en las etapas de construcción y mantenimiento de represas de ríos a pequeña escala, mientras que la descomposición de la biomasa inundada y la materia orgánica en el sedimento tiene la mayor contribución de emisiones de GEI en las represas de gran escala. Song *et al.* (2018) indican que, aunque la mayoría de las hidroeléctricas tienen emisiones de GEI comparables con otros tipos de energía renovable (energía solar, eólica), la electricidad producida en represas de regiones tropicales podría tener una tasa de emisión más alta que la electricidad basada en fósiles. Bajo este escenario, las emisiones de GEI constituyen un elemento fundamental en el análisis de los proyectos hidroeléctricos.

El análisis de ciclo de vida (ACV)

Las medidas de uso común para el manejo de impactos ambientales están dominadas principalmente por la evaluación de impacto ambiental, la evaluación de riesgos y el análisis de costo-beneficio. Sin embargo, es necesario encontrar mejores formas de planificar, construir y operar represas y reducir sus impactos negativos sobre el medio ambiente y la sociedad (Chen *et al.*, 2016). El ACV es

una de las nuevas técnicas con amplia aplicación en el campo de la generación de energía y la construcción de presas.

El ACV se ha convertido en una herramienta común de apoyo a la toma de decisiones, tanto para los responsables políticos como para la industria, al evaluar los impactos de un producto o proceso. Muchas organizaciones y empresas se están moviendo en la dirección de “responsabilidad del ciclo de vida” con la noción de que una organización o empresa es responsable de los impactos ambientales generales de sus productos (McIntosh y Pontius, 2017). La técnica de ACV se destaca por la naturaleza amplia de su enfoque, sistemática en su esencia, y el grado de profundización de las interacciones entre los sistemas humanos y el medio ambiente (Seo y Kulay, 2006).

Definición del ACV

Actualmente, la metodología ACV está estandarizada internacionalmente en las ISO 14040: 2006 e ISO 14044: 2006. Se define como una recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida, desde su adquisición a partir de recursos naturales hasta su disposición final (ICONTEC, 2007; Rathore *et al.*, 2013). También, el ACV es entendido como una herramienta de evaluación utilizada para valorar el impacto del ciclo de vida y la utilización de recursos de un producto, un proceso o una actividad (Khang *et al.*, 2017).

Hay cuatro procedimientos que componen el ACV, definidos por el ICONTEC (2007):

- 1) La definición del objetivo y el alcance (incluida la unidad funcional, ej.: 1 kg de cemento o 1 kWh).
- 2) El análisis de inventario del ciclo de vida (ICV).
- 3) La evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).
- 4) La interpretación.

En la Figura 1 se presentan las cuatro partes fundamentales del ACV y los aspectos relacionados en cada una de ellas.

Los propósitos del ACV, de acuerdo con Roy *et al.* (2009), pueden ser: (1) la comparación de productos,

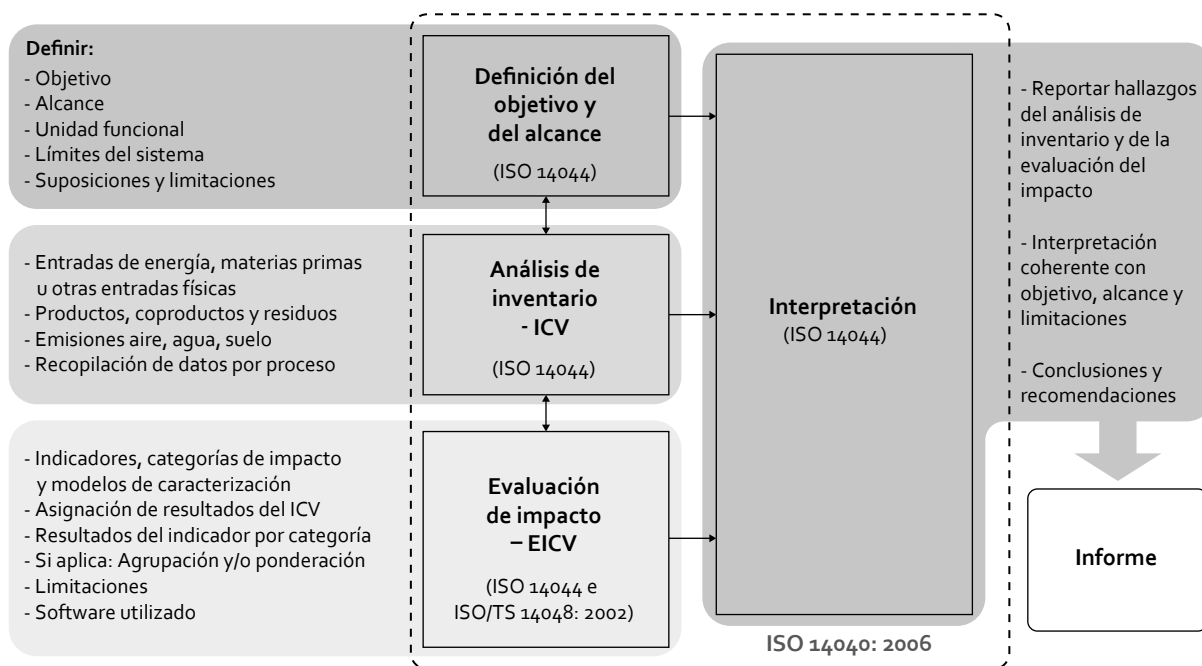


Figura 1. Etapas de un análisis de ciclo de vida y aspectos relacionados. *Fuente:* elaboración propia a partir de la ISO 14040

procesos o servicios alternativos; (2) la comparación de ciclos de vida alternativos para un determinado producto o servicio; o (3) la identificación de partes del ciclo de vida donde se pueden hacer las mayores mejoras. La aplicación de cada uno de estos propósitos puede ayudar a identificar y posiblemente reducir los impactos ambientales producidos por las hidroeléctricas.

En el ACV existen diferentes categorías de impacto ambiental. Algunos métodos pueden reportar hasta dieciséis (16) diferentes. Los indicadores o categorías de impacto incluyen principalmente los siguientes once (11):

1. Cambio climático
2. Calidad del ecosistema
3. Salud humana
4. Acidificación
5. Eutrofización
6. Smog Fotoquímico
7. Agotamiento de fósiles
8. Agotamiento de ozono
9. Toxicidad humana

10. Uso de suelo
11. Consumo de agua/agotamiento de agua

Se propone que un ACV de una hidroeléctrica, embalse o represa debe considerar los alcances, las etapas y límite de sistema que se muestran en la Figura 2.

Aspectos sociales de proyectos hidroeléctricos

Torres *et al.* (2014) reflexionan sobre las implicaciones en un territorio de los proyectos hidroeléctricos, subrayando la relevancia de:

La intervención del agua, eje articulador de las actividades económicas, culturales y sociales de las comunidades locales, durante la construcción del proyecto, y en particular su operación, dado que supone la ruptura de la principal relación que articula la vida de las comunidades, interrumpiendo de forma definitiva las redes sociales y económicas desarrolladas de forma ancestral en cada zona donde las comunidades se han adaptado a las agrestes condiciones ambientales (p. 77).

Por tanto, la definición y aspectos clave de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida – social aporta

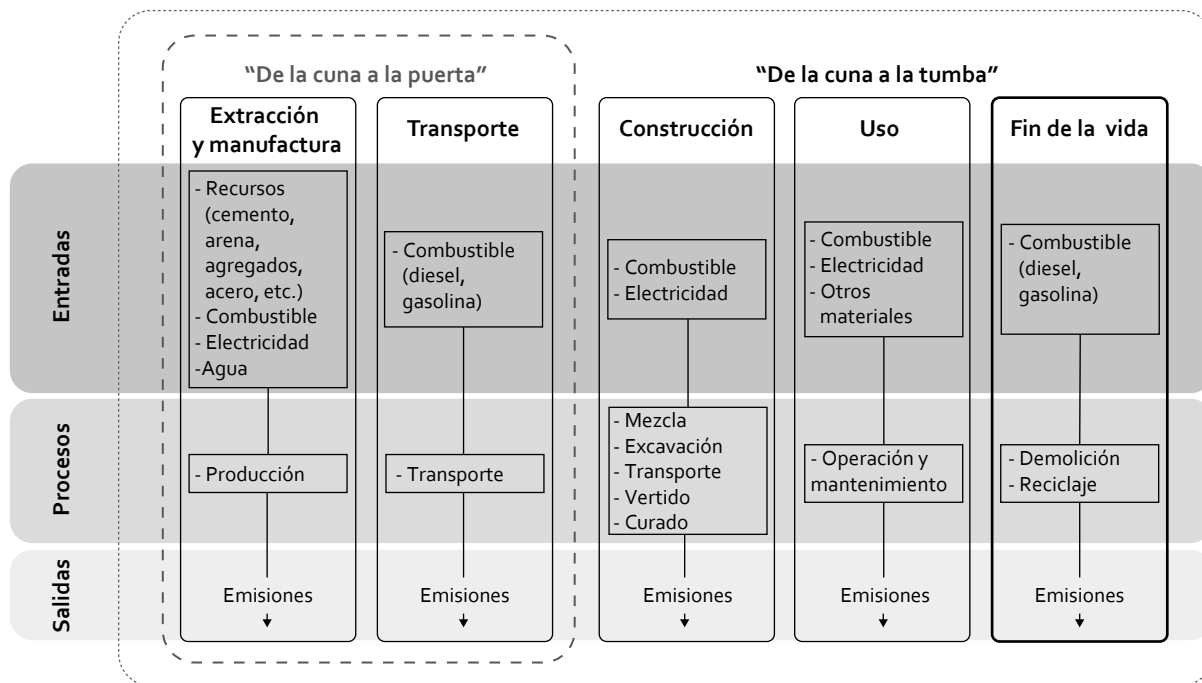


Figura 2. Límites del sistema de la cuna a la tumba y de la cuna a la puerta en la evaluación del ciclo de vida de la construcción de hidroeléctricas. Fuente: elaboración propia a partir de Liu (2013) y Stamford (2020).

los elementos necesarios para determinar los impactos sociales de un proyecto.

El Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVs)

Definición

El *United Nations Environment Programme* (UNEP) y la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) (2009) han definido que el ACVs o el S-LCA (*Social Life Cycle Assessment*),

evalúa los impactos sociales y socioeconómicos encontrados a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o actividad en aspectos que pueden afectar directamente a las partes interesadas positiva o negativamente y que pueden estar vinculados a los comportamientos de las empresas o a los procesos o impactos en el capital social, por ejemplo, los derechos humanos, las condiciones laborales, la salud y la seguridad, las repercusiones socioeconómicas (p. 37).

Se debe decir que esta metodología está parcialmente enfocada en el campo de la Responsabilidad Social Corporativa y, por tanto, está más centrada en los comportamientos de las empresas (Zamagni *et al.*, 2013).

Según señala Toniolo *et al.* (2020), el ACVs se describe presentando las cuatro fases sugeridas por las directrices de UNEP SETAC, publicadas en 2009, las cuales han sido extraídas por Wu *et al.* (2014) como: (1) la definición de bienestar humano; (2) la selección de indicadores sociales para ACVs; (3) la preferencia de datos específicos del sitio o datos genéricos; y (4) el método para cuantificar los impactos sociales.

Existen numerosas metodologías en la literatura de ACVs. Durante la última década, la mayoría de los debates se han centrado en las categorías y medidas de los impactos. La Figura 3 muestra cinco categorías simplificadas de partes interesadas en el sistema de producción: el trabajador, el consumidor, la comunidad local, la sociedad y los actores de la cadena de valor – de acuerdo con la directriz del UNEP y SETAC (2009).

ACV de hidroeléctricas

Existen centenares de estudios del ACV proyectos hidroeléctricos en el mundo (Kadiyala *et al.* 2016; Turconi *et al.*, 2013). En general, estos difieren en sus alcances, métodos de impacto ambiental

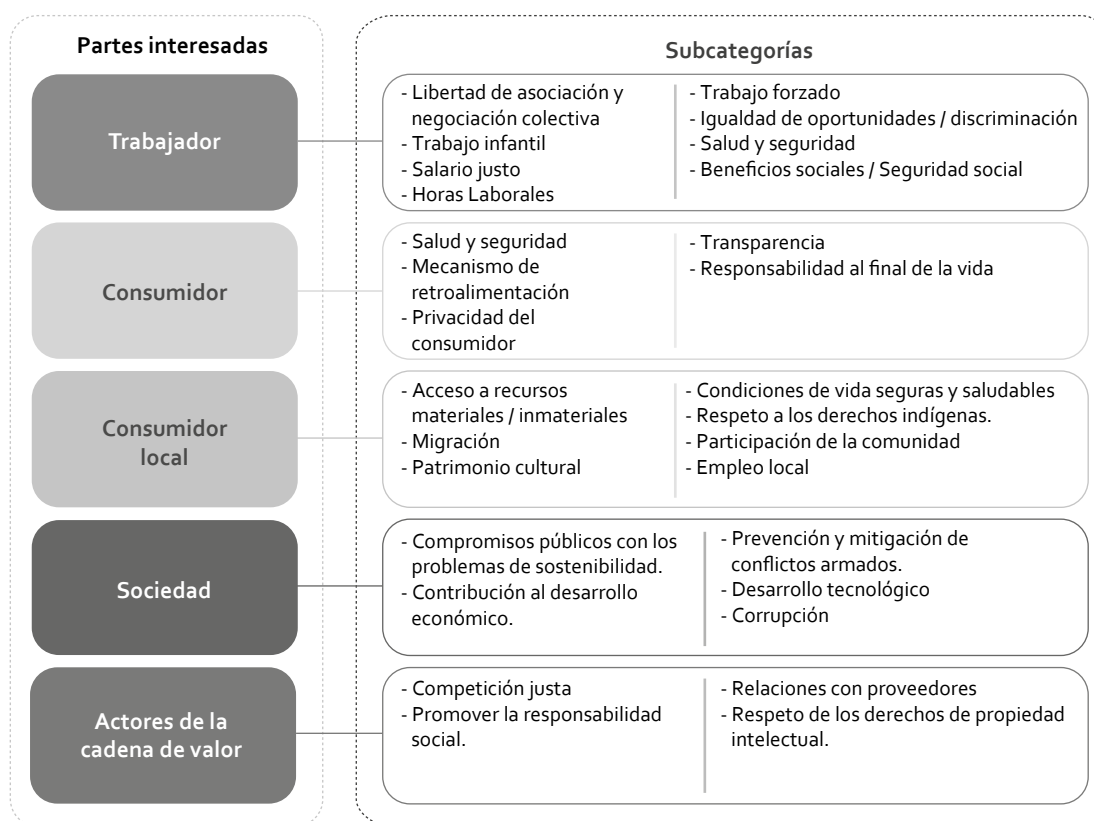


Figura 3. Cinco categorías simplificadas de partes interesadas en un sistema de producción de acuerdo con la directriz del PNUMA para un ACVs. *Fuente:* elaboración propia a partir de Wu *et al.* (2014).

Tabla 1. Métodos y categorías de impacto reportadas en ACV de hidroeléctricas

Autor	Software/método /información	Unidad funcional (UF)/ categorías de impacto*
Wang <i>et al.</i> (2019)	CML 2001/ SimaPro	UF= 1 kWh CC, AP, POCP, EP
Noh <i>et al.</i> (2018)	IPCC, 2007	UF= 1 kWh
Verán y Vázquez (2017)	- Simapro v8.3 - Planos de infraestructura - Ecoinvent® versión 3.3	UF= 1 kWh CC, FP, FO, PA, ACO, Uso de suelo, EP, RI
Pascale <i>et al.</i> (2011)	GaBi 4 / CML 2001	UF = 1 MWh CC, AP, EP, ACO, DE
Ribeiro y Silva (2010)	Datos primarios (información de Brasil)	UF = 1 MWh - Consumo de recursos - Consumo de recursos energéticos - Emisiones de PM, SO _x y NO _x
Gagnon y van de Vate (1997)	Base de datos nacionales por país	UF= 1 kWh

*Calentamiento global (CC), acidificación (AP), ozono fotoquímico (POCP), eutrofización (EP), formación de material particulado (FP), formación de oxidantes fotoquímicos (FOT), agotamiento de la capa de ozono (ACO), radiación ionizante (RI), demanda de energía (DE), material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x).

Fuente: elaboración propia a partir de autores reportados.

y categorías de impacto. Respecto a esta última, la más reportada es el cambio climático. En la Tabla 1 se presentan los métodos y las categorías de impacto de algunos estudios de los últimos años. La

unidad funcional utilizada generalmente para centrales de generación eléctrica es “1 MWh o kWh de electricidad”. Los autores mencionados en la Tabla 1 abordan cada uno de los cuatro procedimientos que

componen el ACV y permiten establecer que la unidad funcional solo difiere en presentación (unidades de energía). Por el contrario, los métodos, categorías y *software* muestran variedad en los reportes, indicando un marco sombrilla amplio para su aplicación.

A partir de estos estudios se han identificado los impactos ambientales y sociales durante el ciclo de vida de los proyectos hidroeléctricos, en sus fases de construcción, operación y desmantelamiento. A continuación se discuten las evidencias encontradas en estos análisis.

Discusión

La evaluación de la sustentabilidad debe abarcar las cuatro dimensiones (ambiental, económica, social y cultural), utilizando una perspectiva del ciclo de vida. En ese sentido, se espera que las evaluaciones de ciclo de vida como el ACVs consideren aspectos de comportamiento, como el efecto rebote y los aspectos culturales (Pizzirani *et al.*, 2014). El efecto rebote debe tenerse en cuenta en las metodologías de análisis porque ayuda a incluir en el cálculo de impactos los beneficios o las desventajas; por ejemplo, con el reciclaje de materiales es posible que se reduzca el impacto en alguna de las categorías en estudio. Los aspectos culturales denotan los rasgos característicos de habitabilidad y transformación del entorno biofísico en cada lugar, esenciales en el contexto colombiano dada su diversidad. Siguiendo este marco, construir la tecnología y la infraestructura de la hidroeléctrica no es suficiente, siendo necesaria la definición de un entorno habilitador completo a su alrededor, como señalan Sovacool *et al.* (2011).

Bajo este marco, la sustentabilidad representa claramente un enfoque de decisión de criterios múltiples, y el ACV como metodología permite un análisis para llevar a cabo proyectos hidroeléctricos. El aporte realizado en este caso es al conocimiento de la sustentabilidad con la aplicación del ACV en la evaluación de impactos sociales y ambientales.

ACV como herramienta de apoyo a la decisión en proyectos hidroeléctricos

Una evaluación de los impactos ambientales será perspicaz y coherente solo si se consideran todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto. Siguiendo a

Silva (2003), esto se obtiene mediante la aplicación de un enfoque en el ejercicio de análisis de la función del producto, para este caso la hidroeléctrica o energía producida. Una vez realizada una búsqueda en bases de datos académicas (como Scopus, Springer y Science Direct) con las palabras clave *hydroelectric energy, dam, Colombia, life cycle assessment, LCA, hydroelectric power plant*, no se encontraron investigaciones de ACV de hidroeléctricas o presas para el país, por lo que la discusión de las fases generales de estos proyectos se realiza con base en experiencias internacionales.

Fase de construcción

Carrington (2000) subraya que la construcción de una hidroeléctrica requiere de una gran área de tierra y una alta demanda de recursos y productos, haciéndose necesario considerar de forma holística los ciclos de vida de los materiales de construcción, las emisiones de los movimientos de tierra, las emisiones de GEI de las áreas inundadas, las cargas ambientales de las obras civiles y la dinámica de los ecosistemas que será interrumpida, lo que permitiría buscar una solución para desarrollar proyectos sustentables. En este punto, es pertinente mencionar que un insumo requerido en grandes cantidades para este tipo de obras es el cemento, el segundo mayor emisor industrial de dióxido de carbono, el cual es responsable del 7% de las emisiones mundiales en 2015 (aproximadamente 2,2 Gt CO₂).

Noh *et al.* (2018) y Wang *et al.* (2019) señalan la prioridad de considerar la sustentabilidad en todas las actividades humanas, por eso la gestión de emisiones al aire, agua o suelo deben incluir el análisis de ciclo de vida ya que se requieren recursos considerables y se emiten contaminantes, incluido el CO₂. Adoptar un enfoque para la sustentabilidad garantiza que sus variables se tengan en cuenta durante toda la evaluación de un sistema considerado (UNEP y SETAC, 2009; Perdan, 2010).

Adicionalmente, Wang *et al.* (2019) incluyen en el análisis el movimiento de vehículos para el transporte de materiales y trabajadores durante las fases de excavación y construcción, que contribuye a la emisión de GEI por el consumo de combustibles fósiles, a lo que se suma la perturbación de corredores ecológicos, la emisión de material particulado y el

ruido para comunidades locales cuando se requiere construir vías.

Fase de operación

A esta etapa se le atribuyen la acumulación de sedimentos (Grant, 2003) y la generación de metano (Boyle, 2004). En el informe de la Comisión Mundial de represas de inicios del milenio (World Commission of Dams, 2000), se establece que la descomposición de la materia vegetal en condiciones anaeróbicas produce metano (CH₄) cuando la tierra se inunda. En este sentido, podría pensarse que la etapa de acumulación de agua podría tener su propio ciclo de vida y por tanto amerita un ACV individual donde se descarten o establezcan los verdaderos flujos de emisiones al ambiente.

Otros impactos asociados a esta etapa son las barreras para la migración de peces, la fertilidad de los suelos aguas abajo por la retención de sedimentos en la represa, el cambio climático local, el impacto en la biodiversidad y la sismicidad inducida por los grandes depósitos que pueden causar este tipo de eventos durante el llenado (Gleick *et al.*, 2009; Gibson y Sandiford, 2013). A estos se suman la pérdida de bosques y la propagación de enfermedades por el aumento de vectores portadores de enfermedades; por ejemplo, mosquitos para el caso de la malaria en la represa Gigel-Gibe en Etiopía (Yewhalaw, 2009).

Scherer y Pfister (2016) sugieren tener en cuenta la propuesta de académicos e instituciones de proponer mecanismos para utilizar el metano que se produce en las represas, dado que la emisión de GEI de alrededor del 10% de las instalaciones hidroeléctricas por unidad de energía (1 kW o 1 MW) es similar a la generada por las centrales eléctricas convencionales alimentadas por combustibles fósiles. Es vital que el proyecto en estudio considere en esta etapa todas las opciones posibles de impacto ambiental y que de forma estricta sea evaluado por un grupo multidisciplinar con experiencia en la materia.

Fase de desmantelamiento

El desmantelamiento de las represas debería comprender la restauración del ecosistema al punto más cercano posible a su funcionalidad natural; sin embargo, se pueden observar algunos efectos

negativos en el corto plazo, como la movilización de sedimentos, el material contaminado y la amenaza de sobresaturación (Bednarek, 2001). Adicionalmente, se deberían tener en cuenta las emisiones de GEI en el caso de utilizar maquinaria pesada.

En Colombia no se han desmantelado represas, pero una operación de esa magnitud debería considerarse urgentemente por la complejidad que implica. La demolición es un ejercicio que lamentablemente se aprende en la práctica; sin embargo, en algunos casos, se puede decidir la eliminación parcial de la presa en lugar de la eliminación total. Por tal motivo, antes de cualquier intervención, los encargados del desmantelamiento y su vigilancia deben determinar con estudios específicos si desmantelan, modifican o rediseñan las estructuras que por periodos prolongados de tiempo han generado cambios en las dinámicas sociales y ambientales. Los estudios propios para cada proyecto de desmantelamiento pueden realizarse dando también una mirada crítica a las experiencias internacionales, dado que cada represa tiene características particulares y entornos diferentes.

Como referencia se pueden estudiar los desmantelamientos de países europeos como España, que al migrar a energías renovables ha llevado varios a cabo. También el de la presa de Vezins (Francia) de 36 metros de altura, que es el desarme de presas más grande de ese continente hasta 2019. Los lineamientos de la United States Society on Dams (2015) (USSD, por sus siglas en inglés), plasmados en las *Guidelines for Dam Decommissioning Projects*, pueden aportar conocimiento relacionado. Este documento aborda el desmantelamiento desde el estado estructural de la presa, los costos, los impactos ambientales, el monitoreo y la mitigación, hasta 18 casos de estudio ubicados en los Estados Unidos.

Dentro de los límites del sistema de un ACV completo, esta etapa podría contribuir a disminuir el impacto sobre el cambio climático, el consumo de agua y el agotamiento de elementos naturales, si se realiza un reciclaje de materiales aplicando modelos de economía circular. Ejemplo de esto son los residuos de construcción y demolición (RCD) que al reciclarse como agregados o subbases para otros proyectos disminuirían el impacto en emisiones de

CO₂, consumo de agua y extracción de minerales si tuvieran que fabricarse desde cero. La circularidad de los materiales aplica también para elementos como el acero, que se utiliza en grandes cantidades en la construcción de algunas presas.

Recomendaciones para el ACV en todas las fases

Cuando se utilice el ACV se debe tener en cuenta que cada proyecto u obra tiene sus particularidades y se definirán límites de sistemas diferentes, acordes con la información disponible. En Noruega, por ejemplo, la evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida de diferentes formas de generación de electricidad se ha enfocado en indicadores de cambio climático, calidad del ecosistema y salud humana (García-Gusano *et al.*, 2016). Por su parte, un inventario, elaborado por Ribeiro y Silva (2010) del ciclo de vida de la hidroeléctrica Itaipú, que genera el 24% de la energía consumida en Brasil, determinó los puntos críticos más importantes: 1) el llenado por la emisión de CO₂ y CH₄ y el cambio de uso de la tierra; 2) el ciclo de vida del acero por el consumo de agua y energía, las emisiones de CO₂ y la emisión de material particulado SO_x y NO_x; 3) el ciclo de vida del cemento por el consumo de agua y energía, las emisiones de CO₂ y de material particulado y la operación de maquinaria por el consumo de diésel y las emisiones de NO_x.

Grubert (2020) recomienda que para el futuro se necesitan sistemas con cero emisiones de carbono, en el marco de la sustentabilidad de los proyectos de generación de energía eléctrica, lo cual está asociado con otros cambios, particularmente el uso de nuevos combustibles y nuevas características de la central eléctrica. Por tanto, es relevante que se considere en toda la evaluación los diferentes aportes de las etapas o fases asociadas a la generación (Stamford, 2020). En Colombia estas técnicas ya se han implementado en el sector energético analizando escenarios futuros. El Banco Interamericano de Desarrollo y el Ministerio de Minas y Energía (2012) realizaron un ACV con el propósito de conocer los impactos ambientales de los biocombustibles colombianos, etanol de caña de azúcar (EtOH) y biodiesel de aceite de palma, sobre el ciclo de vida completo,

comparándolos con los combustibles fósiles de referencia (gasolina y diésel).

ACVs como herramienta de apoyo a la decisión en proyectos hidroeléctricos

Existen diferentes impactos sociales asociados a la construcción de hidroeléctricas: en la salud, la educación, las relaciones sociales, la migración, el acceso a medios de transporte, condiciones de habitabilidad, el patrimonio cultural y los hechos de corrupción, entre otros. El ACVs permite abordarlos en gran medida y establecer un resultado teniendo en cuenta el ciclo de vida del proyecto. Generalmente se habla del impacto positivo por la generación de empleo; no obstante, aunque la fase de construcción demanda mano de obra, la operación no necesita el mismo número de puestos de trabajo.

Osorio (2017) reflexiona sobre los territorios intervenidos por los proyectos hidroeléctricos en Colombia y afirma que, en general, se trata de zonas rurales o apartadas de los cascos urbanos, por lo que las poblaciones pueden esperar alguna bonificación económica o en especie, elemento que puede generar expectativas falsas y ocasionar conflictos entre las partes. Usuga (2014) indica la deficiencia en la planeación y la ejecución de soluciones para los problemas sociales generados por las pequeñas centrales hidroeléctricas en el departamento de Antioquia, enfatizando cómo el desplazamiento -como fenómeno normal en un proyecto hidroeléctrico- se convierte en un problema viral, negativo y catastrófico. Lo anterior es fundamental para trazar el alcance de un ACVs y enmarcarlo en las dinámicas de las poblaciones, sin caer en la premisa de que solo se trata de una cuestión monetaria.

Otro ejemplo en Colombia es la construcción y futura operación del proyecto Hidroituango, que ha presentado conflictos sociales, ambientales y retrasos por irregularidades en su construcción, llevando a especular sobre el camino que debe tomar la empresa ejecutora para salvar el proyecto. Muestra de esto es el sobrecosto estimado en \$7 billones adicionales, en su gran mayoría para costos en ingresos no percibidos (57%), obras (29%) y comunidades afectadas (14%), sin tener mayor detalle de la proyección del ciclo de vida de la represa. Una

de las opciones sobre la mesa es reducir el número de empleados; si eso se hiciera el efecto se cuantificaría como un impacto del ciclo de vida social del proyecto¹.

Limitaciones

Hay varios desafíos por superar para realizar una evaluación integral utilizando el ACV. El primero son las limitaciones espaciales y temporales, pues normalmente los impactos se basan en condiciones locales o regionales, y siguiendo a Arodudu *et al.* (2017) el método no permite prever cambios a mediano y largo plazo. En segundo lugar, se encuentra el empleo incorrecto o inapropiado de los datos de emisión, como el uso de factores descontinuados o desactualizados. En tercer lugar, cuando los datos requeridos no están disponibles o no son lo suficientemente detallados, se debe recurrir a bases de datos que, aunque tienen información confiable, no corresponden estrictamente con el caso en estudio, por lo que se debe reportar la incertidumbre de forma clara para los tomadores de decisiones. La incertidumbre de estas fuentes de información puede valorarse teniendo en cuenta el porcentaje de datos de fuente primaria o secundaria, si los datos se toman de mediciones en el proyecto o de uno comparable. También se puede realizar una evaluación de calidad de datos mediante pruebas estadísticas, como *Data Quality Matrix* (Matriz de Pedigrí), que permite asignar incertidumbre a un conjunto de datos, facilitando la selección de los más apropiados. Además, puede valorar los posibles escenarios de un proceso en estudio utilizando la simulación de Monte Carlo, que simula un rango probable de resultados, dado un conjunto de condiciones variables, y se puede aplicar dentro de un marco de evaluación de riesgos o inventario de ciclo de vida; por ejemplo, cuando se quiere comparar la fabricación de un producto (si se utilizara una fuente energética diferente) o cuando se tienen proveedores a distancias variables.

Desde la perspectiva de gestión, Bicalho *et al.* (2017) proporcionan sugerencias concretas para una evaluación consistente de la calidad de los datos para un ACV, abordando criterios como fiabilidad,

integridad, correlación temporal, correlación geográfica y tecnológica. Finalmente, Turconi *et al.* (2013) recomienda que las investigaciones futuras incluyan modelos de generación de electricidad, declaraciones claras de aplicabilidad de datos y limitaciones metodológicas, para así aumentar significativamente la transparencia y la usabilidad de los resultados obtenidos del ACV.

Como ya se mencionó, la veracidad de los resultados está sujeta a la calidad de la información del inventario de ciclo de vida. Por esta razón, dicho inventario debe reportarse en el informe final de acuerdo con lo establecido en la ISO 14040 (ver Figura 1). En Colombia, teniendo en cuenta que las centrales hidroeléctricas aportan el 69,2% del total de la electricidad generada, seguramente se cuenta con información puntual y precisa de todo el ciclo de vida del proceso. Sin embargo, lograr que la información esté disponible es un reto que debe afrontarse desde instituciones gubernamentales como los ministerios, las corporaciones ambientales o la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), por ejemplo.

Recomendaciones y conclusiones

El ACV y ACVs son herramientas ampliamente utilizadas, se encuentran estandarizadas internacionalmente y se han aplicado para determinar impactos de proyectos hidroeléctricos a nivel mundial. En Colombia se debería iniciar la construcción de una línea base de información para consolidar inventarios locales y así llevar a cabo evaluaciones de ciclo de vida bajo el enfoque de sustentabilidad. Lo anterior solo es posible si las autoridades ambientales promueven la recolección de información primaria por parte de las empresas que construyen y operan este tipo de proyectos y logran establecer lineamientos claros de levantamiento, custodia y seguimiento de la información, que hoy en día es posible reportar, almacenar y publicar mediante plataformas digitales. Esto obedece a que, en general, los proyectos de esta índole son ejecutados por actores privados.

Las entidades privadas que llevan a cabo la operación y/o construcción de proyectos hidroeléctricos y deben tomar decisiones para la mejora ambiental y cumplimiento de la legislación, pueden aprovechar

¹ Las cifras corresponden a lo reportado por el gerente de Empresas Públicas de Medellín (EPM) en rueda de prensa (El Colombiano, 2018).

la información resultante del ACV y combinarla con sus indicadores sociales y económicos para decidir de forma estratégica, y así ampliar la cobertura más allá del ámbito medioambiental.

Teniendo en cuenta que no hay evidencia de ACV completos en Colombia para centrales hidroeléctricas y que, actualmente, éstas podrían emitir cantidades considerables de dióxido de carbono y metano, sería recomendable iniciar un análisis de este tipo a corto plazo en un proyecto en etapa de operación, y a mediano plazo en proyectos en fase de licenciamiento o planeación para evaluar las emisiones generadas e incluir otros impactos desde la planeación hasta el abandono. Las líneas de investigación del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y las de universidades podrían priorizar el establecimiento de una hoja de ruta de ACV para hidroeléctricas en Colombia.

También, es importante que las autoridades ambientales y ministerios incentiven el cálculo de impactos sociales, ambientales, económicos y culturales con enfoque de ciclo de vida para obtener evaluaciones y modelos sustentables de generación de energía eléctrica.

Por último, debe quedar en el pasado la visión de que la producción de energía es una necesidad tan relevante que se olvidan los impactos asociados a su desarrollo, para darle lugar a la comparación multicriterio entre fuentes de generación eléctrica en el país, buscando una verdadera transición sustentable.

Referencias

Amaya, Á, Guzmán, L., 2016. La industria energética y el recurso hídrico en Colombia. breve referencia al caso de la hidroeléctrica el Quimbo. Medio Ambiente & Derecho: Revista Electrónica de Derecho Ambiental 31, 183-210.

Arantes, C., Fitzgerald, D., Hoeninghaus, D., Winemiller, K., 2019. Impacts of hydroelectric dams on fishes and fisheries in tropical rivers through the lens of functional traits. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 37, 28-40. DOI: 10.1016/j.cosust.2019.04.009

Arodudu, O., Helming, K., Wiggering, H., Voinov, A., 2017. Towards a more holistic sustainability assessment framework for agro-bioenergy systems — A review. *Environ. Impact Assess. Rev.* 62, 61-75. DOI: 10.1016/j.eiar.2016.07.008

Banco Interamericano de Desarrollo; Ministerio de Minas y Energía, 2012. Evaluación del ciclo de vida

de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Consorcio CUE. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/488888/Capitulo_2_ACV_final.pdf/1b6d5aec-702c-40b5-ac0a-eb4a564dd72e ; consultado: marzo de 2020.

Barros, N., Cole, J., Tranvik, L., Prairie, Y., Bastviken, D., Huszar, V., Giorgio, P., Roland, F., 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geosci.* 4(9), 593-596. DOI: 10.1038/ngeo1211

Bednarek, A., 2001. Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal. *Environ. Manage.* 27, 803-814. DOI: 10.1007/s002670010189

Bicalho, T., Sauer, I., Rambaud, A., Altukhova, Y., 2017. LCA data quality: A management science perspective. *J. Clean. Prod.* 156, 888-898. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.229

Boyle, G. (Ed.), 2004. *Renewable energy: Power for a sustainable future*. 3a ed. Oxford University Press, Oxford, UK.

Carrington, G., 2000. A study of the lake chelan hydroelectric project based on life-cycle stressor-effects assessment. Public Utility District No. 1. Oakland, CA.

Chen, J., Shi, H., Sivakumar, B., Peart, M., 2016. Population, water, food, energy and dams. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56, 18-28. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.043

Cortés-Mora, H., 2018. Estructuración de la sustentabilidad en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC.

Delsontro, T., McGinnis, D., Sobek, S., Ostrovsky, I., Wehrli, B., 2010. Extreme methane emissions from a swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environ. Sci. Technol.* 44(7), 2419-2425. DOI: 10.1021/es9031369

El Colombiano, 2018. EPM necesita \$7 billones para solventar crisis de Hidroituango. Diario de prensa del 3 de septiembre, disponible en: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/hidroituango-costo-total-de-la-contingencia-en-el-proyecto-YK9268067>; consultado: marzo de 2020.

Fearnside, P., 2014. Impacts of Brazil's madeira river dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environ. Sci. Policy*, 38, 164-172. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.11.004

Gagnon, L., van de Vate, J., 1997. Greenhouse gas emissions from hydropower. *Energy Policy* 25(1), 7-13. DOI: 10.1016/S0301-4215(96)00125-5

García-Gusano, D., Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., Dufour, J., Espegren, K., Lind, A., 2016. Integration of life-cycle indicators into energy optimisation models: The case study of power generation in Norway. *J. Clean. Prod.* 112(Part 4), 2693-2696. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.075

- Gibson, G., Sandiford, M., 2013. Sismicity and induced earthquakes. Office of the New South Wales Chief Scientist and Engineer, Melbourne Energy Institute, Melbourne, Australia.
- Gleick, P., Palaniappan, M., Morikawa, M., Morrison, J., 2009. The world's water 2008-2009: The biennial report on freshwater resources. Bibliovault OAI Repository, University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Grant, E., 2003. A aeological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. *Water Sci. Appl.* 7, 209-225.
- Grubert, E., 2020. Conventional hydroelectricity and the future of energy: Linking national inventory of dams and energy information administration data to facilitate analysis of hydroelectricity. *Electr. J.* 33(1), 106692. DOI: 10.1016/j.tej.2019.106692
- Herrera, A., Scolnick, H., Chichilnisky, G., G.- Gallopin, Hardoy, G., Mosovich, J., Oteiza, D., Grest, G., Suárez, C., Talavera, L., 2004. ¿Catastrofe o nueva sociedad? Modelo mundial latinoamericano 30 años después índice. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Canada.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2007. ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Bogotá, DC.
- Kadiyala, A., Kommalapati, R., Huque, Z., 2016. Evaluation of the life cycle greenhouse gas emissions from hydroelectricity generation systems. *Sustainability* 8(6), 539. DOI: 10.3390/su8060539
- Kemenes, A., Forsberg, B., Melack, J. 2011. CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 116(G3), G03004. DOI: 10.1029/2010JG001465
- Khang, D., Tan, R., Uy, O., Promentilla, M., Tuan, P., Abe, N., Razon, L., 2017. Design of experiments for global sensitivity analysis in life cycle assessment: The case of biodiesel in Vietnam. *Resour. Conserv. Recycl.* 119, 12-23. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.08.016
- Leff, E., 2011. Sustentabilidad y racionalidad ambiental: Hacia "otro" programa de sociología ambiental. *Rev. Mex. Sociol.* 73(1), 5-46.
- Liu, C., Ahn, C., An, X., Lee, S., 2013. Life-cycle assessment of concrete dam construction: comparison of environmental impact of rock-filled and conventional concrete. *J. Constr. Eng. Manag.* 139(12), A4013009. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000752
- McIntosh, A., Pontius, J., 2017. Tools and skills. En: *Science and the global environment: Case studies for integrating science and the global environment.* Elsevier, Waltham, MA. pp. 1-112. DOI: 10.1016/b978-0-12-801712-8.00001-9
- Morin, E., 2011. La vía para el futuro de la humanidad. Paidós, Barcelona, España.
- Noh, S., Son, Y., Park, J., 2018. Life cycle carbon dioxide emissions for fill dams. *J. Clean. Prod.* 201, 820-829. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.099
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2019. High-level synthesis report of latest climate science information convened by the Science Advisory Group of the UN Climate Action Summit 2019. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30023/climsci.pdf?sequence=1&isAllowed=y>; consultado: marzo de 2020.
- Osorio, I., 2017. Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia. Trabajo de grado. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Osorio, C., 2018. La consulta popular ante los impactos ambientales de la construcción de Proyectos Hidroeléctricos en Colombia. Estudio del Caso de la Hidroeléctrica El Quimbo. Trabajo de grado. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, DC.
- Pascale, A., Urmee, T., Moore, A., 2011. Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand. *Renew. Energy* 36(11), 2799-2808. DOI: 10.1016/j.renene.2011.04.023
- Perdan, S., 2010. The concept of sustainable development and its practical implications. En: Azapagic, A., Perdan, S. (Eds.), *Sustainable development in practice: Case studies for engineers and scientists.* 2a ed. Wiley, Nueva York, NY. pp. 3-25. DOI: 10.1002/9780470972847.ch1
- Pizzirani, S., McLaren, S., Seadon, J., 2014. Is there a place for culture in life cycle sustainability assessment? *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 1316-1330. DOI: 10.1007/s11367-014-0722-5
- Premalatha, M., Abbasi, T., Abbasi, T., S., 2014. A critical view on the eco-friendliness of small hydroelectric installations. *Sci. Total Environ.* 481(1), 638-643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.047
- Rathore, D., Pant, D., Singh, A., 2013. A comparison of life cycle assessment studies of different biofuels. En: Singh, A., Pant, D., Olsen, S. (Eds.), *Life cycle assessment of renewable energy sources.* Springer, Londres. pp. 269-289. DOI: 10.1007/978-1-4471-5364-1_12
- Ribeiro, F., Silva, G., 2010. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. *J. Clean. Prod.* 18(1), 44-54. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.006
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, Hiroshi, N., Nobutaka, T., Shiina, T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *J. Food Eng.* 90, 1-10, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016
- Scherer, L., Pfister, S., 2016. Hydropower's biogenic carbon footprint. *PLoS ONE* 11(9), e0161947. DOI: 10.1371/journal.pone.0161947

- Seo, E., Kulay, L., 2006. Life cycle assessment: Management tool for decision-making. *Interface* 1(1).
- Silva, G., 2003. *Análise de Ciclo de Vida*. Programa de educação continuada em engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, San Paulo, Brasil.
- Song, C., Gardner, K., Klein, S., Souza, S., Mo, W., 2018. Cradle-to-grave greenhouse gas emissions from dams in the United States of America. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90, 945-956. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.014
- Sovacool, B., Dhakal, S., Gippner, O., Bambawale, M., 2011. Halting hydro: A review of the socio-technical barriers to hydroelectric power plants in Nepal. *Energy* 36(5), 3468-3476. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.051
- Stamford, L., 2020. Life cycle sustainability assessment in the energy sector. En: Ren, J., Scipioni, A., Manzardo, A., Liang, H. (Eds.), *Biofuels for a more sustainable future*. Elsevier, Londres. pp. 115-163. DOI: 10.1016/b978-0-12-815581-3.00005-1
- Toniolo, S., Tosato, R., Gambaro, F., Ren, J., 2020. Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment. En: Ren, J., Toniolo, S. (Eds.), *Life cycle sustainability assessment for decision-making: Methodologies and case studies*. Elsevier, Amsterdam. pp. 39-56. DOI: 10.1016/b978-0-12-818355-7.00003-8
- Torres, M., Caballero, H., Awad, G., 2014. Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidroituango. *Energética* (44), 75-83.
- Turconi, R., Boldrin, A., Astrup, T., 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28, 555-565. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.013
- United Nations Environment Programme (UNEP); Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 2009. *Guidelines for social life cycle assessment of products*. Paris.
- Unidad de Planeación Minero Energética Colombia (UPME), 2018. *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano*. Bogotá, DC.
- Unidad de Planeación Minero Energética Colombia (UPME), 2019. *Registro de proyectos de generación a diciembre*. Database Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL), disponible en: <http://www.siel.gov.co/>; consultado: marzo de 2020.
- United States Society on Dams, 2015. *Guidelines for dam decommissioning projects*. Denver, CO.
- United States Energy Information Administration, 2019. *Hydropower explained: Hydropower and the environment*. Disponible en: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/hydropower-and-the-environment.php>; consultado: marzo de 2020.
- Usuga Montoya, E., 2014. *Impactos sociales y económicos de la hidroeléctrica en Ituango*. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Universidad de Medellín, Colombia.
- Verán Leigh, D., Vázquez, I., 2017. *Proyecto IKI-PNUMA: avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía baja en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados en Perú*. ONU Medio Ambiente, Lima.
- Wang, L., Wang, Y., Du, H., Zuo, J., Li, R., Zhou, Z., Bi, F., Garvlehn, M., 2019. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. *Appl. Energy* 249, 37-45. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.099
- World Commission of dams, 2000. *Dams and development a new framework for decision making*. Londres.
- Wu, H., Chen, J., Xu, J., Zeng, G., Sang, L., Liu, Q., Yin, Z., Dai, J., Yin, D., Liang, J., Ye, S., 2019. Effects of dam construction on biodiversity: A review. *J. Clean. Prod.* 221, 480-489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.001
- Wu, R., Yang, D., Chen, J., 2014. Social life cycle assessment revisited. *Sustainability* 6(7), 4200-4226. DOI: 10.3390/su6074200
- Yang, J., 2016. E-Mergy accounting for the Three Gorges Dam project: Three scenarios for the estimation of non-renewable sediment cost. *J. Clean. Prod.* 112(Part 4), 3000-3006. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.110
- Yewhalaw, D., Legesse, W., Bortel, W., gebre-Selassie, S., Kloos, H., Duchateau, L., Speybroeck, N., 2009. Malaria and water resource development: The case of Gilgel-Gibe hydroelectric dam in Ethiopia. *Malaria J.* 8, 21. DOI: 10.1186/1475-2875-8-21
- Yuguda, T., Li, Y., Xiong, W., Zhang, W., 2020. Life cycle assessment of options for retrofitting an existing dam to generate hydro-electricity. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 57-72. DOI: 10.1007/s11367-019-01671-1
- Zamagni, A., Pesonen, H.-L., Swarr, T., 2013. From LCA to life cycle sustainability assessment: concept, practice and future directions. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1637-1641. DOI: 10.1007/s11367-013-0648-3