



Grupo de Investigación en Potencia,  
Energía y Mercados

# Número 5



Fotografía tomada por Santiago Erazo a Guayacan , Ancuya - Nariño





**Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales**

**Dirección**

**Belizza Janet Ruíz Mendoza  
Astrid Vanesa Mina Gallardo**

**Comité editorial**

**Astrid Vanesa Mina Gallardo  
Laura Cossette Ríos Sarmiento  
Evelyn Daniela Bárcenas Ruano**

**Diseño y diagramación**

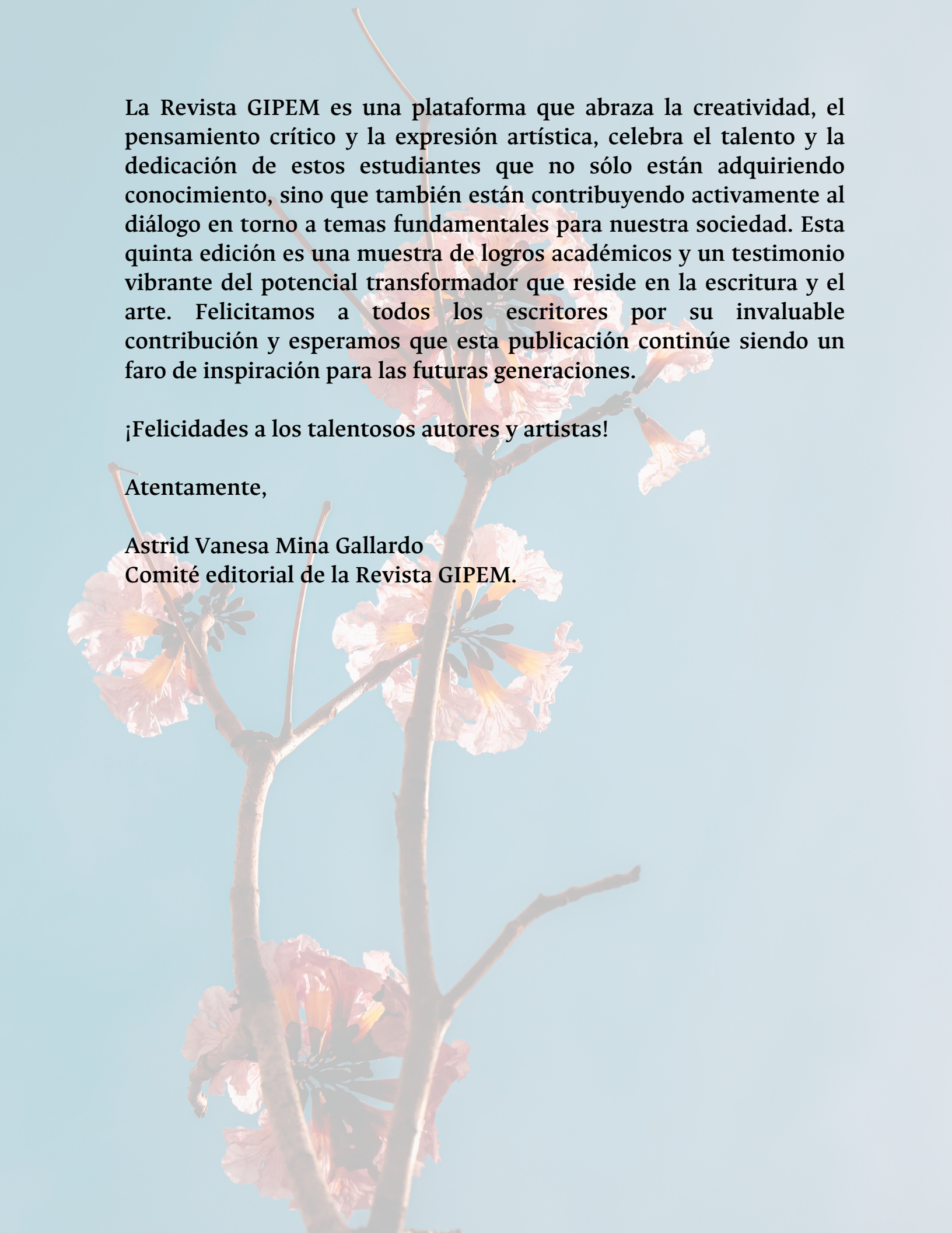
**Oscar Santiago Erazo Mora  
Manuela Salazar Carmona  
Ana Maria Suárez Moncada  
Laura Marcela Cortés Ossa**

---

# Editorial

La quinta edición de la Revista GIPEM de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales está llena de inspiración y conocimiento para sus lectores. En esta ocasión, los textos seleccionados son producto del esfuerzo y la dedicación de los estudiantes de las asignaturas de Generación de Energía Eléctrica y Generación de Energía Eléctrica con Fuentes No Convencionales dictadas por la profesora Belizza Janet Ruiz Mendoza, lo más enriquecedor de esta compilación es la diversidad de enfoques que abarcan. Los ensayos presentados se alinean con las líneas temáticas principales de la Revista, que abarcan temas como Energía y Ambiente, Energía y Sociedad, Energía y Tecnología, Energía y Política, y Energía y Economía. Esta publicación no sólo es un reflejo del conocimiento adquirido en el aula, sino también un testimonio del poder transformador de la escritura y la expresión artística en el ámbito académico. Siguiendo los principios pedagógicos de Paulo Freire, los estudiantes no se limitan a exponer ideas; desafían los problemas sociales y los entrelazan con los conceptos estudiados en clase para desarrollar un análisis crítico y ofrecer diversas perspectivas a través de sus ensayos.

Escribir en este contexto no sólo fortalece las habilidades de redacción y comprensión lectora de los estudiantes, sino que también les permite enfrentarse al reto de componer documentos académicos sólidos. Este proceso les brinda la oportunidad de descubrir su propio potencial y reconocer el valor de ser publicados en una revista que está dedicada a y creada por estudiantes. Además de los textos académicos, esta edición presenta una faceta artística, incorporando las creaciones de Oscar Santiago Erazo Mora, a través de sus fotografías y textos artísticos, Santiago transmite las emociones que la vida le inspira, estas manifestaciones artísticas enriquecen y complementan la diversidad de contenidos presentados en esta edición.



La Revista GIPEM es una plataforma que abraza la creatividad, el pensamiento crítico y la expresión artística, celebra el talento y la dedicación de estos estudiantes que no sólo están adquiriendo conocimiento, sino que también están contribuyendo activamente al diálogo en torno a temas fundamentales para nuestra sociedad. Esta quinta edición es una muestra de logros académicos y un testimonio vibrante del potencial transformador que reside en la escritura y el arte. Felicitamos a todos los escritores por su invaluable contribución y esperamos que esta publicación continúe siendo un faro de inspiración para las futuras generaciones.

¡Felicidades a los talentosos autores y artistas!

Atentamente,

Astrid Vanesa Mina Gallardo  
Comité editorial de la Revista GIPEM.



## **Creaciones artísticas**

Oscar Santiago Erazo Mora

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

GIPeM 05, diciembre (2023)  
pp. 06-11  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia

### **La belleza de la resistencia**

**"Yo no quiero ver el sol  
encerrado tras las rejas  
yo no quiero ver el sol  
ni siquiera me calienta."**

**El sol, Los Aguas Aguas.**

La imagen captura un grupo de flores amarillas emergiendo entre las rejas de metal. Es un recordatorio vivo de la belleza resiliente que puede brotar en los lugares más inesperados, desafiando la oscuridad que las envuelve. Las flores, con su vibrante color y vitalidad, simbolizan la luz y la esperanza frente a la rigidez y la desesperación representada por las rejas.

Es como presenciar un enfrentamiento entre la vida y la limitación impuesta. Las flores, en su lucha por romper las barreras, nos transmiten una lección profunda: que incluso en los momentos más oscuros, la vida persiste, buscando una oportunidad para florecer.

Las rejas evocan más que solo metal; son un símbolo de las limitaciones y barreras que enfrentamos en la vida. Estas restricciones pueden ser físicas, emocionales o incluso sociales, impidiendo que mostremos nuestra auténtica esencia. Las flores, emergiendo audazmente, nos recuerdan la resistencia innata del espíritu humano frente a estas limitaciones.

La frase "Yo no quiero ver el sol encerrado tras las rejas" resuena con la necesidad de libertad y autenticidad. La imagen, con las flores desafiando las rejas, nos incita a reflexionar sobre la importancia de liberarnos de las barreras que nos impiden ser quienes realmente somos.

Es un llamado a reconocer y superar las restricciones que nos rodean, a buscar la libertad de expresión y el derecho a ser auténticos. Las flores, como símbolo de esperanza, nos muestran que siempre hay espacio para el florecimiento incluso en los entornos más hostiles, invitándonos a abrazar la posibilidad de un nuevo comienzo.



## **Pausa en el vuelo**

**"En sus alas, misterios guardados,  
La rama abraza su serenidad,  
una tregua en tiempos agitados  
paz efímera en su realidad."**

Esta imagen revela un instante de quietud que resuena con una serenidad casi espiritual. El pájaro, reposando en la rama, parece encarnar la esencia misma de la paz y la tranquilidad. Su postura tranquila despierta una sensación de conexión profunda con el mundo natural, como si fuera el guardián silencioso de la armonía en medio del caos del universo.

La imagen invita a sumergirse en la introspección, a contemplar la fugacidad del tiempo y la eternidad de los instantes. El pájaro nos enseña la sabiduría de encontrar nuestro propio refugio interior, un lugar donde la serenidad nos envuelva en medio de las tormentas cotidianas. Es un recordatorio de que, incluso en los momentos más convulsos, podemos hallar calma si aprendemos a escuchar el susurro de la naturaleza y a percibir la danza silenciosa del universo.

En esa quietud del pájaro en la rama, encontramos una lección sobre la vida y sus vaivenes, sobre la necesidad humana de conectar con lo más profundo de nuestra esencia. Nos invita a desacelerar, a apreciar la belleza de los pequeños detalles y a reconocer la magnificencia en la simplicidad. Es un llamado a explorar la esencia de la existencia, a encontrar la paz en la comprensión de que, en medio del caos, podemos hallar nuestro propio equilibrio y serenidad interior.





## **Las Decisiones del Amor**

**"Entre la quietud de ese mercado corriente,  
Oculto yace una epopeya, noble y latente.  
Labramos el sendero, cada elección, un paso,  
Caminando por los suyos, es amor en el ocaso."**

En la cotidianidad de un supermercado, se revela un escenario de decisiones que trascienden lo trivial. Cada elección se convierte en un movimiento estratégico en el tablero de la vida, como un maestro de ajedrez que planea cuidadosamente cada jugada. Detrás de cada producto seleccionado y colocado en el carrito yace una historia única: historias de sacrificio, resistencia y amor incondicional.

Es un escenario aparentemente común, entre estantes repletos de bienes materiales, donde se entretreje el tapiz de la existencia. Aquí, se oculta la epopeya cotidiana de aquellos que labran incansablemente el camino para el bienestar de los suyos. Cada producto adquirido no es solo un artículo de consumo, sino un símbolo de esfuerzo y dedicación, una muestra de responsabilidad y amor hacia los seres queridos.

Los estantes rebosantes de opciones son testigos silenciosos de las decisiones que moldean realidades. La elección entre productos básicos y lujos es un reflejo de valores, prioridades y sacrificios. Entre la diversidad de opciones, se teje la narrativa de aquellos que, en medio de la rutina diaria, enfrentan decisiones que afectan sus vidas y las de sus familias.

La quietud aparente de este escenario de compras esconde historias de perseverancia y valentía. Detrás de cada artículo elegido, hay sueños sencillos, anhelos y aspiraciones profundas. Es un acto aparentemente mundano que encierra la grandeza de la responsabilidad y el compromiso con el cuidado de los seres queridos, donde cada elección se convierte en un acto de amor en su forma más pura y cotidiana.



SANTIAGO ERAZO

# **Análisis del impacto ambiental de la creación de una central hidroeléctrica en Caldas**

## **“Revolución de los ríos y el entorno”**

José Luis Urbano Guerrero - Eduar Alejandro Betancur Gómez  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Las centrales hidroeléctricas se han convertido en una planta importante de generación de energía en todo Colombia; este país cuenta con una geografía privilegiada que le permite aprovechar los recursos hídricos para la producción de energía eléctrica, sin embargo, la construcción y operación de estas centrales no están libres de generar impactos ambientales significativos, por lo que, a continuación, se analizará el impacto ambiental de una central hidroeléctrica en el departamento de Caldas, Colombia, considerando sus efectos en el ecosistema acuático, la biodiversidad terrestre y la calidad del aire, así como sus implicaciones sociales (Gómez, M. 2013). La generación de energía eléctrica es un pilar fundamental para el desarrollo económico de cualquier país, sin embargo, la producción de ésta también conlleva un importante costo ambiental, ya que muchas de las fuentes de energía convencionales, como los combustibles fósiles, contribuyen significativamente al cambio climático y la degradación del medio ambiente. Por lo que, las centrales hidroeléctricas han surgido como una alternativa más sostenible, a comparación con las demás fuentes de energía eléctrica, debido a su baja emisión de gases de efecto invernadero, el uso de recursos renovables, el almacenamiento de energía, y la larga vida útil y bajo costo operativa de las mismas (Rico. G. 2018). Se plantea la creación de esta central en el departamento de Caldas y los interrogantes que son importantes para conocer su impacto ambiental y la transición hacia una composición energética más limpia y sostenible.

En Colombia, las centrales hidroeléctricas han sido consideradas como sinónimo de progreso gracias a su topografía y recursos hídricos, por lo tanto, estas son consideradas como un potencial extremadamente alto para desarrollar proyectos hidro energéticos, cabe destacar que la generación eléctrica del país depende aproximadamente en un 70 % de las hidroeléctricas (González. D 2022). En el departamento de Caldas, se

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 12-18  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

cuenta con una gran riqueza hídrica dada por tres sistemas acuíferos importantes; un sistema acuífero es una formación geológica que consiste en un conjunto de rocas, precipitaciones y otros materiales subterráneos que almacenan agua en sus grietas y fisuras, estos sistemas son fundamentales para el suministro de agua dulce en muchas partes del país, ya que actúan como un depósito natural de agua subterránea. Los tres sistemas acuíferos mencionados son: (Acuífero de Santágueda – km 41, Acuífero del Río Grande del Magdalena, Acuífero del Río Risaralda) (Cifuentes, L. 2020). Lo que convierte al departamento en una zona de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación hidroeléctrica, Sin embargo, en el Oriente de Caldas entre un 15 y 30 % de sus habitantes son víctimas de desplazamiento social, debido al incremento de las hidroeléctricas en este territorio. En dichas zonas rurales del Oriente caldense, tanto campesinos y comunidades étnicas han sido vulnerados y alterados por proyectos de generación hidráulica, sumando a la biodiversidad del lugar, entre los años 1997 y 2019.

Las centrales hidroeléctricas, tienen un menor impacto ambiental en comparación con las fuentes de energía más contaminantes. Esto se debe a que aprovechan la energía cinética del agua en movimiento, sin emitir grandes cantidades de gases de efecto invernadero. (Malagón. E. 2017). Además, estas centrales suelen tener una vida útil larga y proporcionan energía constante, lo que contribuye a la estabilidad del suministro eléctrico del sistema interconectado del país. La construcción de este tipo de central específicamente en el departamento de Caldas, representa un importante avance en la búsqueda de una composición energética más limpia. Algunos de los beneficios asociados incluyen la generación de empleo laboral, la mejora de la infraestructura, y la reducción de la dependencia de fuentes de energía más contaminantes. Sin embargo, no se puede ignorar que toda obra de esta amplitud tiene un impacto negativo; uno de los principales problemas asociados a las centrales hidroeléctricas es la alteración de los ecosistemas acuáticos y terrestres. La construcción de represas puede inundar grandes áreas de tierra, afectando la flora y la fauna local, además, el cambio en el flujo del agua puede tener consecuencias negativas en la biodiversidad de los ríos y arroyos cercanos. El cambio de los estándares naturales de los ríos puede afectar a las especies de peces migratorios y a las comunidades pesqueras que dependen de ellos para su subsistencia (Soto, J. 2020). La modificación de los ecosistemas acuáticos puede afectar la calidad del agua y, en última instancia, la salud de los ecosistemas.

A parte del impacto ambiental, las centrales hidroeléctricas también pueden generar consecuencias socioeconómicas; aunque generan empleo durante su construcción y operación, pueden desplazar a comunidades locales y afectar sus medios de vida tradicionales, como la pesca y la agricultura. Otros aspectos importantes a destacar sobre los impactos negativos, se pueden desarrollar en los siguientes puntos de vista: Efectos en el ecosistema acuático, una de las consecuencias más evidentes de la construcción de una central hidroeléctrica es la alteración del ecosistema acuático actual. El represamiento del río para la creación del embalse suele tener un impacto inmediato en la calidad del agua y en la vida de los organismos y/o seres acuáticos. La retención del agua altera los patrones naturales de flujo, lo que puede provocar la acumulación de nutrientes, ya sean nitratos y nitritos en grandes cantidades, afectando la potabilidad del agua y el equilibrio ecológico en ambientes acuáticos. (Sánchez, J. 2019). Además, la construcción de la presa y el desvío del flujo del río pueden interrumpir las rutas de migración de los peces, lo que afecta a las poblaciones de especies nativas. Esto puede tener un impacto negativo en la pesca local y en la biodiversidad acuática. Para mitigar estos efectos, se requieren medidas de manejo adecuadas, como la construcción de pasos para peces y la implementación de programas de monitoreo de la calidad del agua. Biodiversidad terrestre, otro aspecto importante a considerar es el impacto en la biodiversidad terrestre; la construcción de infraestructuras asociadas a una central hidroeléctrica, como carreteras de acceso y líneas de transmisión eléctrica, puede dividir los ambientes naturales y afectar a la fauna local. La deforestación de áreas cercanas para dar paso a la construcción también puede tener un impacto negativo en la biodiversidad, ya que se destruyen entornos naturales que son vitales para muchas especies (Mejía, R. D. 2021). Además, la operación de la central hidroeléctrica suele requerir un flujo constante de agua, lo que puede influir en los regímenes naturales de inundación de las áreas de eventos para su ciclo de vida, como la reproducción y la

alimentación. Es crucial implementar medidas de conservación y mitigación, como la reforestación de áreas impactadas y la creación de conectores naturales, para minimizar estos efectos en la biodiversidad terrestre.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es la calidad del aire; si bien las centrales hidroeléctricas son consideradas como una fuente de energía más limpia en comparación con las centrales térmicas, aún pueden tener impactos en la calidad del aire. Durante la construcción, se pueden generar emisiones de gases y partículas contaminantes, como sedimentos en el proceso de construcción de la represa, y residuos de construcción, así como el desgaste del suelo, por excavaciones y creación de embalses (Rosado, C. A. 2018). Además, la descomposición de materia orgánica en los pantanos, puede liberar gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono. Para disminuir estos efectos, es importante implementar prácticas de construcción sostenibles, implementando un sistema eficiente de gestión de residuos, para reducir la cantidad de desechos generados, igualmente, se deben monitorear y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante la operación de la central. La inversión en tecnologías limpias y la promoción de la energía renovable son estrategias clave para minimizar el impacto en la calidad del aire.

Igualmente, las implicaciones sociales y económicas, el impacto de una central hidroeléctrica no se limita solo al medio ambiente, sino que también tiene implicaciones sociales y económicas. Estas centrales pueden generar empleo en las comunidades locales durante la construcción y operación, lo que puede ser beneficioso para la economía regional. Sin embargo, también pueden provocar la reubicación de comunidades enteras, lo que conlleva a desafíos sociales y culturales significativos (Sánchez, M. 2008).

Es esencial que los proyectos hidroeléctricos se desarrollen con la participación activa de las comunidades locales y se consideren sus intereses y preocupaciones. Se deben implementar medidas de compensación y desarrollo comunitario para reducir los impactos negativos y promover el bienestar de las poblaciones afectadas. A causa de la llegada de los proyectos de desarrollo para la generación hidro energética entre 1997 y 2019, se originaron conflictos de orden ambiental; éstos se generan por la apropiación de bienes naturales y comunes, donde unos actores se benefician, quienes tienen facilidad, poder y capital para apropiarse con plena libertad de los territorios, mientras que las personas que habitan en dicho lugar son afectados y desplazados, además de impactos socio-culturales para la comunidad, decrece la producción agrícola (González. G. 2008).

El mayor impacto ambiental para la comunidad fue la pérdida de caudales en nacimientos y quebradas que contribuyen al desarrollo agrícola de la región, además de que estas cuencas abastecen tanques para el consumo doméstico y humano de las familias rurales, por lo que conlleva a resistencias sociales representadas en diferentes mecanismos de participación ciudadana; Asamblea Departamental de Caldas, derechos de petición y tutelas (Corredor, G. 2009). Un ejemplo de estas problemáticas es la transferencia de agua del río manso, que redirecciona el cauce de éste hacia el Embalse Amaní, con el objetivo de ayudar mantener el nivel del embalse en tiempos de sequía, este proyecto dejó como consecuencia aproximadamente 18 quebradas secas, una parcialmente seca y tres con caudales reducidos (Vargas. 2018). Además, para poder desviar el cauce del río fue necesaria la construcción de un túnel de 4015 metros de longitud y 300 metros de profundidad, lo cual desafortunadamente ocasionó la contaminación y desagüe de acuíferos cercanos. Todas estas afectaciones a los recursos hídricos trajeron grandes problemas a las comunidades que se beneficiaban de ellos, ya que no podrían continuar con sus actividades tradicionales de producción agrícola al no poder contar con la cantidad suficiente de agua para hacerlo.

Las incidencias sociales y ambientales van desde la alteración de los ecosistemas acuáticos y terrestres, despojo de tierras, afectaciones a la pesca y agricultura, como también afectación a la composición del agua, zonas forestales, desalojo territorial, violencia, hasta afectaciones económicas y psicológicas de la

población. En el afán de utilizar energías limpias, no se ha tenido la suficiente consideración de las consecuencias y efectos que traen consigo. Por lo tanto, es de gran importancia un correcto seguimiento con el fin de asegurar la funcionalidad a futuro de los proyectos, no solo en términos de rentabilidad, sino también de sostenibilidad (Higuera, M. 2022). La problemática tratada anteriormente, se puede demostrar con lo que sucedió en el mismo departamento de Caldas en la construcción de la Central La Aurora en el municipio de Marulanda. Esta planta ha provocado la pérdida de tierras y recursos naturales de las comunidades locales, así como la alteración del flujo de agua, y la pérdida de biodiversidad. Igualmente, su construcción generó conflictos sociales y políticos debido a la desigual distribución de los beneficios y costos, a pesar de que este proyecto generó empleos y mejoró la infraestructura local, los impactos negativos en las comunidades locales y el medio ambiente deben tomarse en cuenta.

Actividades como la agricultura y ganadería se ven perjudicadas por la construcción de este tipo de centrales, ya que los procesos hidroeléctricos limitan el acceso a recursos terrestres e hídricos, impidiendo el desarrollo de la vida rural. Además, las inundaciones de grandes áreas de tierra causadas por el represamiento de agua, generan un cambio en las propiedades del suelo, haciéndolo inapropiado para las actividades mencionadas, e incluso pueden generar alteraciones en el estado de salud de las comunidades que habiten cerca, por los cambios del suelo (Mejía, R. D. 2021). Para intentar disminuir al máximo estos impactos socio-ambientales, desde hace algunos años las empresas que se dedican a la generación de energía hidroeléctrica han estado implementado diferentes alternativas las cuales pretenden crear un equilibrio entre los beneficios de este tipo de plantas y sus impactos negativos, algunas de estas alternativas son los estudios de impacto ambiental (EIA), son un proceso fundamental que se realiza antes de la construcción de una central hidroeléctrica, jugando un papel esencial en la protección del medio ambiente y en el desarrollo sostenible. El principal objetivo de estas evaluaciones es identificar y analizar los posibles impactos negativos que la central hidroeléctrica podría tener en el medio ambiente, los ecosistemas circundantes y las comunidades locales. Los EIA se convierten en una herramienta crucial para anticipar y comprender los riesgos ambientales potenciales y al mismo tiempo, permitir el diseño de estrategias efectivas para mitigar y minimizar estos impactos negativos, también, las EIA brindan la oportunidad de involucrar a diversas partes interesadas, como la comunidad local, organizaciones ambientales y expertos en la materia, en el proceso de toma de decisiones. Participación comunitaria, las empresas interesadas en la generación hidroeléctrica generalmente intentan involucrar a las comunidades que se van a ver afectadas por esta práctica en la toma de algunas decisiones importantes para la construcción y manejo de las plantas, además de llegar a acuerdos los cuales buscan reducir y compensar las afectaciones que estas comunidades van a sufrir.

La restauración del hábitat, es una estrategia fundamental que algunas empresas implementan para compensar el impacto ambiental causado en las áreas aledañas a una presa u otro proyecto de desarrollo (Rivera, L. G. 2013). Estos proyectos de restauración generalmente tienen como objetivo recuperar y mejorar los ecosistemas afectados por la construcción y operación de hidroeléctricas. Dos de las prácticas más habituales en este sentido son la reforestación y la restauración de zonas degradadas que han sido eliminados o dañados, esto ayuda a recuperar la cubierta forestal y restaurar los ecosistemas, además de la reforestación, la restauración de las áreas afectadas implica la recuperación de hábitats específicos como humedales ribereños de ríos o zonas degradadas. Este proceso incluye la reintroducción de plantas y animales nativos (Dorado, A. 2021). Estos proyectos de restauración no sólo ayudan a compensar el impacto ambiental negativo de la construcción de presas, sino que también pueden tener beneficios adicionales como promover la biodiversidad, conservar los recursos hídricos y mejorar la calidad del agua, aire y suelo en el entorno. Diseño y tecnología avanzada, el diseño e implementación de tecnologías avanzadas en proyectos hidroeléctricos juegan un papel crucial en la reducción del impacto socioambiental en las áreas circundantes. Estos enfoques son esenciales para maximizar la eficiencia de la producción de electricidad y minimizar los efectos negativos en el medio ambiente natural y las comunidades locales (García, O. 2021). Algunas de las particularidades importantes de esta estrategia son los siguientes: La optimización del diseño de la energía hidroeléctrica,

que implica una selección cuidadosa de la ubicación, la capacidad y el tipo de la presa para minimizar los impactos ambientales; esto puede incluir la consideración de factores como la topografía, la hidrología y la geología. para garantizar que la presa se adapte adecuadamente al medio ambiente. Tecnologías avanzadas de generación de energía, la implementación de tecnologías avanzadas como turbinas de mayor eficiencia, sistemas de control inteligentes y más equipos de generación de energía de mayor eficiencia que permitan aprovechar mejor los recursos (Higuera, M 2022). Monitoreo ambiental en tiempo real, la tecnología avanzada también facilita el monitoreo en tiempo real de los impactos ambientales y permite una respuesta más rápida a cualquier problema que pueda surgir. El surgimiento de las Centrales Hidroeléctricas en el departamento de Caldas, plantea el aumento de la capacidad de generación eléctrica en el Sistema Interconectado del país, pero también trae incidencias de orden socio-cultural, ambiental y económico para las comunidades que allí habitan dado que, desde la ingeniería es inusual la visión social de los proyectos que se desarrollan; conscientes ya no solo de estas situaciones contradictorias como ventajas e inconvenientes, se llega a la reflexión desde el marco de las humanidades, que la creación y uso de estas hidroeléctricas deben impulsar una ética en el desarrollo sostenible que emplee tecnologías en favor de las comunidades que serán víctimas de estos procesos de desarrollo (Osorio, A. 2020).

La construcción y operación de una central de este tipo en el departamento, es un paso significativo hacia el cambio a una composición energética más sostenible. Sin embargo, no se puede pasar por alto el impacto ambiental significativo que conlleva en el ecosistema acuático, la biodiversidad terrestre y la calidad del aire (Cifuentes, L. 2020). Es muy importante que se lleven a cabo evaluaciones ambientales y se implementen medidas de reducción adecuadas para minimizar el impacto en los ecosistemas locales. Dichas consecuencias se pueden controlar y reducir mediante medidas adecuadas de manejo ambiental y una planificación cuidadosa. Además, es fundamental considerar las implicaciones sociales y económicas, y trabajar en colaboración conjunta con las comunidades locales para asegurar que se vean beneficiadas y no perjudicadas a largo plazo. Por último, también cabe recalcar la gran importancia de las hidroeléctricas para mantener la estabilidad energética de Caldas y del país, además para la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es fundamental para reducir el impacto ambiental de la generación de energía en el país. Todo esto con el objetivo de encontrar el equilibrio adecuado entre el desarrollo económico y la conservación ambiental, garantizando que las generaciones tanto actuales como futuras, disfruten de un suministro de energía confiable y la capacidad de generar energía más limpia y sostenible, contribuyendo a la reducción del cambio climático, hasta el impulso económico mediante la creación de empleos y el desarrollo de infraestructuras locales. Las hidroeléctricas en Caldas ofrecen una solución a largo plazo para satisfacer las necesidades energéticas de la región y sentará las bases de un crecimiento sostenible, sustentable y responsable (García, J. 2019).

## Referencias

- Osorio, A. y Cifuentes, L. (2020). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en el Oriente del departamento de Caldas. "Impactos ambientales y resistencias sociales en el posconflicto"*. *Revista Jurídicas*, 17(2), 180-198
- Pineda, D. (2019). *El manejo del embalse de Guatapé estaría afectando el ecoturismo de la región*. *Revista Infobae*. Pineda, D. (2019). *El manejo del embalse de Guatapé estaría afectando el ecoturismo de la región*. *Revista*. Recuperado de <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/01/28/manejo-del-embalse-de-guatape-estaria-afectando-el-ecoturismo-de-la-region/>
- Guacaneme, W., & Layton, A. (2021). *Diseño para la conversión tecnológica de las plantas térmicas de generación de energía eléctrica a carbón por un sistema de generación fotovoltaico del departamento de la Guajira*. *Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/12028/1/Examen%20Complejivo%20Estudio>



%20de%20Caso%20Econ%20%20Oscar%20Marcel.pdf

- Higuera, M. (2022). Los planes que tienen las termoeléctricas en sostenibilidad. *Revista La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/especiales/hacia-la-transicion-energetica/los-planes-que-tienen-las-termoelectricas-en-sostenibilidad-3497909>
- Herrera, G., López, C., & Sánchez, M. (2008). Diagnóstico de las centrales hidroeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. *Épsilon - Revista de las facultades de ingeniería*, 010, 49-55. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/955/95501006.pdf>
- García, J. (2019). *Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Facultad de Ciencias Económicas. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76470/JavierBacca.2019.pdf?sequence=1>
- Soto, J. (2020). ¿Por qué la termoeléctrica no es energía limpia? *Revista Greenpeace*. Recuperado de <https://www.grn.cl/impacto-ambiental/impacto-ambiental-de-las-plantas-termoelectricas.html>
- Granados, G. (2023). Éxtasis y martirio para el carbón colombiano. *Revista El País*. Recuperado de <https://elpais.com/economia/negocios/2023-03-08/extasis-y-martirio-para-el-carbon-colombiano.html>
- Ferreira, S., & Campos, M. (2014). *Impacto económico y ambiental del uso del gas natural en la generación de electricidad en el Amazonas*. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532015000200011](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532015000200011).
- Galvis, J. (2016). Comparación del impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de la vida. Recuperado de <https://www.grn.cl/impacto-ambiental/impacto-ambiental-de-las-plantas-termoelectricas.html>
- Jaramillo, C. & Escobar, L. (2022). *Proyección: Demanda, Energía Eléctrica, Gas Natural y Combustibles Líquidos*. República de Colombia - Unidad de Planeación Minero-Energética.
- Moreno, A. & Contreras, H. (2019). Valoración económica de la captura de carbono como un servicio ambiental en la cuenca hidrográfica Quebrada Jui, municipio de Tierralta, Córdoba - Colombia. Universidad Santo Tomás.
- Rico, G. (2018). Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo. Recuperado de <https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/>
- Corredor, G. (2009). "Tablero de comando" para la promoción de los biocombustibles en Colombia. Repositorio Digital.
- Rincón, C., Guerrero, O., & Ovalle, J. (2020). *El carbón: fuente de energía de la Región Central de Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). *Análisis costo-beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Barrios, E., & Dorado, A. (2021). *Evaluación de la eficiencia del consumo de gas natural para la generación de energía eléctrica en Colombia*. Monografía - Universidad de Córdoba.
- Sánchez, J. (2019). *Generación de energía eléctrica mediante fluidos hidráulicos*. Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.
- Montenegro Coral, F. A., & Ortiz Chamorro, A. X. (2015). *La Geotermia, Fuente de Energía Alternativa para el Departamento de Nariño: Potencialidad, Usos y Beneficios*. En *Las Energías Sustentables y Sostenibles en el Departamento de Nariño* (pp. 20-37). Editorial UNIMAR.
- Ceballos Mejía, R. D. (2021). *Efectos socio-ambientales del proyecto hidroeléctrico El Edén en los municipios de Pensilvania y Manzanares-Caldas*. En *Las Hidroeléctricas: efecto social y su impacto ambiental* (pp. 20-37). Editorial UNIMAR.
- Duque Daza, J. M., Galeano Ureña, C. A., & Mantilla González. (2008). *Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano*. En *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (Vol. 44, pp. 97-110). Editorial UNIMAR.
- Saavedra Jurado, K. F. (2023). *Evaluación de la viabilidad técnico-económica de producción de energía e hidrógeno en el corregimiento de Chcunes-Nariño basado en la tecnología Power to Gas*. Repositorio Institucional Séneca. Manizales, Colombia.
- Osorio Rosado, C. A. (2018). *Impactos ambientales de los proyectos hidroeléctricos en Colombia: el caso del Quimbo*. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 101-115. Bogotá, Colombia
- Cuesta, N. K. (2015). *Análisis de la cadena de abastecimiento de la energía eléctrica en Colombia*. Bogotá: Universidad del Rosario. Págs. 51-55.
- García Morales, I. (2017). *Fallos en el Despacho Hidrotérmico (DHT) y su impacto en el costo de operación*. Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
- López López, C., & Sánchez Quitián, M. V. (2007). *Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas*. *Ciencia Unisalle*, 1(10), 52-63.
- Bacca-García, J. O. (2021). *Análisis de vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia*. *Gestión y Ambiente*, 24(supl. 2), 27-45. Recuperado de [doi:https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.92923](https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.92923)
- Buitrago Rivera, L. G. (2013). *Análisis de la eficiencia de la normatividad ambiental en la operación de los proyectos de generación de energía de la Central Hidroeléctrica de Caldas*. Tesis de grado, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Ortiz, C. (2018). *El sector eléctrico en Colombia: sin graves riesgos ante el cambio climático*. *Tecnología Investigación y Academia*, 21(2), 54-65.
- Benavides, G. (2022). *Evaluación del funcionamiento para optimizar la producción energética en la hidroeléctrica El Verde*. *Revista Tecnológica de la Facultad de Ingeniería*, 25(1), 1-12.
- Osorio, A., & Cifuentes, L. (2020). *Impactos sociales y ambientales de las pequeñas centrales hidroeléctricas en Caldas*. En A. Osorio & L. Cifuentes (Eds.), *Incidencias socio-ambientales, económicas y culturales de las hidroeléctricas en el Oriente de Caldas*.

## **Desafíos del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica en el contexto colombiano**

Angie Katerine Riaño Rodríguez - Manuel Santiago Ramírez Chamorro  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Una central hidroeléctrica desempeña un papel fundamental en la producción de energía renovable, promoviendo un suministro de electricidad sostenible y confiable. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), su capacidad para almacenar energía y funcionar como reguladores de la red eléctrica los convierte en componentes esenciales de la infraestructura energética en todo el mundo debido a que mediante el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, estas son capaces de generar energía eléctrica utilizando turbinas acopladas a generadores. Sin embargo, en la actualidad, la generación de energía hidroeléctrica involucra una evaluación exhaustiva del posible impacto en el cambio climático, considerando sus implicaciones a medio y largo plazo, además de su influencia. El cambio climático, considerado uno de los mayores desafíos del siglo XXI por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en el 2015, está manifestando impactos cada vez más notorios en distintos sectores, incluyendo la producción de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas, ya que a medida que la temperatura global aumenta y los patrones climáticos experimentan cambios drásticos, se genera incertidumbre en torno a la disponibilidad de los recursos hídricos empleados para la generación de esta energía (Bedoya J., Rodas E., & García D., 2016).

GIPeM 09, diciembre (2023)  
pp. 19-26  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

La operación de las plantas hidroeléctricas está directamente relacionada con la cantidad de agua disponible en sus cuencas de origen hidrográficas, definidas como territorios donde el agua desemboca en el mar a través de ríos o se concentra en un lago endorreico, por lo tanto, estas instalaciones son sumamente sensibles a las variaciones en los patrones de precipitaciones de estas áreas de captación (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2021). Teniendo en cuenta que el cambio climático plantea desafíos significativos para la operación de centrales hidroeléctricas, estos afectan diversos aspectos clave de

su eficiencia y sostenibilidad. Desde la incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos esenciales hasta la variabilidad en los patrones de precipitación y su impacto en la generación de energía, la interrelación compleja entre el cambio climático y las centrales hidroeléctricas demanda una cuidadosa atención a medida que se avanza hacia un futuro energético sostenible, constituyendo un aspecto importante, en este sentido la exploración de la influencia del cambio climático en la operación del sistema energético implica una evaluación anticipada de las tendencias climáticas. Este análisis no solo implica anticipar las tendencias climáticas, sino también prever la influencia precisa del cambio climático mediante la aplicación especializada de programas para la realización de simulaciones hidrológicas. Este enfoque no solo se erige como fundamental en el contexto de los desafíos ambientales actuales, sino que también establece las bases para estrategias científicamente informadas de adaptación y mitigación frente a un panorama de cambio climático dinámico.

Ante la evidencia del cambio climático, los gobiernos de los países andinos, los cuales en su gran mayoría utilizan como mayor fuente la energía hidráulica, han mostrado preocupación por los efectos de este fenómeno (Paz et al.,2019), por lo cual el estudio y el análisis del impacto que puede tener el cambio climático sobre la producción de energía en una central hidroeléctrica se vuelve crucial y de gran importancia, entrando en debate la viabilidad o la rentabilidad de una central hidroeléctrica a largo plazo. Por lo que, en el presente documento, se abordará, discutirá y dará a conocer los impactos que puede traer el cambio climático sobre las centrales hidroeléctricas, analizando y estudiando aspectos como el comportamiento del cambio climático, la vulnerabilidad de las plantas hidroeléctricas ante el cambio climático, efectos y amenazas que pueden presentar las plantas hidroeléctricas y las medidas que se pueden tomar ante el cambio climático, con sus respectivos estudios anticipados desde una postura a favor de estos sistemas e infraestructuras energéticas, con el objetivo de promover una visión optimista y proactiva, subrayando que, con las adecuadas medidas de adaptación y modernización, las centrales hidroeléctricas pueden seguir siendo una pieza fundamental en la transición hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

Dentro de este escenario, se destaca la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico frente al cambio climático, con proyecciones que sugieren una notoria afectación en los recursos hídricos disponibles, lo cual alterará significativamente la operatividad de las plantas hidroeléctricas. La proyección para las próximas décadas indica una afectación notable en estos recursos, lo cual plantea desafíos para las plantas hidroeléctricas frente a diferentes escenarios, como sequías, inundaciones y el aumento de la demanda de agua dulce, la cual como consecuencia hace que el déficit de almacenamiento también crezca, tal como se ha podido observar en los últimos 50 años en los cuales la población mundial se duplicó y el agua almacenada en la naturaleza se redujo en unos 27 billones de metros cúbicos y aunque en la actualidad, la mayoría de los países ejercen una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos, la población mundial sigue creciendo rápidamente, y las estimaciones muestran que, con las prácticas actuales, para 2030 el mundo deberá hacer frente a una brecha del 40 % entre la demanda prevista y el agua disponible (Worl Bank Group, 2023a).

Frente a la inevitable escasez de agua, se prevé una disminución en la producción de energía y en casos extremos, se puede dar lugar a la interrupción de la producción de las centrales, e incluso se contempla la posibilidad del *Stand-by* o cierre de las plantas, lo que podría generar aumentos en los precios de la electricidad, impactando la estabilidad del suministro eléctrico y forzando una dependencia de fuentes energéticas alternativas, como las termoeléctricas, las cuales funcionan a partir de la combustión de combustibles fósiles e implican un impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyendo al cambio climático. Por otra parte, en caso de inundaciones, las centrales hidroeléctricas podrían interactuar con su entorno para reducir el riesgo, controlando el flujo del caudal del río, además, se puede optimizar el despacho energético, maximizando los ingresos económicos al operar a su capacidad máxima, (Grupo ENEL, s.f.) ya sea por un embalse lleno o un flujo de caudal óptimo (Bedoya & López, 2015). No obstante, la ausencia de infraestructura para manejar

inundaciones puede resultar en liberaciones incontroladas de agua o fallas en las represas, llevando a desbordamientos de ríos y ocasionando pérdidas de vegetación, cultivos, fauna, y un impacto negativo en las comunidades afectadas. Durante las últimas dos décadas, al menos 1650 millones de personas de todo el mundo padecieron inundaciones, lo que representa un aumento del 24 % respecto de las décadas anteriores. (World Bank Group, 2023b)

Si bien las centrales hidroeléctricas, como infraestructuras clave en la generación energética, deben estar preparadas para enfrentar los distintos escenarios climáticos provocados por el cambio climático, a medida que el clima experimenta alteraciones, se prevé un aumento en la brecha entre regiones climatológicamente húmedas y secas, en donde «las primeras serán más húmedas, mientras que las segundas serán más secas» (Instituto de Física Atmosférica, 2022) esta tendencia conlleva la posibilidad de una mayor frecuencia de sequías en algunas regiones y, de manera contraria inundaciones de mayor magnitud en otras zonas, lo cual se evidenció a modo de ejemplo con las graves inundaciones en el condado de Midland, Michigan, que resultaron en el colapso de dos presas y pérdidas económicas que alcanzaron los 200 millones de dólares (Sánchez P., 2022). Estos eventos demuestran la necesidad de que las centrales hidroeléctricas se adapten y fortalezcan sus infraestructuras para hacer frente a las distintas realidades climáticas presentes y futuras.

Otro claro ejemplo fue hace 30 años en Colombia con el famoso apagón de 1992 y 1993, cuando el país se enfrentó a racionamientos y suspensiones de electricidad debido a los bajos niveles de los embalses en medio del fenómeno de «El Niño». La luz eléctrica no se fue de manera abrupta, sino que dada la inminente falta de energía, el gobierno programó racionamientos o suspensiones del servicio de electricidad y aunque la causa que terminó por llevar a la crisis fue el fenómeno de «El Niño» que inició en 1991 y redujo los niveles hidrológicos en más de 50%, dejando con menos del 30 % de capacidad a los embalses de las hidroeléctricas, se sumaron muchos más factores como la sequía, la huelga de los empleados de la Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica (CORELCA), la falta de mantenimiento de las unidades térmicas (termoeléctricas), los defectos de los modelos matemáticos en los despachos, y la incapacidad de ampliar la oferta de energía dados los retrasos en el cronograma de construcción de nuevos proyectos hidroeléctricos (Celsia, 2022). Bajo este panorama, el apagón histórico de 1992 y 1993, llevó a los colombianos a vivir bajo racionamientos desde el 2 de marzo de 1992, lo que llevó a la implementación de medidas correctivas. En primer lugar, se corrigió el programa matemático para los despachos de energía, seguido se ejecutó un plan acelerado para mejorar el parque térmico, que estaba muy deteriorado y, además, se establecieron programas de interconexión eléctrica de emergencia, incluyendo uno con Ecuador. Afortunadamente tras las lluvias que llegaron después, las dificultades se aliviaron, reabasteciendo los embalses y finalizando el apagón el 6 de febrero de 1993.

Posteriormente, como respuesta a este evento histórico, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en 1996 introdujo, a través de la Resolución 1 de 1996, el cargo por capacidad, el cual buscaba disminuir el riesgo de inversión tanto para los generadores existentes como para los nuevos inversionistas en el sector energético, con el propósito de satisfacer la demanda a precios eficientes y prevenir racionamientos. Sin embargo, la evaluación de la efectividad de esta medida indicó que, aunque inicialmente resultó acertada al impulsar la inversión, con el tiempo perdió eficacia transformándose en un ingreso adicional que recibían los generadores en lugar de ser un incentivo para la inversión. Este desenlace llevó a la CREG a reemplazarlo diez años después con el cargo por confiabilidad, conforme a la Resolución 71 de 2006 (Restrepo et al., 2011), el cual es un mecanismo de mercado, que tiene como fin garantizar el suministro de energía cuando los recursos hídricos del país escasean, como consecuencia del fenómeno de El Niño. Este mecanismo se compone esencialmente de obligaciones de energía firme (OEF), que corresponden a un compromiso adquirido por los generadores, respaldado por plantas de generación, capaces de producir energía durante condiciones críticas de abastecimiento de agua, de modo que el suministro de energía sea garantizado en el largo plazo a precios eficientes (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2006).

En la actualidad Colombia se destaca por ser poseedora de la sexta matriz de energía más limpia del mundo según el modelo de Simulación y Análisis de la Matriz Energética (SAME) desarrollada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), con un 70 % de su suministro eléctrico generado a partir de fuentes hidroeléctricas según la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ALCOGEN), esta posición privilegiada le otorga la capacidad de aprovechar eficazmente la fuente de energía renovable para impulsar el crecimiento de las fuentes eólica y solar, además de utilizar su potencial de almacenamiento. Según el informe de perspectiva sectorial de Corficolombiana en 2023, Colombia cuenta con una capacidad efectiva neta de generación de 18,777 MW. No obstante, este panorama podría verse alterado por el actual funcionamiento de la hidroeléctrica de EPM, Hidroituango, que ya está inyectando 1200 MW a la red eléctrica colombiana. Esta planta se ha convertido en la más grande del país y está aportando hasta un 17 % de la demanda de energía del país, lo cual hace que este desarrollo proyecte una significativa reducción en los precios de la energía en la bolsa, pasando de \$ 1,500 a \$ 772/kWh (MINEENERGÍA, 2023), convirtiéndose en proyectos esenciales en el contexto energético del país.

Recientemente se han establecido directrices internacionales para abordar el análisis del impacto del cambio climático en proyectos hidroeléctricos (Ministerio de Minas y Energía, 2023), a pesar de la limitada disponibilidad de estudios a nivel global y regional. En este sentido, la OLADE con el respaldo técnico y financiero del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), ha desarrollado conjuntamente un estudio focalizado en la «Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de sistemas hidroeléctricos en países andinos», dicho estudio ha permitido evaluar las repercusiones del cambio climático en la generación hidroeléctrica y analizar la viabilidad de implementar medidas de adaptación. Para este fin, se ha contado con el apoyo de los ministerios encargados de la planificación energética de naciones como Bolivia, Ecuador, Perú, Venezuela y Colombia, recopilando información y datos cruciales para llevar a cabo el estudio (Paz et al, 2019). Esta iniciativa se alinea con esfuerzos políticos y técnicos para fomentar la integración, protección y gestión adecuada de los recursos energéticos de la región, un ejemplo de ello es la misma OLADE, respaldada por 27 países latinoamericanos y del Caribe, incluyendo a Colombia. El estudio mencionado representa una integración de diversas metodologías concebidas para analizar los distintos componentes de un sistema específico, compuesto por el clima, las cuencas de suministro, las centrales hidroeléctricas, el sistema energético en conjunto y la sociedad, esta unión de metodologías permite el análisis de diversos escenarios, incluyendo los climáticos, socioeconómicos y energéticos. Según Paz y otros autores en 2019, este estudio ha desarrollado una metodología que integra todas las técnicas necesarias, lo que posibilita replicar este análisis en otras áreas geográficas y en distintas centrales hidroeléctricas, además, expertos de cada uno de los países involucrados han sido capacitados para aplicar esta metodología con precisión.

El enfoque de modelación de sistemas hídricos aplicado en estos estudios se caracteriza por su complejidad, ya que involucra una amplia diversidad de componentes. Colombia destaca por la variedad de sus hidrosistemas, con cuencas fluviales diversas, abundantes recursos hídricos y una topografía montañosa, por ende, la modelación hidrológica es fundamental para ampliar el entendimiento de estos sistemas hídricos, proporcionando apoyo a la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico, abarcando diversas aplicaciones (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s.f.). A gran escala, existen modelos hidrológicos que contribuyen al análisis de la incertidumbre en la hidrología, simulando diferentes escenarios de caudales basados en observaciones históricas. El modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) es un ejemplo de modelo ecohidrológico semidistribuido basado en ecuaciones matemáticas para simular las interacciones físicas en una cuenca, con más de 20 años de perfeccionamiento (Gassman et al., 2014). SWAT, como modelo continuo de tiempo a largo plazo, está diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación, requiriendo información detallada sobre el clima, la

topografía, la vegetación y las propiedades del suelo, y empleando una interfaz gráfica (ArcGIS) para facilitar su uso (Uribe, 2010).

Cabe resaltar que, el estudio del clima y la energía no solo abarca los factores atmosféricos, sino también el uso de la tierra, que incide en la relación entre precipitaciones, caudales y procesos erosivos, elementos clave para la generación hidroeléctrica (Hatfield et al., 2017). Las modificaciones en los paisajes naturales debido a la urbanización y la deforestación alteran los flujos de agua, lo que impacta significativamente en la eficiencia y sostenibilidad de las centrales hidroeléctricas, por su parte, la simulación de escenarios de uso del suelo se basa en la cartografía proporcionada para el estudio según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estos análisis, vitales para la construcción y planificación de nuevas centrales hidroeléctricas, se vuelven especialmente relevantes considerando el impacto proyectado del cambio climático. Es esencial adoptar una estrategia más preventiva ante inundaciones para futuros proyectos hidroeléctricos, y para las centrales existentes, se requiere un plan de mejoras en la infraestructura para garantizar la seguridad ante inundaciones de mayor magnitud.

En conclusión, en el marco de las discusiones actuales sobre la generación de energía y la transición hacia fuentes renovables, persiste un vacío informativo en torno al rol crucial que desempeñan las termoeléctricas, mientras en el contexto colombiano, las hidroeléctricas representan el 70 % de la energía eléctrica generada, lo cual puede dar una falsa sensación de seguridad en términos de suministro debido a que existen diversos escenarios vulnerables ante eventos climáticos extremos, los cuales podrían afectar significativamente la disponibilidad hídrica para la generación de energía. Por otro lado, considerar un enfoque que priorice únicamente las hidroeléctricas, desestimando las termoeléctricas y demás fuentes de energía, podría conducir a un desabastecimiento energético en el país. En este sentido, el cargo por confiabilidad emerge como un mecanismo esencial para asegurar una red eléctrica estable, permitiendo que las termoeléctricas funcionen en situaciones de crisis y respalden el suministro en momentos de escasez hídrica, lo cual se ha vuelto aún más relevante en el contexto de cambio climático y su impacto en el *World Bank Group*. Es imprescindible que como colombianos no repitamos los errores del pasado y aprendamos de nuestras experiencias a modo de herramienta fundamental para mejorar la eficiencia y dirigirnos hacia un mañana con enfoque en la sostenibilidad, teniendo en cuenta que la construcción del futuro requiere cimientos sólidos, y estos cimientos se forjan reflexionando sobre los errores cometidos previamente.

## Referencias

- Aldana, E., Bernal, I., Vélez, J., Vita, L., González R., Asmar, S., González X. (s.f.). *Colombia Potencia Energética*. Editorial La República S.A.S. Colombia Potencia Energética by DAMG22 - Issuu
- Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (s.f.). *La energía que impulsa a Colombia: Capacidad instalada en Colombia*. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://acolgen.org.co/wp/>
- Bedoya, J. C., Rodas, E., & García, D. F. (2016). *Descripción de los Aspectos Comerciales del Esquema del Cargo por Confiabilidad en el Mercado Eléctrico Colombiano*. *Scientia Et Technica*, 21(1), 5-14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84950584002>
- Bedoya, V., & López, J. (2015). *Modelo para el Control de Inundaciones durante el Fenómeno De "La Niña" utilizando un Embalse Hidroeléctrico*. *Información Tecnológica*, 26 (2), 89-100. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642015000200011>

- Celsia (2022). *Un apagón que nos iluminó*. Reporte Integrado 2022. Recuperado el 27 de noviembre de 2023, de <https://reporteintegrado2022.celsia.com/informes/hechos-relevantes-un-apagon-que-nos-ilumino.pdf>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2006). *Resolución 71 del 03 de octubre de 2006*. Por la cual se adopta la metodología para la remuneración del Cargo por Confiabilidad en el Mercado Mayorista de Energía. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=4014736>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2015, 3 de mayo). *La incertidumbre de los recursos hídricos y sus riesgos frente al cambio climático: herramientas para los tomadores de decisiones de los sectores público y privado*. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://repositorio.cepal.org/items/13cf70dc-5b83-4157-b107-6d45076fd052>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2017, 28 de junio). *La economía del cambio climático: Políticas públicas del siglo XXI en América Latina*. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://www.cepal.org/es/notas/la-economia-cambio-climatico-politicas-publicas-siglo-xxi-america-latina#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20representa%20uno,de%20adaptaci%C3%B3n%20y%20mitigaci%C3%B3n%20de>
- EPM. (s.f.). Central Hidroituango. Un proyecto para todos. Recuperado el 27 de noviembre de 2023, de <https://cu.epm.com.co/institucional/proyectos/hidroituango>
- Escuela Nacional Sindical. (2015). *Fisonomías del miedo: Un paulatino enmudecimiento*. Recuento de luchas y lógicas de la violencia antisindical en el departamento del Atlántico: CUT, Sintraelec, Anthoc, 1975-2012. eLibros Editorial. <https://ens.org.co/wp-content/uploads/2017/02/Memoria-hist%C3%B3rica-Atl%C3%A1ntico-FINAL.pdf>
- Figueroa, A. & Mojica J. (2023, 28 de febrero). *Informe Perspectiva sectorial energía*. Actualidad del sector energético colombiano”. Corficolombiana. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Informe%20Sectorial%20Sector%20El%C3%A9ctrico%2024012023%20VF.pdf/6f0862d8-aacb-40fd-cc3e-0c95916bceba>
- Fundación Endesa. (s.f.). *Funcionamiento de una central hidroeléctrica*. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-hidroelectrica>
- Gassman, P., Sadeghi, A., & Srinivasan, R. (2014). *Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights*. *Journal of Environmental Quality*, 43 (1), 1-8. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2013.11.0466>
- Grupo ENEL (s.f.). *Todas las ventajas de la energía hidroeléctrica*. Recuperado el 10 de noviembre de 2023, de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/ventajas>
- Hatfield, J., Sauer, T., & Cruse, R. (2017). *Chapter One - Soil: The Forgotten Piece of the Water, Food, Energy Nexus*. *Advances in Agronomy*, 143 (1), 1-46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211317300044>
- Instituto de Física Atmosférica. (2022). *El calentamiento global hará que las regiones húmedas lo sean aún más y con un clima más variable*. iAgua. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de



<https://www.iagua.es/noticias/europa-press/calentamiento-global-hara-que-regiones-humedas-lo-sean-aun-mas-y-clima-mas>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *Modelación hidrológica*. Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,representado%20por%20una%20expresi%C3%B3n%20anal%C3%ADtica>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *Monitoreo de suelos y coberturas de la tierra. Coberturas nacionales*. Recuperado el 10 de noviembre de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2023, 6 de junio). *La energía hidroeléctrica en el contexto del cambio climático*. Gobierno de México. Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/la-energia-hidroelectrica-en-el-contexto-del-cambio-climatico?idiom=es>

Ministerio de Minas y Energía. (2013, 8 de febrero). *Colombia apuesta a la aplicación de un estándar mundial de sostenibilidad con el apoyo de la Cooperación Económica y Desarrollo (SECO) de Suiza y la Asociación Internacional de Energía hidroeléctrica (IHA)*. Recuperado el 10 de noviembre de 2023, de URL <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-como-uno-de-los-l%C3%ADderes-latinoamericanos-en-energ%C3%ADa-hidroel%C3%A9ctrica-le-apuesta-a-la-aplicaci%C3%B3n-de-un-est%C3%A1ndar-mundial-de-sostenibilidad-con-el-apoyo-de-la-cooperaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-y-desarrollo-seco-de-suiza-y-la-asociaci%C3%B3n-internacional-de-energ%C3%AD/>

Organización Latinoamericana de Energía. (s.f.). *Simulación y Análisis de la Matriz Energética (SAME)*. Recuperado el día 10 de noviembre de 2023, de <https://www.olade.org/same/>

Ospina, A., & Mosquera, D. (2016). *Cargo por confiabilidad: ¿éxito o fracaso?*. Revista Con-texto, 45 (1), 13-36. <https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/contexto/article/view/4997/5985>

Paz, J., Kelman, R., Navas, S., Okamura, L., & Feliu, E. (2019, 1 de noviembre). *Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de los sistemas hidroeléctricos en los países andinos*. Nota técnica N° IDB-TN-01781. Banco Interamericano de Desarrollo - BID. Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de [https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Vulnerabilidad\\_al\\_cambio\\_clim%C3%A1tico\\_y\\_medidas\\_de\\_adaptaci%C3%B3n\\_de\\_los\\_sistemas\\_hidroel%C3%A9ctricos\\_en\\_los\\_pa%C3%ADses\\_andinos.pdf](https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Vulnerabilidad_al_cambio_clim%C3%A1tico_y_medidas_de_adaptaci%C3%B3n_de_los_sistemas_hidroel%C3%A9ctricos_en_los_pa%C3%ADses_andinos.pdf)

Restrepo, M., Arango, S., & Vélez, L. (2012). *La confiabilidad en los sistemas eléctricos competitivos y el modelo colombiano de cargo por confiabilidad*. Cuadernos de Economía, 31 (56), 199-222. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-47722012000100008](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-47722012000100008)

Sánchez, P. (2021). *La energía hidroeléctrica podría verse amenazada por el aumento de sequías e inundaciones*. iAgua. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/energia-hidroelectrica-podria-verse-amenazada-aumento-sequias-e>

Teotonio, C., Fortes, P., Roebeling, P., Rodriguez, M., & Robaina, M. (2017). *Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: a partial equilibrium approach*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Sustain, 74 (1), 788-799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.002>.

Unidad de Planeación Minero Energética (2015, 7 de octubre). *Atlas del Potencial Hidroenergético de Colombia*. Recuperado el 8 de noviembre, de 2023 de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

Uribe N. (2010, 20 de abril). *SWAT (Solid and Water Assesment Tool), conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Versión SWAT2005. SWAT. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

Worl Bank Group. (2023, 1 Febrero). *What the future has in store, a new paradigm for wáter. Overview for policy makers*. Recuperado el 27 de noviembre de 2023, de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/02/03/water-storage-is-at-the-heart-of-climate-change-adaptation>

Worl Bank Group. (2023, 3 Febrero). *El almacenamiento de agua es un elemento central de la adaptación al cambio climático*. Recuperado el 27 de noviembre de 2023, de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/02/03/water-storage-is-at-the-heart-of-climate-change-adaptation>

## **El rol transformador del diésel: impactos positivos de la generación eléctrica en la Amazonía colombiana**

Laura Mery González Benavidez - Brayan Antonio Giraldo Páez  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

¿Sabes por qué el diésel sigue siendo la chispa que enciende la generación de electricidad? La generación de energía eléctrica (GEE) empleando combustible diésel se ha utilizado durante más de un siglo para energizar hogares e instalaciones donde se utilizan equipos eléctricos y dispositivos electrónicos de uso diario y ocasionales; como lámparas para iluminar la noche. De manera que utilizar este combustible para la GEE sigue siendo una opción muy popular en la actualidad en las Zonas No Interconectadas (ZNI) del territorio colombiano. Pues a pesar de la creciente fama que ha ganado las fuentes de energías renovables, la GEE con diésel aún es una opción confiable y eficiente para muchos lugares aislados, por ese motivo en el presente ensayo, se analizará las razones por las cuales las plantas diésel siguen siendo utilizadas ampliamente en la GEE, así como los desafíos y beneficios que ofrecen; destacando cómo ha mejorado la calidad de vida, el desarrollo socioeconómico y el bienestar de las personas donde se emplea este tipo de GEE. Además, se discutirán los esfuerzos realizados para mejorar la sostenibilidad de estas plantas, con el objetivo de que esta tecnología siga siendo una fuente de energía válida, confiable y respetables con el medio ambiente, para las ZNI de la Amazonia.

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 27-34  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Se dice entonces que la GEE con diésel es considerada un mecanismo eficiente para las ZNI a la red nacional, especialmente las áreas remotas que están muy alejadas de las ciudades principales. Zonas, donde el transporte se realiza por vía fluvial o aérea, y de carreteras escasas, lo que hace que la generación diésel sea una opción atractiva y sostenible (Wilmsmeier & Jaimurzina, 2017). Entonces, se determina que el papel transformador del diésel para la GEE en la Amazonía colombiana se basa fundamentalmente en su capacidad para proporcionar energía confiable y asequible a ZNI, lo que representa desafíos ambientales, sociales y económicos que requieren combinar estrategias limpias para la combustión

diésel y la integración de tecnologías energéticas nuevas (Mantilla González, Duque Daza, & Galeano Urueña, 2008). Razón por la cual, es una tecnología que tiene fuertes críticas negativas ya que solo el costo de transporte de combustible es considerablemente elevado, y ahora sumando el costo propio del combustible lo convierte en una renta mensual fuerte. Además, la combustión interna de estas plantas generadoras es un factor de mayor discusión debido a que estas desechan partículas muy pequeñas residuales que son altamente contaminantes y juegan un papel particular en el Fenómeno el Niño (Puentestar, 2019).

Aunque el diésel presenta grandes desafíos económicos, ambientales y sociales, no deja de ser crucial para abastecer de energía eléctrica a estas áreas aisladas, y que las comunidades cuenten con las mínimas comodidades y beneficios que genera la electricidad. Según el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas), en las ZNI de Colombia, el 86 % de la energía se produce gracias a plantas de generación que usan diésel (Morales, 2022). Este enfoque plantea desafíos ambientales asociados a las emisiones y retos económicos, ya que el costo del combustible puede superar el 150 % del costo del galón en algunas zonas (Morales, 2022). Por tanto, se requiere la combinación de estrategias limpias de combustión de diésel y la integración de tecnologías energéticas nuevas, como la operación en paralelo con energías renovables, para lograr una GEE más sostenible en estas áreas (MADS, 2023). A pesar de la eficiencia de este tipo de plantas, y los desafíos que cargan, ha producido la implementación de estrategias para la sustitución progresiva de la generación diésel en las ZNI.

Como lo menciona el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) desde el 2015, donde destaca que ha identificado oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia, particularmente en las ZNI, donde se busca reemplazar la generación con diésel con energías renovables hasta alcanzar un aporte del 30 % con el fin de reducir los costos de prestación del servicio y las emisiones de gases de efecto invernadero (IPSE, Oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia, 2015). De igual manera busca realizar una transición hacia tecnologías de generación más limpia y que la sustitución del diésel por energías renovables no convencionales sea un aspecto clave en la búsqueda de una generación de energía eléctrica más sostenible en estas zonas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2023). Este avance es significativo para el desarrollo del país y el bienestar de su población.

La GEE diésel es considerada un mecanismo eficiente para las ZNI a la red nacional, especialmente en áreas remotas y alejadas de las ciudades principales. A pesar de su eficiencia, la generación diésel plantea desafíos ambientales y sociales, lo que ha llevado a la implementación de estrategias para la sustitución progresiva de la generación diésel en las ZNI, con el fin de reducir los costos de prestación del servicio y las emisiones de gases. La alta implementación de sistemas de generación diésel se debe al tiempo reducido de instalación en comparación con otros sistemas alternativos. A pesar de los beneficios en términos de provisión de energía confiable y asequible a zonas no interconectadas, se requiere la combinación de estrategias limpias de combustión de diésel y la integración de tecnologías energéticas nuevas, como la operación en paralelo con energías renovables, para lograr una generación de energía eléctrica más sostenible en estas áreas (Bello Torres, Escobar Diaz, Valencia Llanos, XUÉ, & IPSE, 2021)(IPSE, 2015).

En 2007, se estimó que la capacidad de generación instalada en la región amazónica era de 54.521 kW/h, con una participación del 50% de generación por diésel, y que el 89.7% de la generación era propiedad de empresas del estado (Flórez Acosta, Tobón Orozco, & Castillo Quintero, 2009). En comparación con la situación actual, según los datos del IPSE indican que la capacidad instalada en generación diésel es de 265.295 kW, con la cual se benefician 202.623 usuarios en la ZNI. Y la capacidad instalada en generación diésel en la amazonia colombiana es de 77.668 kW, lo que representa aproximadamente el 30% de la generación nacional instalada en zonas no interconectadas generada con diésel (IPSE, Boletín de Datos IPSE Enero 2023, 2023). Esto significa que, en los últimos 16 años, la generación diésel ha llegado a más territorios no interconectados de la región amazónica, aumentando aproximadamente un

46% dichos índices. Este avance es significativo para el desarrollo del país y el bienestar de su población. Por lo tanto, se puede afirmar que la generación de energía eléctrica diésel es una tecnología constructiva para la Amazonia y territorios aislados.

Por otro lado, Claudia Antunes (2023) indicó que, en la región amazónica, la GEE usando combustible diésel es del 50 %, seguido por el gas natural con 21 %, la biomasa con 20 %, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) con un 1 % y energía solar con 0,2 %. Adicionalmente, plantea que las plantas diésel serán responsables del 76,5 % de los gases de efecto invernadero que se emitan en 2024 en la Amazonía colombiana (Antunes, 2023). Sin embargo, la generación diésel sigue siendo una fuente importante de energía en estas zonas, y es importante tener en cuenta como se observó anteriormente que también tiene fuertes impactos ambientales en términos de la contaminación del aire como las emisiones de gases que tienen efecto invernadero, y que provoca efectos en los ecosistemas locales. Por lo tanto, se requiere la combinación de estrategias limpias de combustión de diésel y la integración de tecnologías energéticas nuevas y de esta manera reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las discrepancias en cuanto a lo ambiental sean menos significativas (Balan-Chan & Elizalde-Martínez, 2018).

Una de las alternativas consultadas bajo parámetros beneficio-costos con respecto al diésel que sería significativamente positivo es la implementación de biodiésel (Castro Martínez, Beltrán Arredondo, & Ortiz Ojeda, 2012). También la implementación de energías renovables (Torabi et al., 2023), e incluso invirtiendo en filtros que se pueden adaptar a las máquinas de generación diésel para minimizar los contaminantes expulsados a la atmósfera (Cortés Duarte, 2016). Donde se rescata la eficiencia de los filtros en las máquinas de generación diésel que son un factor importante para mitigar las emisiones de gases que tienen efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes (Osorio Orozco, 2016). Por lo tanto, para reducir las emisiones y mejorar la eficiencia energética de los motores diésel, existen técnicas y prácticas que pueden ser adoptadas en la Amazonía Colombiana. La implementación de tecnologías de combustión limpia, como la inyección de agua y la recirculación de gases de escape, puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Además, mejorar la eficiencia energética de las plantas diésel reducirá el consumo de combustible y las emisiones de material particulado altamente contaminante al aire, logrando finalmente el objetivo de reducir la huella de carbono del planeta (Buckley, 2023).

La adopción de prácticas de mantenimiento y operación adecuadas también puede mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de los motores diésel. Los filtros de combustible del generador diésel minimizan los contaminantes de fluidos en los sistemas de combustible, para proteger los componentes los avances en la filtración de combustible ayudan a cumplir los crecientes requisitos de limpieza del combustible de los motores diésel modernos para obtener un mayor desempeño (Calvo González & Vizquerra Rojo, 2014). Además, la combinación de estrategias limpias de combustión de diésel (Ramírez Velasco et al., 2021) y la integración de tecnologías energéticas nuevas son necesarias para mitigar los GEI y otros contaminantes (Paredes & Pozo, 2020). La seguridad en el mantenimiento es crucial para proteger a los trabajadores y la maquinaria. El trabajo de mantenimiento difiere de las operaciones diarias, y los técnicos de mantenimiento están frecuentemente en contacto directo con las máquinas en las que trabajan, lo que podría generar riesgos para la seguridad. Las precauciones de seguridad en el mantenimiento son necesarias para mantener seguros a los trabajadores, proteger la maquinaria y mantener la tranquilidad de los trabajadores. En la industria, la adopción de modelos de optimización de alcance, duración y costo en paradas de planta es relevante para mejorar el desempeño de dichas plantas. Estas prácticas incluyen la gestión de la triple restricción clásica: alcance, duración y costo (Trujillo Duque, , 2023).

Por otro lado, un estudio de caso realizado por Silva et al. (2015) analiza el impacto técnico, económico y ambiental de la sustitución de combustóleo por gas natural para la generación de energía en Manaus, la capital de Amazonas en Brasil (Trujillo Quintero, Losada Cubillos, & Rodríguez Zambrano, 2017)(Silva

et al., 2015). El estudio demuestra que la sustitución del combustóleo para generación eléctrica por gas natural tiene un impacto positivo en el medio ambiente, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre y partículas emitidas a la atmósfera (Silva et al., 2015). Además, se muestra que el uso de gas natural reduce el costo de generación de electricidad en la planta, lo que contribuye al crecimiento económico de la región. El estudio también proporciona información detallada sobre las características de la planta, el costo del combustible, el consumo de fuentes de energía y la eficiencia de la transformación energética (Silva et al., 2015). En conclusión, el estudio de caso de Silva et al. (2015) demuestra que la sustitución del combustóleo por gas natural en la generación de energía en Manaus, la capital de Amazonas en Brasil tiene un impacto positivo en el medio ambiente y la economía local.

El uso de combustibles fósiles tiene impactos ambientales significativos, incluyendo la emisión de GEI y contaminantes que afectan la salud humana. Reducir el uso de combustibles fósiles puede tener varios beneficios para la salud y el medio ambiente (Cubillos Meza, y otros, 2011). La reducción de los contaminantes del aire provenientes de la quema de combustibles fósiles, como partículas finas, gases de azufre y óxidos de nitrógeno, puede mejorar la salud pública. Además, la disminución de los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, puede contribuir a mitigar el cambio climático, reduciendo el estrés calórico, las tormentas más poderosas, las sequías e inundaciones extremas, y la propagación de enfermedades infecciosas (Citizens' Climate Lobby, 2023). La transición hacia fuentes de energía renovable, como la solar, eólica o hidráulica, puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar sus impactos negativos en el medio ambiente. Aunque los combustibles fósiles seguirán siendo parte del sistema energético mundial durante las próximas décadas, es esencial mantener un debate abierto y transparente sobre su papel en los sistemas energéticos sostenibles.

Cabe mencionar que Colombia se ha fijado como objetivo reducir su dependencia de combustibles fósiles, incluido el diésel, y hacer la transición a fuentes de energía renovables (UPME, 2023). Y, por lo tanto, en cierta medida es acertado decir que la generación eléctrica con diésel es importante para las comunidades aisladas, ya que de esto depende la economía del sector y el crecimiento en cuanto a salubridad, incremento de hospitales y seguridad social. Para que una región sea próspera y rica económicamente, debe tener fundamentalmente servicios públicos como aseo, energía eléctrica, agua potable, comunicaciones y transporte, y por ende surgen más desafíos y oportunidades de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y autónomas, con controles más sofisticados y con mayor eficiencia energética (Levy et al., 2021). Llevando a la construcción denominadas de microrredes que abastecen estos pequeños poblados de las regiones aisladas de la amazonia colombiana, proporcionando muchos beneficios a las comunidades (Manassero et al., 2020).

La generación eléctrica con diésel ofrece beneficios significativos en las zonas aisladas de la Amazonía Colombiana, como la provisión de energía confiable y asequible. Esto se debe a que el servicio de energía eléctrica cuenta con una mayor tasa de confiabilidad, siempre y cuando se realice un mantenimiento y uso adecuado de las plantas. Además, proporciona un servicio eficiente, de fácil acceso y con gastos tolerables en el combustible. La generación eléctrica con diésel es una opción sostenible y atractiva en zonas donde el transporte es principalmente fluvial o por carretera (Wilmsmeier & Jaimurzina, 2017). Además, contribuye al crecimiento económico y al desarrollo socioeconómico de las comunidades aisladas, mejorando la calidad de vida al proporcionar servicios públicos como energía eléctrica, agua potable, comunicaciones y transporte. Incluso, la demanda energética crece significativamente cada año. Además, que ha incrementado de manera significativa en la demanda de energía eléctrica en las zonas no interconectadas, lo que resalta la importancia de explorar y desarrollar diversas fuentes de generación de energía para satisfacer estas necesidades (Urrego, 2021).

El acceso a la energía eléctrica en zonas aisladas puede mejorar significativamente la calidad de vida de las personas y aumentar la seguridad en las comunidades. Algunos de los beneficios incluyen: Mejora en la iluminación y seguridad: La conexión a la energía eléctrica permite a los habitantes de zonas

aisladas iluminar sus hogares y áreas comunes, lo que aumenta la seguridad al permitirles verificar a mayor distancia visible el terreno que los rodea, evitando posibles ataques de animales o personas hostiles (Vanegas Chamorro, 2018). Mejora en la comunicación: La energía eléctrica permite el uso de dispositivos comunes, como teléfonos y computadoras, lo que facilita el contacto con otras personas a través de llamadas o mensajes (Garcés Arango, 2021). Impacto en la seguridad ciudadana: La energía eléctrica puede mejorar la seguridad en las comunidades al reducir la tasa de criminalidad, como se ha demostrado en comunidades que han mejorado su alumbrado público (Arango, 2021). Acceso a servicios básicos: La conexión a la energía eléctrica facilita el acceso a servicios básicos como el agua, la alimentación y la atención médica (Urrego, 2021). Desarrollo económico: La energía eléctrica puede impulsar el desarrollo económico en zonas aisladas, permitiendo a las familias tener acceso a herramientas y servicios que facilitan su trabajo y vida diaria (Nolasco-Benitez & Gomis-Bellmunt, 2021).

La generación eléctrica con combustión de diésel en la Amazonía Colombiana cumple un rol importante en la mejora del acceso a la energía eléctrica y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles mediante métodos de filtrado rigurosos en zonas no interconectadas (MinEnergía, 2023). Sin embargo, es necesario abordar la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y autónomas, como el biodiésel y otras energías renovables, para mitigar los impactos ambientales y sociales de la generación eléctrica con diésel. Para lograr una transición justa y sostenible hacia un sistema energético más limpio y equitativo en la Amazonía Colombiana, es fundamental adoptar técnicas y prácticas que reduzcan las emisiones y mejoren la eficiencia energética de los motores diésel. Además, es crucial promover la competencia, la transparencia y la regulación en el sector eléctrico para garantizar un acceso a la energía eléctrica sostenible y equitativo para todo el territorio colombiano (UPME, 2023).

Como también la capacidad de generación diésel en zonas no interconectadas en la Amazonía colombiana ha aumentado significativamente en los últimos años, lo que ha permitido que más territorios no interconectados tengan acceso a la energía. Sin embargo, es importante seguir trabajando en la implementación de soluciones energéticas sostenibles para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir los impactos ambientales generados por los mismos. A largo plazo generarían impactos de ámbito social, ya que altera el bienestar de una población. También cabe señalar que la generación eléctrica con diésel es una opción importante para la provisión de energía eléctrica en las zonas aisladas de la Amazonía Colombiana, lo que contribuye al crecimiento económico y el desarrollo socioeconómico de las comunidades aisladas y mejora la calidad de vida de las personas al proporcionar servicios públicos como energía eléctrica, agua potable, comunicaciones y transporte. Dando ventajas de realizar acciones y labores en menos tiempo, con menos esfuerzos, y que cuenten con esa disponibilidad para enriquecer otras metas (Silvara Guerrero & García Cardona, 2018).

La generación eléctrica con diésel y la energía solar ofrecen soluciones viables para las zonas aisladas de la Amazonía Colombiana, cada una con sus propias ventajas y consideraciones. Pues el acceso a la electricidad mejora significativamente la calidad de vida de las personas en zonas aisladas y aumenta la seguridad en las comunidades (Garcés Arango, 2021). La GEE con diésel es un tema de controversia por los efectos con respecto al calentamiento global, y los costos elevados. Pero el punto más fuerte a favor que tiene es su facilidad de implementación que se debe al menor tiempo de instalación en comparación con otros sistemas alternativos. Por ejemplo, en el municipio de Puerto Leguizamo – Putumayo, su red eléctrica es suministrada por generación diésel, al igual que en el departamento del Guaviare en Miraflores, como son municipios relativamente pequeños, la demanda va a ser menor a comparación con la demanda energética de Manizales, entonces los equipos son relativamente chicos, y facilitan el transporte, manejo e instalación de las plantas generadoras que funcionan con hidrocarburos.

Por lo tanto, la constante búsqueda de soluciones energéticas sostenibles que beneficien a las comunidades aisladas y minimicen el impacto ambiental, económico y social es fundamental para mejorar el acceso a la energía eléctrica en áreas aisladas. Por ello es crucial evaluar cuidadosamente las opciones energéticas y seleccionar la mejor opción disponible de GEE que beneficien gran parte de la

población desconectada de la red nacional y sin dejar de lado el objetivo primordial de minimizar el impacto ambiental, económico y social (Twenergy, 2019). Para terminar, es importante contar con un mayor alcance energético para hogares e instalaciones que cuenten con el servicio de energía eléctrica para su uso, lo cual va a aumentar las posibilidades de desarrollarse proyectos y emplear equipos eléctricos y electrónicos que realizan procesos sistematizados. Esto proporciona mejores posibilidades de desarrollo económico y mejora el acceso a la energía eléctrica en áreas aisladas.

## Referencias

- Antunes, C. (9 de agosto de 2023). *Cumbre amazónica: La sociedad quiere frenar el petróleo, pero en Brasil la tendencia es explotarlo más*. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de SUMAÚMA: <https://sumauma.com/es/cupula-amazonia-sociedade-quer-barrar-petroleo-brasil-tendencia-explorar-mais/>
- Balan-Chan, R. M., & Elizalde-Martínez, I. (marzo-abril de 2018). Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrot ratamiento. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIT)*, 6(31), 1-15. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-97532018000100005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-97532018000100005)
- Bello Torres, A. J., Escobar Diaz, A., Valencia Llanos, J. A., XUÉ, U. F., & IPSE. (septiembre de 2021). *Soluciones solares fotovoltaicas híbridas implementadas*. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de CCENERGÍA: <https://www.ccenergia.org.co/wp-content/uploads/2021/09/Articulo-sistemas-hibridos.pdf>
- Buckley, J. (28 de marzo de 2023). *Lograr la máxima eficiencia en la tecnología diésel*. (C. Peters, Editor) Recuperado el 22 de octubre de 2023, de Construcción latinoamericana: <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/lograr-la-maxima-eficiencia-en-la-tecnologia-diesel/8027638.article>
- Calvo González, A. E., & Vizquerra Rojo, V. (2 de mayo-agosto de 2014). Ciclo combinado Diesel-Vapor como repotenciación de una central termoeléctrica: caso de estudio. *Ingeniería Energética*, 35(2), 1-10. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329130985005.pdf>
- Castro Martínez, C., Beltrán Arredondo, L. I., & Ortiz Ojeda, J. C. (septiembre-diciembre de 2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética? *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 8(3b). Recuperado el 19 de octubre de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177010.pdf>
- Citizens' Climate Lobby. (30 de agosto de 2023). *Impactos salud de reducir el uso de los combustibles fósiles*. Recuperado el 27 de octubre de 2023, de Políticas Climáticas: <https://citizensclimatelobby.org/es/blog/politicas/impactos-salud-de-reducir-el-uso-de-los-combustibles-fosiles/>
- Cortés Duarte, M. C. (2016). *Eficiencia de remoción de material particulado usando filtros de partículas en vehículos diésel del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá D.C*. Bogotá. Recuperado el 19 de octubre de 2023, de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57778>
- Cubillos Meza, A. I., Estenssoro Saavedra, F., Zolezzi Cid, J. M., Tokman Ramos, M., Núñez Muñoz, R., Águila Mancilla, E., . . . Sunkel, O. (2011). *Energía y medio ambiente, una ecuación difícil para América Latina : los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. Santiago de Chile: IDEA-USACH. doi:9789563031188 (pbk.)



- Flórez Acosta, J. H., Tobón Orozco, D. F., & Castillo Quintero, G. A. (enero-junio de 2009). ¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia? Un análisis de la estructura institucional. *Pontificia Universidad Javeriana*, 22(38), 219-245. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de <https://hdl.handle.net/10495/3665>
- Garcés Arango, E. (21 de septiembre de 2021). *Alternativas de gestión para el suministro eléctrico sostenible en Zonas No Interconectadas*. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80271>
- González, J. M. M., Daza, C. A. D., & Ureña, C. H. G. (2008). Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería*, 44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43004411>
- IPSE. (octubre de 2015). *Oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia*. (MInMinas, Ed.) Recuperado el 25 de octubre de 2023, de Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas - IPSE: <https://www.mzv.cz/file/1638464/ipse.pdf>
- IPSE. (30 de enero de 2023). Boletín de Datos IPSE Enero 2023. *Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE)*, 12. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de <https://ipse.gov.co/blog/2023/01/30/boletin-de-datos-ipse-enero-2023/>
- Levy, A., Messina, D., & Contreras Lisperguer, R. (31 de diciembre de 2021). *Definiciones del sector eléctrico para la incorporación de las energías renovables variables y la integración regional en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 21 de octubre de 2023, de cepal: <https://hdl.handle.net/11362/47656>
- MADS. (2023). *Plan de acción de mitigación del sector energético, energía eléctrica*. (Minambiente, Ed.) Recuperado el 11 de noviembre de 11, de Planes Sectoriales de Mitigación: [https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/planes\\_sectoriales\\_de\\_mitigaci%C3%B3n/PAS\\_Energia\\_Electrica\\_-\\_Final.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/planes_sectoriales_de_mitigaci%C3%B3n/PAS_Energia_Electrica_-_Final.pdf)
- Manassero, U., Loyarte, A. S., & Salvetti, E. (2020). Diseño y evaluación de una micro-red con almacenamiento y generación híbrida diésel-fotovoltaica en un distrito rural. 2020 IEEE Congreso Bienal de ARGENCON 2020 - 2020 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON <https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505445>
- Mantilla González, J. M., Duque Daza, C. A., & Galeano Urueña, C. H. (29 de enero de 2008). Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(44), 97-110. Recuperado el 23 de octubre de 2023, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43004411>
- MinEnergía. (9 de octubre de 2023). *Diagnóstico base para la transición energética justa*. Recuperado el 27 de octubre de 2023, de Ministerio De Minas Y Energía (MME): [https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2.\\_Diagn%C3%B3stico\\_base\\_para\\_la\\_TEJ.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2._Diagn%C3%B3stico_base_para_la_TEJ.pdf)
- Morales, D. (26 de octubre de 2022). *Se requieren 7 billones de pesos para electrificar a Colombia*. Recuperado el 20 de octubre de 2023, de Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/gobierno/electricidad-los-retos-del-gobierno-en-materia-de-conectividad-electrica-573161>
- Nolasco-Benitez, E., & Gomis-Bellmunt, O. (27 de agosto de 2021). ACCESO A LA ELECTRICIDAD Y DESARROLLO RURAL. *CienciAmérica: Revista de Divulgación Científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 10(3). Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/367/3672541005/html/>
- Osorio Orozco, Á. M. (30 de noviembre de 2016). *Evaluación prototípica de como la electricidad puede contribuir al desarrollo de las zonas no interconectadas*. (I. d. [42], Ed.) Recuperado el 23 de octubre de 2023, de

- Repositorio institucional-Biblioteca digital UN:  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58136>
- Paredes, L., & Pozo, M. (2020). Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir Emisiones de CO<sub>2</sub>. *Revista Técnica «Energía»*, 16(2). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.356>
- Puentestar, J. S. (febrero de 2019). *Grupos estacionarios diésel y la contaminación ambiental en la florícola Piganflor de la comunidad de Piganta*. Recuperado el 23 de octubre de 2023, de Repositorio institucional UCE: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/17988>
- Ramírez Velasco, C. A., PEREZ ORTEGA, D. J., Pereira Martínez, R. I., & Bolaños Alomia, F. A. (2021). Análisis comparativo de emisiones de co<sub>2</sub> de un motor empleando diésel y biodiesel. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), 127-145. <https://doi.org/10.22490/21456453.3603>
- Silva, W. F., Campos, L. M. S., Moya-Rodríguez, J. L., & Cabral-Leite, J. (2015). Impacto económico y ambiental del uso del gas natural en la generación de electricidad en El Amazonas: Estudio de caso. (Colombia), 82(190), 89-95. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43178>
- Silvara Guerrero, J. A., & García Cardona, M. P. (13 de diciembre de 2018). *Energías alternativas en la amazonia colombiana*. (U. N. UNAD, Editor) Recuperado el 21 de octubre de 2023, de Repositorio Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/23835>
- Torabi, R., Gomes, Á., & Morgado-Dias, F. (2023). Electricity, Transportation, and Water Provision duración y of 100% Renewable Energy for Remote Areas. *Energies*, 16(10). 2023, de <https://doi.org/10.3390/en16104146>
- Trujillo Duque, J. (3 de junio de 2023). Propuesta de adopción de modelos de optimización de alcance, duración y costo en paradas de planta. *Predictiva21*, 14(2), 109-122. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de <https://es.linkedin.com/pulse/propuesta-de-adopci%C3%B3n-modelos-optimizaci%C3%B3n-alcance-duraci%C3%B3n>
- Trujillo Quintero, H. F., Losada Cubillos, J. J., & Rodríguez Zambrano, H. (5 de julio-diciembre de 2017). Amazonia colombiana, petróleo y conflictos socioambientales. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(20), 209-223. doi:<http://dx.doi.org/10.21830/19006586.181>
- Twenergy. (15 de febrero de 2019). *Electrificación sostenible en zonas rurales de Colombia*. (Twenergy) Recuperado el 22 de octubre de 2023, de *Energías renovables*: <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/electrificacion-sostenible-en-zonas-rurales-de-colombia-2514/>
- UPME, U. d. (julio de 2023). *Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica - El PIEC 2019-2023*. (UPME, Ed.) Recuperado el 22 de octubre de 2023, de Ministerio de Minas y Energía: [https://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC\\_2019-2023\\_VF.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC_2019-2023_VF.pdf)
- Urrego, A. (4 de septiembre de 2021). Demanda de energía eléctrica en zonas no interconectadas ha incrementado 25,9%. *La República*, pág. 2. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de <https://www.larepublica.co/economia/demanda-de-energia-electrica-en-zonas-no-interconectadas-ha-incrementado-25-9-3227491>
- Vanegas Chamorro, M. (7 de septiembre de 2018). La energía, motor de desarrollo de la humanidad. (U. d. atlántico, Ed.) *Prospectiva*, 16(2). doi:<https://doi.org/10.15665/rp.v16i2.1681>
- Wilmsmeier, G., & Jaimurzina, A. (2017). Eficiencia energética y movilidad eléctrica fluvial: soluciones sostenibles para la Amazonía. (1), 1-11.

# **Impacto ambiental y desarrollo energético: un análisis comparativo entre termoeléctricas e hidroeléctricas a lo largo de la historia**

Carlos Arturo Trujillo Vidales – David Alejandro Velásquez Ramos  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Desde el inicio de la historia para lo que precedió al ser humano actual se han evidenciado diversos avances significativos tanto en el área científica como tecnológica ubicados en las distintas etapas del desarrollo humano, como el uso del entorno como herramientas y la formación de tribus, la creación de escritos ubicado en la edad antigua. Un acontecimiento crucial que dejó su marca en la Edad Media fue la llegada al continente americano. Posteriormente, la Edad Moderna trajo consigo un evento de gran importancia que alteró drásticamente el mundo conocido: la Revolución Científica. Este fenómeno impulsó notables avances en física, química y astronomía, generando aceleración en áreas como la medicina, las telecomunicaciones, la informática y el transporte. La Revolución Industrial, que tuvo lugar en el siglo XVIII, supuso una auténtica transformación de la sociedad, con la mecanización de la producción, nuevas fuentes de energía, como el vapor, y un enorme desarrollo tecnológico que aumentó exponencialmente las capacidades humanas de los cuales se hablara más adelante, por último, nos encontramos en la etapa actual, la Edad Contemporánea, caracterizada por notables avances científicos y tecnológicos que continúan moldeando nuestro mundo (La Agencia de la ONU para los Refugiados - ACNUR, 2018).

GIPeM 05, diciembre (2023)  
pp. 35-42  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Sin embargo, para lograr estos desarrollos mencionados anteriormente, se ha generado un impacto en el medio ambiente, ya sea por la agricultura invasiva o la cacería, o por otras prácticas un poco menos cotidianas como la minería, el ser humano tiene un largo historial de impacto ambiental, esto gracias a que la mínima interacción con el entorno conlleva un impacto ambiental (Rodríguez, 2019), siguiendo una “ley” que dice: “Para obtener algo determinado, se debe entregar un equivalente de cantidad y composición”. En este contexto, para obtener estos desarrollos, es necesario sacrificar una parte del medio ambiente, y tarde o temprano, se pagará el precio de estas acciones. Evidentemente el impacto ambiental generado

en la antigüedad no se puede comparar con el que se genera hoy en día, esto se observa con un aumento del 106 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 1980 a 2014, esto gracias a todas las comodidades a las que estamos acostumbrados, una de estas, o la de nuestro interés, “la generación y el consumo de energía eléctrica”. La industria energética representa alrededor del 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, dicho porcentaje abarca la producción de combustibles, extracción de gas natural y la generación de energía eléctrica (Gallego, 2021) Esta última faceta se asocia a que la primera central eléctrica de la historia fue una termoeléctrica, la cual tiene un fuerte impacto ambiental en comparación a otras formas de generación de energía eléctrica (Iberdrola, 2023). Cabe resaltar que, a pesar de su notable impacto, es una tecnología que se sigue usando hasta el día de hoy.

Para poder comprender un poco más los inicios de esta tecnología es necesario remontar hasta el año 1760, en Gran Bretaña, donde dio inicio la primera revolución industrial y con esta, la llegada de las primeras máquinas a vapor (Villas-Tinoco, 2012). Estas máquinas aprovechan la energía expansiva del vapor de agua con el fin de generar un movimiento, estas funcionan mediante la combustión de carbón para provocar el cambio de fase en el cuerpo de trabajo (Equipo Editorial, Etecé, 2023). Este proceso liberaba una considerable cantidad de gases de combustión al ambiente, los cuales generan un impacto ambiental significativo. Teniendo en cuenta que muchas industrias de la época habrían adquirido dichas máquinas con el objetivo de maximizar su producción en el momento, hoy en día se sabe que gracias a esto la concentración de CO<sub>2</sub> aumento de 284 ppm a 300 ppm (WWF, 2014). Ahora la pregunta que surge es, ¿fue equivalente hacer este intercambio?

A simple vista, se pueden identificar ciertos problemas causados por el funcionamiento de las termoeléctricas, el más evidente de estos es la liberación de gases contaminantes y de efecto invernadero al medio ambiente, debido al modo de operar de las mismas, dichos gases pueden variar desde óxidos hasta metales pesados, los cuales afectan la calidad del aire y contribuyen a la contaminación ambiental. Además, estas emisiones pueden generar impactos negativos en la salud de las personas, provocando diversas afecciones (Soto, 2020). Es importante explorar a profundidad estas problemáticas y poder desarrollar soluciones en pro de la salud pública.

Con lo mencionado, en el mismo año de la creación de la termoeléctrica, específicamente en el año 1882, surge la primera hidroeléctrica del mundo, viéndose como una alternativa a las termoeléctricas ya que sus contaminantes no consisten en exposición atmosférica, sin embargo, no se debe ignorar el hecho de que aun aportan un impacto ambiental. Como se menciona anteriormente, para poder obtener, algo se debe entregar un equivalente, siendo que las hidroeléctricas no contamina el medio ambiente de forma atmosférica, se puede evidenciar que el cuerpo de trabajo usado para la generación de energía eléctrica puede verse afectado por el medio en el que se distribuye.

Una de las formas poco conocida en las que se genera contaminación por hidroeléctricas es la suspensión de material orgánico que llega a los embalses, debido a que éstos pueden permitir la proliferación de microorganismos los cuales al momento de hacer una bio digestión generan metano el cual se libera al medio ambiente provocando así un efecto invernadero, además estos gases de metano pueden afectar toda la biodiversidad que se encuentra en el agua (Oviedo-Ocaña, 2018), a pesar de esto, se ha implementado un plan de mitigación contra este tipo de contaminación que son aplicables en el momento que se producen. Es necesario abordar estos problemas no tan conocidos y hallar una solución para poder asegurar la sostenibilidad ambiental de la hidroeléctricas.

Aunque se está comprometiendo un recurso tan esencial como el agua, es necesario tener en cuenta que la eficiencia de generación eléctrica que tienen las hidroeléctricas supera por mucho a la eficiencia de las termoeléctricas, por esto, se puede considerar como un intercambio equivalente entre el impacto ambiental y la producción de energía eléctrica, ya que los efectos adversos son reversibles al momento, a diferencia de los contaminantes atmosféricos. Estos últimos, en cambio, requieren de métodos de tratamiento, los cuales no aseguran una gran eficiencia, lo que implica la liberación de gases nocivos al

medio ambiente. En la actualidad, garantizar la sostenibilidad en la producción de energía eléctrica es una preocupación a nivel global, pues Shahariar en su estudio afirma que “Reducir el agotamiento de la energía procedente de la generación de energía puede reducir las emisiones y contribuir a la sostenibilidad.” (Hossain, y otros, 2020). Teniendo en cuenta que la generación de electricidad es importante en la actualidad, se busca activamente mejorar la eficiencia de los sistemas utilizados, donde lo principal es encontrar nuevas herramientas que ayuden al medio ambiente, al ser humano y en general al ecosistema en el que habitamos. Es necesario resaltar que, más allá de solo cubrir la nueva demanda energética, estas nuevas herramientas minimicen el impacto ambiental.

En este contexto, las plantas hidroeléctricas representan un ejemplo destacado de sostenibilidad en la generación de electricidad, aprovechando la energía potencial gravitatoria del agua de un embalse. El agua almacenada fluye por una tubería hacia turbinas, cuyo movimiento rotatorio acciona un generador que produce electricidad (Ramos-Gutiérrez & Montenegro-Fragoso, 2012). Los recursos básicos utilizados en este tipo de plantas son el agua y su caudal. Así, las hidroeléctricas representan una forma sostenible de obtener electricidad (Ente nacional para la energía eléctrica - ENEL, s.f.) Estas plantas alcanzan un rendimiento cercano al 90 %, ya que aprovechan la energía potencial del agua para producir electricidad de forma renovable. Al transformar la fuerza del agua en energía eléctrica, evitan la emisión de contaminantes atmosféricos como serían los gases de combustión presentes en una planta termoeléctrica. Además, reducen la dependencia energética exterior al utilizar un recurso abundante e ilimitado actualmente. Las hidroeléctricas pueden responder rápidamente a los picos de demanda eléctrica, por lo que contribuyen a garantizar la seguridad del suministro. Algunas compañías apuestan por esta tecnología desde sus inicios, convencidas de sus beneficios ambientales y estratégicos (Chica-Romero, 2017)

Aunque generar electricidad en plantas hidroeléctricas tiene numerosos beneficios como los mencionados anteriormente, el manejo de caudales también conlleva desafíos. Uno de ellos es la acumulación de sedimentos en los embalses, que disminuye su capacidad de almacenamiento. Además, puede incrementar los costos operativos al bloquear o dañar equipos como compuertas, tuberías y turbinas. Asimismo, perturba el flujo natural del agua, dificultando su control y reduciendo su calidad. Por lo que se han generado estudio que evidencian como retener estos sedimentos y reducir este impacto negativo que contiene. Según estos estudios las estrategias más utilizadas son la reducción del aporte de sedimentos aguas arriba del embalse, el control del trayecto de sedimento o enrutamiento y remoción de depósitos de sedimento (Montañez-Guillén, 2017). Entender de forma acertada estos desafíos, es esencial para lograr optimizar la sostenibilidad y eficiencia de las plantas hidroeléctricas. Para la primera estrategia, Angela Fuentes (Fuentes-Norambuena, 2018) en su estudio realizado presenta que para reducir el aporte de sedimentos se puede optar por 2 estrategias donde la primera sería el control de erosión con vegetación, el cual se enfoca en reforestar áreas sin vegetación o erosionadas permitiendo disminuir la erosión de la tierra y por ende el aporte de sedimentos, el otro camino es la construcción de tanques de retención las cuales son estructuras construidas transversalmente en los cauces de los afluentes aguas arriba lo que permite que disminuya la velocidad que lleva el caudal y así retener los sedimentos que vayan en el flujo antes de que lleguen al embalse. Para el control del trayecto de sedimento existen varias formas, según el Ing. Juan Portalatín (L.-Morris & Portalatín, 2015) las técnicas efectivas son el bypass y la descarga de densidad siendo métodos pasivos y continuos o el flushing y sluicing siendo estos métodos de operación activos y dependiendo de las crecidas que se ocasionen en la operación. Por último, para la remoción de depósitos de sedimento se tienen técnicas de dragado de tipo hidráulico o hidrosucción, mecánico, desfogue de corrientes densas, remoción de sedimentos durante avenidas y extracción por chorros de agua. Aunque hay más técnicas estas resultan ser las eficientes para la remoción de sedimentos (García-Camacho, 2005).

Las plantas termoeléctricas constituyen una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, por lo que es necesario analizar y mejorar sus sistemas de manejo de residuos a fin de disminuir su impacto ambiental (Lifeder, 2022). El tipo y cantidad de residuos generados depende en gran medida

del combustible utilizado. El carbón es uno de los que producen mayor cantidad de residuos sólidos como cenizas. Los combustibles fósiles como diésel y gas natural generan menos residuos sólidos pero importantes emisiones gaseosas con óxidos de nitrógeno, azufre y material particulado (Cavaleri, 2019). Un inadecuado manejo de los gases de combustión provoca graves daños ambientales. Es clave que las termoeléctricas cuenten con modernos sistemas de captura de material particulado y control de óxidos de nitrógeno. Así mismo, las cenizas deben disponerse de forma segura para evitar la contaminación de suelos y aguas subterráneas, por lo que la implementación de nuevas tecnologías de control de emisiones y una correcta disposición de residuos sólidos es clave para disminuir el impacto de las termoeléctricas y avanzar hacia un principal camino energético más sustentable (Gestion en Recursos Naturales - GRN, 2015).

Enfrentando el desafío de reducir la contaminación de las termoeléctricas, el carbón, uno de los contaminantes más fuertes, es necesario conocer técnicas que ayuden a disminuir su contaminación, de acuerdo con (Ferrer-Mendoza, 2018), en las plantas termoeléctricas que utilizan carbón como combustible, el manejo de residuos se centra en el tratamiento de cenizas, así como en los sistemas de control de emisiones gaseosas. Las cenizas generadas se recolectan mediante precipitadores electrostáticos o filtros de mangas y luego son dispuestas en celdas de confinamiento diseñadas para prevenir la lixiviación de contaminantes y además para el control de gases, se utilizan reactores con caliza para la reducción de SO<sub>2</sub>, filtros para material particulado, y sistemas de reducción catalítica selectiva que permiten disminuir los óxidos de nitrógeno que se generan en estos procesos que utilizan carbón como fuente. Estas prácticas son esenciales para poder mitigar el impacto generado por el uso de este combustible en las termoeléctricas y poder avanzar hacia la sostenibilidad ambiental.

La construcción de plantas hidroeléctricas y termoeléctricas conlleva impactos sociales significativos, ya que estos proyectos pueden llevar a la deforestación, afectar la vida acuática, emitir gases de efecto invernadero y llegar a desplazar poblaciones (Osorio-Londoño, 2017). generando resistencias, protestas y movilizaciones por parte de los grupos afectados, que reclaman una mayor participación en el proceso de toma de decisiones, y compensación por los daños causados gracias a los proyectos. Sin embargo, estos impactos negativos están plenamente identificados, lo que facilita prevención en la planificación de cualquier proyecto de esta magnitud. De esta manera, se abren las puertas a estrategias más inclusivas con las partes afectadas, donde se busquen soluciones que minimicen los impactos sociales y ambientales, permitiendo el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica.

Además del impacto social, estas plantas también tienen impactos económicos tanto positivos como negativos. Por un lado, contribuyen significativamente a la generación de empleos y ayudan a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, aprovechando recursos renovables, como el agua, como es el caso de las plantas hidroeléctricas. Sin embargo, estos beneficios deben ser evaluados en relación con los costos económicos asociados a la construcción, operación y mantenimiento de estas plantas. La inversión inicial y los gastos permanentes deben ser analizados en su rentabilidad a largo plazo y su contribución al desarrollo sostenible, evaluar estos impactos económicos es fundamental para la toma de decisiones y garantizar un avance positivo.

La estrecha conexión entre los temas de la economía y la sociedad, crea la necesidad de analizar más a fondo estos proyectos en el contexto colombiano donde la política juega un papel muy crucial y los intereses económicos son los más llamativos y suelen primar sobre otros factores. Es claro ver que hay plantas que se construyen debido a que se requiere en el país, pero el manejo que se les da puede no ser el óptimo ya que las normativas y regulaciones orientan el desarrollo del sector eléctrico pueden que influyen en dónde y cómo se construyen estas plantas. A diferencia de algunas políticas mundiales, las políticas locales se guían de las amistades y los contactos impidiendo así un desarrollo óptimo del sector eléctrico y de la población colombiana en general, una muestra de esto es el desarrollo de las energías renovables en Alemania en las últimas décadas, donde se evidencia una mayor integración de la misma en la generación y los mercados energéticos (Lauber & Jacobsson, 2015)

Dejando esto claro es bueno analizar la historia que se presenta en nuestro país, pues para el caso de las plantas hidroeléctricas, se tiene el ejemplo de la famosa represa de Hidroituango, la cual es una de la que genera controversia en Colombia por los múltiples casos que se presentan donde el mal manejo que se tiene con esta planta ha traído consigo daños tanto ambientales como sociales, pues para el tema ambiental se tiene la vez que al no abrir la compuerta género que el río del Cauca se secase, además a mediados de 2018 fueron evacuadas decenas de personas de tres departamentos ante el riesgo de posibles inundaciones causadas por problemas en la estructura de la represa y la crecida del caudal del Cauca viéndolo del lado social. Estas problemáticas surgen debido a lazos políticos que hacen los contratos, pues se toman parte del dinero haciendo que se compren materiales de mala calidad o implementan de personal con poca experiencia debido a que el pago es menor que el de un experto (Boris, 2019).

La influencia determinante de la política en Colombia abarca diversas áreas de análisis, de esta forma, analizando el área de la salud de las comunidades que viven en áreas cercanas a las plantas o trabajan en las mismas, ya sean hidroeléctricas o termoeléctricas, se producen una serie de afectaciones, debido a la emisión de contaminantes atmosféricos como partículas, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono y/o metales pesados. Estos contaminantes pueden causar enfermedades respiratorias, cardiovasculares, neurológicas y cáncer, así como afectar el desarrollo infantil y el sistema inmunológico (Guzmán-González, 2020). Es importante conocer y entender al respecto de dichas afectaciones para poder tomar cartas en el asunto y poder llevar a cabo un desarrollo ecológico y limpio. Para finalizar a lo largo de la historia, el desarrollo tecnológico y científico del ser humano ha generado impactos significativos en cómo se lleva nuestra calidad de vida, donde el tema ambiental es uno de los más afectados, siendo la industria energética una de las principales fuentes actuales de contaminación. Las termoeléctricas y las hidroeléctricas tienen efectos negativos, pero las primeras son más contaminantes debido al uso de gases de combustión, las hidroeléctricas, aunque no son inofensivas, representan una alternativa más sostenible que las termoeléctricas, al aprovechar un recurso renovable como lo es el agua y poseer mayor eficiencia energética, sin embargo, su impacto en los ecosistemas acuáticos debe gestionarse adecuadamente. Este tema es clave debido a la categoría de planta hidroeléctrica que se analiza, pues las que poseen embalses pueden presentar inundaciones vastas alrededor de su ubicación donde generalmente están ricas en recursos bióticos y minerales, haciendo que estas transformaciones alteren las condiciones térmicas y aumente el impacto de las aguas residuales y desechos industriales (Pivar, Paglianib, Lemos, Lima, & Gravena, 2021).

Debido al tema ambiental y su repercusión en nuestra vida es necesario implementar mejoras tecnológicas en las termoeléctricas e hidroeléctricas, donde la primera requiere especialmente sistemas efectivos de control de emisiones de gases y manejo de residuos sólidos como las cenizas, para disminuir la contaminación que se produce al ser puestas en funcionamiento, ya que el carbón es el combustible fósil que mayor cuidado requiere por la cantidad de residuos que genera, así garantizando la sostenibilidad en la producción de energía eléctrica cuando se utilicen estas plantas, además es un reto global buscar sistemas mixtos que combinen fuentes renovables como lo realiza la planta hidroeléctrica con métodos térmicos más limpios, minimizando el impacto ambiental y social de la generación eléctrica.

Los impactos sociales y económicos de los proyectos energéticos también deben tenerse en cuenta, involucrando a las comunidades afectadas y compensando los daños. En Colombia, se requiere mayor control para evitar prácticas corruptas y priorizar el beneficio de las comunidades, aunque este tema es un poco denso y requiere de un análisis más riguroso ya que la política no es el fuerte de Colombia donde vemos que hasta lo ilegal es legal, y tiene más fuerza llenarse los bolsillos de dinero que tener humanidad por estos proyectos tan grandes que se presentan ya que la construcción de las plantas hidroeléctricas y termoeléctricas no son cuentos tan fáciles de leer.

## Referencias

- Boris, M. (8 de febrero de 2019). Hidroituango seca el río Cauca: cómo la controversial represa redujo en 80% el caudal del segundo río de Colombia. *BBC news mundo*, págs. 1-1. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-47169139>
- Cavaleri, M. (2019). *Plan de Minimización de Residuos en Central Termoeléctrica. Diseño e Implementación*. (Vol. 1). Tandil, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. UCPBA. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/d0d0383e-5dbe-4b72-b586-02d311bfce4f/content>
- Chica-Romero, Y. (1 de enero de 2017). *Generación de Energía Eléctrica a través de la Tecnología de Microturbina en la finca La Pomba* (Vol. 1). Bogota, Cundinamarca, Colombia: Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/tecnolog%C3%ADa-apropiada-para-la-generaci%C3%B3n-y-el-uso-de-energ%C3%ADa-medina-6e/?originalSubdomain=es>
- Ente nacional para la energía eléctrica - ENEL. (s.f.). *La energía hidroeléctrica*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de ENEL green power: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica>
- Equipo Editorial, Etecé. (13 de febrero de 2023). *Máquina de vapor*. (E. Equipo Editorial, Editor) Recuperado el 1 de octubre de 2023, de Etecé: <https://concepto.de/maquina-de-vapor/>
- Ferrer-Mendoza, M. (2018). *Alternativas de utilización de los residuos de combustión de la central termoeléctrica Bocamina* (Vol. 1). Valparaiso, Valparaiso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46305/3560900259725UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fuentes-Norambuena, A. (2018). *Evaluación De Alternativas De Reducción Del Volumen Para Almacenamiento De Sedimentos Aportantes A Embalses De Riego Mayores. Aplicación A Un Caso En Chile* (Vol. 1). Santiago de Chile, Santigo, Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/170041/Evaluaci%C3%B3n-de-alternativas-de-reducci%C3%B3n-del-volumen-para-almacenamiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gallego, J. (18 de febrero de 2021). *Emisiones de CO2 del sector energético y fuentes renovables en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de Centro de Pensamiento Independiente - Cepei: <https://cepei.org/documents/emisiones-del-sector-electrico/>
- García-Camacho, S. (2005). *Estudio Teórico y Experimental de la Remoción Hidráulica de Sedimentos en un Embalse* (Vol. 1). Cuernavaca, Morelos, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/587/14/garciacamacho.pdf>
- Gestion en Recursos Naturales - GRN. (2015). *Impacto ambiental de las plantas termoelectricas*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de GRN: <https://www.grn.cl/impacto-ambiental/impacto-ambiental-de-las-plantas-termoelectricas.html>



- Guzmán-González, Y. (17 de julio de 2020). Riesgos y peligros laborales en termoeléctricas. (A. Javier-Idrovo, Ed.) *Salud UIS*, 52(3), 239-250. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/10231/10915>
- Hossain, S., Chowdhury, H., Chowdhury, T., Uddin-Ahamed, J., Saidur, R., Sait, M., & Rosen, M. (noviembre de 2020). Energy, exergy and sustainability analyses of Bangladesh's power generation sector. (N. Fumo, Ed.) *Energy Reports*, 6, 868-878. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248471930722X?via%3Dihub>
- Iberdrola. (2023). *150 años de camino a la sostenibilidad: historia de la electricidad*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de Iberdrola.
- L.-Morris, G., & Portalatín, J. (27 de mayo de 2015). *Manejo de la Sedimentación en Embalses Hidroeléctricas*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de GLM: <https://cnostatic.s3.amazonaws.com/cno-public/documentos/noticias/1-GREGORY%20MORRIS%20-ESP-%20Sedimentaci%C3%B3n%20de%20Embalses-Presentaci%C3%B3n%20CNO-Mayo%202015.pdf>
- La Agencia de la ONU para los Refugiados - ACNUR. (7 de mayo de 2018). *Etapas Historicas en el Desarrollo de la Humanida*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de ACNUR: [https://eacnur.org/es/blog/etapas-historicas-en-el-desarrollo-de-la-humanidad-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst](https://eacnur.org/es/blog/etapas-historicas-en-el-desarrollo-de-la-humanidad-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst)
- Lauber, V., & Jacobsson, S. (15 de junio de 2015). The politics and economics of constructing, contesting and restricting socio-political space for renewables – The German Renewable Energy Act. (B. Truffer, Ed.) *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 147-163. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210422415000507>
- Lifeder. (15 de diciembre de 2022). *Central termoeléctrica*. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de Lifeder: <https://www.lifeder.com/central-termoelectrica/>
- Montañez-Guillén, J. (2017). *Estrategias para el Manejo de Sedimentos en Embalses* (Vol. 1). Bogoto, Cundinamarca, Colombia: Universidad de los Andes. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/a3aef4aa-0260-49ad-b03d-f26c1f070a17/content>
- Osorio-Londoño, I. (2017). *Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia* (Vol. 1). Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad EAFIT. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/OsorioLondo%c3%b1o\\_Iverson\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/OsorioLondo%c3%b1o_Iverson_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Oviedo-Ocaña, E. (19 de julio de 2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. (A. Idrovo-Velandia, Ed.) *Salud UIS*, 50(3), 191-192. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/8533/8445>
- Pivar, D., Paglianib, B., Lemos, L., Lima, D., & Gravena, W. (diciembre de 2021). Monitoring a critical population of the Bolivian river dolphin, *Inia boliviensis*, before and after closing the floodgates of a hydroelectric dam in the Amazon Basin, Brazil: A quantitative analysis. (N. Becker, M. Lencinas, Á. Pérez-Ruzafa, & S. Schindler, Edits.) *Journal for Nature Conservation*, 64. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1617138121001291>

- Ramos-Gutiérrez, L., & Montenegro-Fragoso, M. (abril-junio de 2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. (H. Rivas-López, Ed.) *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 2, III(2), 103-121. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n2/v3n2a7.pdf>
- Rodríguez, H. (29 de agosto de 2019). *Las civilizaciones antiguas ya arruinaban el planeta hace miles de años.* (H. Rodríguez, Editor, & National Geographic - España) Recuperado el 1 de octubre de 2023, de National Geographic - España: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/civilizaciones-antiguas-ya-estaban-arruinando-planeta\\_14636](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/civilizaciones-antiguas-ya-estaban-arruinando-planeta_14636)
- Soto, J. (25 de junio de 2020). *¿Por qué la termoeléctrica no es energía limpia?* Recuperado el 1 de octubre de 2023, de GREENPEACE: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/8635/por-que-la-termoelectrica-no-es-energia-limpia/>
- Villas-Tinoco, S. (2012). La Primera Revolución Industrial. *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*, 43-50. Recuperado el 1 de octubre de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6429088.pdf>
- WWF. (23 de abril de 2014). *¿Por qué nos importa el cambio climático?* (WWF, Editor) Recuperado el 1 de octubre de 2023, de WWF: [https://wwf.panda.org/es/cambio\\_climatico1/importanciaclimatica/](https://wwf.panda.org/es/cambio_climatico1/importanciaclimatica/)

## **Impacto económico y social ocasionado por la central hidroeléctrica de San Carlos**

Yuliana Posada Gómez - Juan Guillermo Herrera Mejía  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La energía hidroeléctrica ha sido desde hace mucho tiempo un pilar fundamental en el suministro de electricidad en Colombia, destacándose como una de las fuentes más limpias y sostenibles para satisfacer la demanda energética del país. La Central Hidroeléctrica de San Carlos, ubicada en el departamento de Antioquia y específicamente en el municipio de San Carlos, se erige como una de las instalaciones más relevantes en este sector (Movice, Movimiento Nacional de Víctimas de Crímenes de Estado, 2009). Sin embargo, desde su inicio, esta central ha sido objeto de un debate constante. Aunque ha impulsado significativamente la generación de energía eléctrica en Colombia, convirtiéndose en la hidroeléctrica con mayor capacidad instalada en el país (1240 MW), distribuidos en ocho unidades de 155 MW, también ha dejado un impacto negativo en las comunidades locales (Vargas, 2016). Este impacto se refleja en la afectación de empleos y viviendas de las comunidades circundantes, además de las consecuencias ambientales notables, las cuales ponen en riesgo las tierras fértiles de la región. Este impacto no se limita sólo al ámbito local, también ha afectado la economía a nivel nacional; este desequilibrio económico tanto a nivel local como nacional, plantea desafíos significativos que requieren una cuidadosa gestión. Esta central ha dejado una profunda huella en el panorama económico y social de Colombia, y en un momento en el que el país experimenta un continuo desarrollo con una creciente demanda de energía para respaldar su expansión económica, las centrales hidroeléctricas representan una solución atractiva al aprovechar los recursos hídricos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionar un suministro de energía confiable que contribuye al crecimiento económico (Plan de Gestión Ambiental - Ingenio San Carlos, 2022)

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 43-50  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Si la hidroeléctrica San Carlos es tan importante y eficiente en la provisión de electricidad para el departamento de Antioquia y para el país, surge una pregunta fundamental: ¿Cuáles son las principales transformaciones económicas

y sociales que trae la construcción de este proyecto en el municipio de San Carlos? A pesar de que la generación de energía hidroeléctrica se presenta como una fuente de energía sostenible y beneficiosa, la realidad es que los proyectos de esta índole no están exentos de controversia y consecuencias negativas. El impacto económico de la Central Hidroeléctrica de San Carlos es innegable. Esta central ha contribuido al desarrollo de la infraestructura energética de la región, impulsando así su crecimiento económico (Yacoub & Duarte, 2015). No obstante, no todos los efectos de esta central son positivos. Las dinámicas de producción agrícola se ven afectadas, ya que estas tierras dejan de producir alimentos para convertirse en territorio destinado a las operaciones de la hidroeléctrica. La agricultura, que es la principal fuente de empleo en el municipio y que incluye cultivos de café, yuca, maíz, frutas y plátanos, se ve perjudicada (Municipio de San Carlos, 2016). Dado que las tierras agrícolas se ven afectadas, la población local se ve obligada a buscar otras fuentes de empleo para subsistir. La ganadería también se ve afectada de varias maneras por la operación de la Hidroeléctrica. La adquisición de tierras para la construcción de la central a menudo implica el desplazamiento y reubicación de ganaderos, generando desafíos económicos y sociales significativos para sus familias. Estos individuos se ven obligados a buscar nuevas fuentes de sustento y territorios para vivir, lo que añade complejidad a su situación económica y social. (Jiménez, 2022). La alteración de los flujos de agua puede afectar la disponibilidad de pastos y recursos hídricos esenciales para el ganado. La inundación de áreas de pastoreo y la modificación de los recursos de agua pueden limitar el acceso del ganado a fuentes de alimento, lo que a su vez podría repercutir en la producción y el bienestar de los animales. Para mitigar estos impactos es crucial llevar a cabo una planificación adecuada con la disponibilidad de recursos y fomentar el desarrollo sostenible de la región.

Según el método de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) en cuanto a la pobreza del municipio, en el año 2005, una de cada tres personas se encontraba en situación de pobreza y ocho de cada cien en situación de miseria. Al tener tanta necesidad de aumentar la economía, San Carlos fue espectador de la llegada de la Hidroeléctrica de San Carlos, la cual entró en funcionamiento en el año 1988. La construcción y operación de esta hidroeléctrica han atraído la presencia de guerrilla, paramilitares y ejército nacional. Este fenómeno se explica por las riquezas naturales presentes en la zona, así como por la fertilidad de los suelos que permiten el cultivo de diversos alimentos. El municipio posee un gran potencial, lo que ha generado disputas y conflictos armados, afectando directamente a las comunidades ubicadas en las zonas de influencia de este proyecto. Las consecuencias se manifiestan en impactos económicos y sociales significativos, dando lugar a movilizaciones y paros. Estas acciones buscan expresar las insatisfacciones de las comunidades afectadas por el proyecto, el cual ha tenido repercusiones negativas en sus vidas, salud y territorios. Además, se critican las promesas incumplidas por parte de la empresa responsable, lo que ha exacerbado las tensiones entre la comunidad y los actores involucrados en la construcción y operación de la hidroeléctrica. (Centro de Memoria Histórica, 2011). Por lo tanto, explorar y analizar a fondo el impacto económico y social que ha tenido la Central Hidroeléctrica de San Carlos en el departamento de Antioquia es un factor clave para comprender el cambio de la actividad económica, el cambio de condición del trabajo asalariado y el nuevo ordenamiento del territorio. Es importante resaltar que la Hidroeléctrica San Carlos genera una gran cantidad de energía eléctrica en el país, aproximadamente 1.240 MW, posicionándola en la central con mayor capacidad en la región hasta el año 2019 (ISAGEN, 2020).

La reducción de la pesca es un impacto negativo que provocó la Hidroeléctrica San Carlos. La comunidad que depende de dicha actividad ha experimentado una disminución en las poblaciones de peces y otros recursos acuáticos debido a los cambios en los flujos de agua y la calidad del hábitat (Aristizábal, 2020). Esto afecta directamente la sustentabilidad de la pesca y la economía de estas comunidades. La alteración del ecosistema fluvial puede resultar en la pérdida de hábitats críticos para la reproducción y el crecimiento de las especies de peces, lo que a su vez disminuye las poblaciones de peces disponibles para la pesca. Desde el panorama de la asociación Interamericana de la Defensa del Ambiente, las construcciones de estas centrales violan los derechos al trabajo y a la alimentación ya que son

vulnerados por las construcciones de estas centrales, acabando paulatinamente con los sustentos que normalmente conseguían a diario para subsistir (AIDA, 2009).

Cuestiones socioeconómicas relacionadas con los proyectos hidroeléctricos están influenciadas por diferentes etapas del proceso, así como por las características específicas de las partes involucradas. Estas etapas suelen dividirse en tres momentos clave: La planificación y diseño, la construcción y la operación de la represa. No obstante, es común que la evaluación del impacto social se centre en la cantidad de personas desplazadas del área de embalsamiento. Sin embargo, existe un debate sobre la discrepancia entre las cifras oficiales y la realidad, ya que se ha sugerido que también deberían tenerse en cuenta las comunidades aguas arriba y aguas abajo del proyecto, así como aquellas afectadas por la infraestructura conexas, como carreteras y estaciones de monitoreo, que se ven obligadas a cambiar su lugar de residencia (Aristizábal, 2020).

En el municipio de San Carlos hasta el año 2006 muchas personas se vieron obligadas a abandonar sus viviendas, las cuales están localizadas en las zonas de influencia donde funciona la Hidroeléctrica, pero más que ser un desplazamiento forzado, es un desplazamiento negociado (García de la Torres, 2011). Las comunidades que han tenido que abandonar sus tierras y hogares a menudo enfrentan dificultades en la búsqueda de empleo y en la adaptación a nuevas condiciones de vida, esto puede incluir el gasto en la construcción de nuevas viviendas, búsqueda de nuevos ingresos y la adaptación a un entorno desconocido. La falta de una adecuada compensación por sus tierras puede generar problemas económicos y sociales a largo plazo para dichas comunidades, además la dispersión de estas comunidades puede debilitar las redes comunitarias, lo que a su vez puede afectar la calidad de vida y la resiliencia de estas comunidades en términos económicos y sociales. En la década de los 80's se registra el CENSO del 1985 un total de 29.156 personas, de las cuales 20.174 se localizaban en las veredas y corregimientos. Para los años 90's en el CENSO del 1993 se evidencia un descenso en la población a 24.326 habitantes, de los cuales 16.759 pertenecían a las veredas y corregimientos; este descenso se da por la salida de familias a raíz de la finalización de la construcción de la hidroeléctrica y por la violencia vivida en aquella época (Olaya, 2012).

La construcción de los tres proyectos hidroeléctricas ubicadas en el municipio de San Carlos (San Carlos, Calderas y Playas) implicó un proceso de adquisición de 638 predios, lo que resultó en el desplazamiento de un total de 2.705 personas (Centro de Memoria Histórica, 2011). Estos megaproyectos han tenido un impacto significativo en la dinámica económica y social de la región oriental de Antioquia. El cambio económico causado por estos megaproyectos es notable. La región ha transitado de ser un sector predominante campesino a convertirse en un centro industrializado. La energía generada por estas hidroeléctricas se estima en aproximadamente el 35 % de la producción total de energía del país, lo que refleja su importancia en el abastecimiento energético de Colombia (Centro de Memoria Histórica, 2011). Este cambio en la estructura económica de la región ha traído consigo ventajas y desafíos. Por un lado, la industrialización ha generado empleo y oportunidades económicas para la población local, contribuyendo al desarrollo y la infraestructura de la zona. Por otro lado, el proceso de adquisición de tierras y el desplazamiento de las comunidades han generado tensiones y desafíos sociales que deben ser abordados de manera efectiva para garantizar una transición justa equitativa hacia la industrialización.

La alteración del paisaje natural debido a la construcción de la central hidroeléctrica puede afectar negativamente al turismo en la región. Un desafío que enfrentan los habitantes de San Carlos es recuperar su atractivo paisajístico para volver a atraer a los turistas, incluso después de que se completara esta construcción. El impacto generado es negativo en la economía local ya que el turismo es una fuente importante de ingresos para muchas comunidades. La pérdida de ingresos y la necesidad de diversificar la economía local son aspectos clave a considerar, para minimizar el impacto negativo en el turismo y la economía local, es esencial que se realice una planificación adecuada antes, durante y después de la construcción de proyectos hidroeléctricos; esto incluye la identificación de áreas que

deben preservarse por su valor turístico y la implementación de medidas de mitigación, como la creación de nuevas áreas recreativas o la restauración de paisajes naturales (Niño, 2020).

Es importante analizar la economía campesina en el municipio de San Carlos, ya que proporciona una base fundamental para comprender cómo los cambios socioeconómicos impactan en las prácticas tradicionales de uso de la tierra, la estructura de la propiedad, la planificación territorial y las dinámicas familiares que sustentan la agricultura. Este análisis puede ayudar a identificar los desafíos y oportunidades que surgen a medida que la economía local evoluciona y, a su vez, proporcionar información valiosa para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación territorial y el desarrollo sostenible de la región (Jiménez, 2022). El pequeño productor en el municipio de San Carlos, previo a la entrada en funcionamiento de la central hidroeléctrica San Carlos, desempeñó un papel destacado en la comunidad rural. Se dedicó a diversas actividades productivas, que incluyen el cultivo de café, caña de azúcar, hortalizas, minería artesanal, pesca en el río y la explotación de madera (Insuasty, 2016). Además, se apoyó en la mano de obra familiar para mantener su finca. Con la puesta en marcha de la central hidroeléctrica, la relación de la comunidad con el territorio tuvo transformaciones significativas.

Por otra parte, mientras se construyó la hidroeléctrica San Carlos se provocó un disparo en las enfermedades fitosanitarias de las comunidades locales y en el entorno. El polvo y las partículas en el aire generadas por la construcción de la hidroeléctrica contribuyó a problemas respiratorios como asma y bronquitis (Aristizábal, 2020). Otro tipo de enfermedad es la transmisión de vectores, en la cual la creación de embalses y cuerpos de agua estancada aumentó la proliferación de vectores de enfermedades como mosquitos, lo que incrementó la incidencia de enfermedades como el dengue y el zika. El contacto con el agua estancada y la exposición prolongada a la humedad aumentó el riesgo de enfermedades de la piel y los ojos, como infecciones cutáneas y conjuntivitis. La calidad del agua en las zonas afectadas por la hidroeléctrica se vio comprometida debido a la sedimentación y la contaminación. Esto aumentó el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea y otras infecciones gastrointestinales. Otra enfermedad que se presentó son los trastornos mentales por la reubicación forzada de las comunidades y por la alteración del paisaje natural (Viviescas, 2016).

La humedad ambiental es otro factor que se ha visto afectado por la operación de la Hidroeléctrica San Carlos. La formación de embalses y cuerpos de agua significativos, consecuencia de esta infraestructura, puede modificar los niveles de humedad local. La presencia de grandes masas de agua puede aumentar la evaporación, lo que, a su vez, puede conducir a un incremento de la humedad atmosférica, especialmente en las áreas cercanas a estos cuerpos de agua (Viviescas, 2016). Este fenómeno puede crear microclimas más húmedos en las proximidades de los embalses, lo que podría afectar la vegetación y la biodiversidad en esas áreas (Aristizábal, 2020). Además, la alteración en la humedad ambiental puede repercutir en la agricultura y en las prácticas agrícolas de la región, requiriendo adaptaciones a las condiciones climáticas cambiantes. Por tanto, la evaluación de impacto ambiental y la implementación de medidas de mitigación son cruciales para comprender y gestionar los efectos en la humedad y el entorno circundante de la hidroeléctrica.

La construcción de la Central Hidroeléctrica San Carlos ha estado acompañada de promesas y compromisos hacia las comunidades locales, pero en algunos casos, estas promesas no se han cumplido cabalmente. Entre las promesas incumplidas se encuentran la reubicación y compensación justa de las comunidades afectadas, mejoras en infraestructura y servicios, generación de empleo local, beneficios para la comunidad en términos de desarrollo económico y proyectos sociales, protección del medio ambiente y la participación de las comunidades en la toma de decisiones. Cuando estas promesas no se materializan de manera oportuna o satisfactoria, surge la insatisfacción en las comunidades locales, lo que puede dar lugar a tensiones, protestas y conflictos. La transparencia, la rendición de cuentas y la supervisión efectiva son fundamentales para asegurar que los compromisos se cumplan en los proyectos hidroeléctricos y que las comunidades reciban los beneficios prometidos (Jiménez, 2022).

El ruido y las vibraciones asociados a la Central Hidroeléctrica San Carlos varían dependiendo de la fase del proyecto. Durante la construcción, la utilización de maquinaria pesada, como excavadoras y camiones, así como posiblemente voladuras controladas, puede generar niveles significativos de ruido y vibraciones. En la etapa de operación, las turbinas y generadores que convierten la energía hidráulica en eléctrica emiten un ruido constante, y las operaciones de compuertas y válvulas también pueden contribuir al nivel de ruido (Comisión Mundial de Represas, 2000). El impacto en las comunidades cercanas depende de la distancia entre la infraestructura y las viviendas, y las medidas de mitigación implementadas. Para minimizar el impacto, es esencial que los proyectos hidroeléctricos apliquen estrategias para controlar y reducir el ruido y las vibraciones, así como realicen un seguimiento ambiental para evaluar su efecto en las comunidades locales y tomar medidas correctivas si es necesario.

En conclusión, la Central Hidroeléctrica de San Carlos, situada en el departamento de Antioquia, ha desempeñado un papel crucial en la generación de energía limpia en Colombia y ha contribuido significativamente al suministro eléctrico del país. Sin embargo, su construcción y operación han tenido un impacto complejo en las comunidades locales, el entorno ambiental y la economía, tanto a nivel local como nacional. Desde una perspectiva económica, esta hidroeléctrica ha sido un impulsor del desarrollo económico en la región, al expandir la infraestructura energética y proporcionar empleo y oportunidades económicas a la población local. La generación de energía hidroeléctrica se ha convertido en una fuente valiosa para respaldar el crecimiento económico del país en un momento en que la demanda de energía sigue creciendo. Esto representa una contribución significativa a la capacidad de generación energética de Colombia, que es esencial para sostener su expansión económica (Aristizábal, 2020).

Sin embargo, la transformación económica impulsada por la hidroeléctrica también ha traído consigo desafíos. Las comunidades agrícolas han enfrentado dificultades debido a la reubicación forzada y la pérdida de tierras destinadas a la agricultura. La ganadería ha sido afectada por la adquisición de tierras y la modificación de los flujos de agua, lo que ha repercutido en la disponibilidad de pastos y recursos hídricos. Estos cambios han requerido que las comunidades locales busquen alternativas económicas y se adapten a nuevas condiciones de vida, lo que a menudo implica gastos significativos. El impacto social de la Central Hidroeléctrica de San Carlos también se refleja en la pobreza de la región, con una proporción significativa de la población en situación de pobreza y miseria antes y después de la construcción de la hidroeléctrica. La llegada de la central atrajo a diversos grupos armados, lo que resultó en conflictos y movilizaciones de comunidades afectadas. Las promesas hechas a estas comunidades en términos de compensación, empleo y desarrollo económico no siempre se han cumplido, lo que ha generado insatisfacción y tensiones (Jiménez, 2022). El impacto ambiental no debe pasarse por alto. La construcción de embalses ha modificado los niveles de humedad local, creando microclimas más húmedos y afectando la vegetación circundante. La alteración de los flujos de agua ha afectado la pesca y la calidad del agua, lo que ha repercutido en la salud de las comunidades locales. Además, el ruido y las vibraciones asociados a la hidroeléctrica pueden generar molestias para las comunidades cercanas.

## Referencias

- Agudelo, S. (2017). *Afectaciones de las represas, centrales hidroeléctricas (CH) y pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el oriente Antioqueño, un pequeño recuento*. Corporación Cocorná Consciente. Disponible en: <https://www.ipc.org.co/agenciadeprensa/wp-content/uploads/2017/12/Afectaciones-de-las-represas-centrales-hidroel%C3%A9ctricas-CH-y-peque%C3%B1as-centrales-hidroel%C3%A9ctricas-PCH-en-el-oriente-antioque%C3%B1o.-Un-peque%C3%B1o-recuento.pdf>
- Aristizábal, A. (2020). *Transformaciones: El caso de la hidroeléctrica San Carlos en Antioquia* [Tesis en desarrollo rural, Pontífica Universidad Javeriana]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/51037/TRANSFORMACIONES%20>

EN%20LA%20ECONOM%c3%8da%20CAMPESINA%20EL%20CASO%20DE%20LA%20HIDROELECTRICA%20SAN%20CARLOS%20EN%20ANTIOQUIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ávila, N. (2017). La naturaleza vida se cuida y se defiende: conflictos por neoextractivismo en el oriente del departamento de Antioquia Colombia. [Tesis de maestría en geografía, Universidad Federal do Paraná]. Disponible en: [https://www.academia.edu/105251347/La\\_naturaleza\\_vida\\_se\\_cuida\\_y\\_se\\_defiende\\_conflictos\\_por\\_neoextractivismo\\_en\\_el\\_oriente\\_del\\_departamento\\_de\\_Antioquia\\_Colombia](https://www.academia.edu/105251347/La_naturaleza_vida_se_cuida_y_se_defiende_conflictos_por_neoextractivismo_en_el_oriente_del_departamento_de_Antioquia_Colombia)
- Bacca, G. (2019). *Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia* [Tesis en medio ambiente y desarrollo, Universidad Nacional de Colombia]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76470/JavierBacca.2019.pdf?sequence=1>
- Carvajal, S., Marín, J. (2015). Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico. *Revista tecnura*, 17, 35-77. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6886>
- Cogaria, J. (2019). Diagnóstico de la percepción ambiental y socioeconómica de las hidroeléctricas en Colombia. *Red de revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Ingeniería*, volumen (23), 23-41. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/467/46761359003/46761359003.pdf>
- Diez, J., Olmeda, S. (2008). La obtención de energía a través de minicentrales hidroeléctricas, por su baja generación de gases de efecto invernadero, las ha convertido en uno de los sistemas de producción energética más limpio y respetuoso con el ambiente, porque que no tiene que al. *Revista Energética*, 39, 65-76. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147020257006.pdf>
- Figuroa, V. (2005). Descomposición y persistencia de lo campesino. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 36 (142), 27-50. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11820079003>
- García, Y. (2023). *Descampesinización por desarraigo en San Carlos, Antioquia. Aproximación a través de una historia de vida familiar* [Tesis de Maestría en paz, desarrollo y ciudadanía, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. Disponible en: [https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/18229/1/TM.PDC\\_GarciaGarciaYeisonCamilo\\_2023](https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/18229/1/TM.PDC_GarciaGarciaYeisonCamilo_2023)
- Gil, I. (2010). *Peligros ambientales de las presas y embalses*. Versoix, Suiza: Universidad de Génova. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/167775/Romero%20-%20Efectos%20ambientales%20de%20presas%20y%20embalses.pdf>
- Gómez, C., Jiménez R., et al. (2019). Mecanismos de protección de derechos humanos, fundamentales y colectivos frente a los proyectos hidroeléctricos en Colombia. *Revista Jurídica Piélagus*, 18 (2), 166-180. Disponible en: <https://journalusco.edu.co/index.php/pielagus/article/view/2649#citation>
- Gudynas, E. (2014). Conflictos y extractivismos: conceptos, contenidos y dinámicas. *Decursos*. Disponible en: <https://horizontescomunitarios.files.wordpress.com/2016/09/gudynas-conflictosextractivismosconceptosdecs14.pdf>
- Henao, G., & Echavarría, J. (2005). Experiencias en el control de un foco de leishmaniasis cutánea en San



- Carlos, Antioquia. CES Medicina, 19(1),31-36. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=261120980004>
- Insuasty, R. (2016.) San Carlos (Antioquia), en la lucha por la No Repetición. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/305470028\\_San\\_Carlos\\_Antioquia\\_en\\_la\\_lucha\\_por\\_la\\_No\\_Repeticion](https://www.researchgate.net/publication/305470028_San_Carlos_Antioquia_en_la_lucha_por_la_No_Repeticion)
- Jiménez. (2020) *Transformaciones territoriales en el área de influencia del proyecto energético Punchiná, municipio de San Carlos, Antioquia* [Tesis en desarrollo territorial, Universidad de Antioquia]. Disponible en: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/30874/6/Jim%C3%A9nezAngie\\_2022\\_Transformaci%C3%B3nTerritorialidadesHidroel%C3%A9ctricas.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/30874/6/Jim%C3%A9nezAngie_2022_Transformaci%C3%B3nTerritorialidadesHidroel%C3%A9ctricas.pdf)
- Memoria empresarial. (2019). *Central Hidroeléctrica San Carlos*. Recuperado el 25 de noviembre del 2023. Disponible en: <https://memoriaempresarial.eafit.edu.co/wp-content/uploads/2014/10/Central-Hidroelectrica-San-Carlos.pdf>
- Movice (Movimiento Nacional de Víctimas de Crímenes de Estado). (2009). Desplazamiento forzado y retorno en San Carlos- Antioquia: una comunidad que regresa hacia el confinamiento. ILSA. Disponible en: <http://biblioteca.clacso.edu.ar/Colombia/ilsa/20130911065500/3.pdf>
- Municipio de San Carlos. (2016, 04 junio). *Plan de Desarrollo “Trabajando por el desarrollo social” San Carlos-Antioquia*. Disponible en: <http://www.sancarlos-cordoba.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-20162019>
- Niño. (2020). *Pertinencia de la potencialización del turismo en el municipio de San Carlos Antioquia* [Tesis] formulación y evaluación social y económica de proyectos, Segundo congreso Internacional de la facultad de ciencias económicas y administrativas cofaces]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/c966f85e-b89d-4349-b84c-ce91aaea0236/content>
- Olaya, C. (2012). *Nunca más contra nadie - Ciclos de violencia en la historia de San Carlos, un pueblo devastado por la guerra*. Bogotá: Cuervo Editores. Disponible en: <https://bibliotecaseccionaloriente.blogspot.com/2018/02/nunca-mas-contra-nadie.html>
- Plan de Gestión Ambiental - Ingenio San Carlos. (2022, 21 septiembre). *Plan de gestión ambiental*. Recuperado el 25 de noviembre del 2023. Disponible en: <https://ingeniosancarlos.com.co/corporativo/plan-gestion-ambiental-2019-2021/>
- Sánchez, G. (2011). *San Carlos: memorias del éxodo en la guerra*. (Ediciones Semana, Ed.). Bogotá: Comisión Nacional de Reparación y Reconciliación (CNRR) y Grupo de Memoria Histórica. Disponible en: [https://biblioteca.clacso.edu.ar/Colombia/corporacion-region/20170731060225/pdf\\_758.pdf](https://biblioteca.clacso.edu.ar/Colombia/corporacion-region/20170731060225/pdf_758.pdf)
- Serna, C. (2019). *Eficiencia energética: alternativa de transformación para una empresa de generación de energía con un enfoque de sostenibilidad, competitividad, productividad y de responsabilidad por el medio ambiente, caso de estudio central hidroeléctrica San Carlos - Colombia*. [Tesis de maestría en Ingeniería- Sistemas energéticos, Universidad Nacional de Colombia]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76852>
- Shanin, T. (1979). Definiendo al campesinado: conceptualizaciones y desconceptualizaciones. Pasado y presente de un debate marxista. *Revista agricultura y sociedad*. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=82399>

- Vargas, J., Arango, J., Salazar, M., & Herrera, L. (2016). Prototipo mecánico para la transformación de energía hidráulica en energía eléctrica. *Visión electrónica*. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/315737668\\_PROTOTIPO\\_MECANICO\\_PARA\\_LA\\_TRANSFORMACION\\_DE\\_ENERGIA\\_HIDRAULICA\\_EN\\_ENERGIA\\_ELECTRICA\\_PROTOTYPE\\_FOR\\_MECHANICAL\\_ENERGY\\_TRANSFORMATION\\_IN\\_ELECTRICITY\\_HYDRAULIC](https://www.researchgate.net/publication/315737668_PROTOTIPO_MECANICO_PARA_LA_TRANSFORMACION_DE_ENERGIA_HIDRAULICA_EN_ENERGIA_ELECTRICA_PROTOTYPE_FOR_MECHANICAL_ENERGY_TRANSFORMATION_IN_ELECTRICITY_HYDRAULIC)
- Vega. (2019). *Impactos socio ambientales generados por la construcción de centrales hidroeléctricas en Colombia* [Especialización en gerencia ambiental y desarrollo sostenible empresarial, Universidad Santiago de Cali]. Disponible en: <http://5.161.181.217/handle/20.500.12421/4612>
- Villa, J., & Insuasty, A. (2015). Significados en torno a la reparación, la ayuda humanitaria, la indemnización y la restitución en víctimas del conflicto armado en el municipio de San Carlos. *El Agora USB*, 15(2), 419-445. Disponible en: <https://revistas.usb.edu.co/index.php/Agora/article/view/1623/1433>
- Viviescas. (2014). *Caracterización de Impactos Ambientales y Sociales generados por la construcción de grandes centrales hidroeléctricas en el país* [Especialización en planeación ambiental y manejo integral de recursos naturales, Universidad Militar Nueva Granada]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12036/Art%C3%ADculo%20Alejandra%20Viviescas.pdf?sequence=1>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia*. Recuperado el 25 de noviembre del 2023. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/siel>
- Yacoub, C., Duarte, B., & Boelens, R. (2015). *Agua y Ecología Política. El extractivismo en la agroexportación, la minería y las hidroeléctricas en Latinoamérica*. ISBN 978-994. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/321410596\\_Yacoub\\_C\\_Duarte\\_B\\_y\\_Boelens\\_R\\_eds\\_2015\\_Agua\\_y\\_ecologia\\_politica\\_El\\_extractivismo\\_en\\_la\\_agroexportacion\\_la\\_mineria\\_y\\_las\\_hidroelectricas\\_en\\_Latinoamerica\\_Abya-Yala\\_Justicia\\_Hidrica\\_Quito\\_Ecuador\\_303\\_pp](https://www.researchgate.net/publication/321410596_Yacoub_C_Duarte_B_y_Boelens_R_eds_2015_Agua_y_ecologia_politica_El_extractivismo_en_la_agroexportacion_la_mineria_y_las_hidroelectricas_en_Latinoamerica_Abya-Yala_Justicia_Hidrica_Quito_Ecuador_303_pp)

# La importancia de las técnicas de reutilización de residuos en las centrales termoeléctricas

Francisco Javier Álvarez Acero – Kevin Santiago Ortiz Acer  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Los progresos científicos y tecnológicos recientes están directamente relacionados con un incremento en el consumo de energía, en consecuencia, se ha generado un crecimiento y expansión en el sector eléctrico. Este aumento en la demanda conlleva una mayor generación de energía eléctrica para satisfacerla, la expansión de las redes de transmisión y distribución, y, como resultado, la producción de residuos derivados de todas estas actividades. Es importante destacar que todas las formas de generación de energía eléctrica producen desechos, incluyendo aquellos que son peligrosos, lo que a su vez resulta en impactos ambientales negativos (Maia et al., 2021). Según el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente de 2019, entre 2010 y 2016, los países de la Unión Europea aumentaron un 4\_% en la producción total de residuos del sector energético (EEA, 2023). Algunos de estos desechos se clasifican como residuos eléctricos y electrónicos (E-waste), los cuales caen en la categoría de residuos con la tasa de generación más alta a nivel mundial (Naik & Satya Eswari, 2022).

La gestión adecuada de los residuos es fundamental para mitigar los impactos ambientales relacionados con la generación de electricidad. Tomando como base las centrales que usan combustibles fósiles, las cuales generan más desechos que otras plantas de generación de energía existentes. Todas las etapas del ciclo del combustible, que abarcan desde la extracción y refinado hasta el consumo, conllevan una gran cantidad de producción de sobrantes tanto sólidos como gaseosos. Un ejemplo de esta problemática se evidencia en la generación de residuos a partir de la utilización de carbón en centrales termoeléctricas. A pesar del esfuerzo continuo por diversificar las fuentes de energía, el carbón sigue siendo una fuente de generación primordial a nivel mundial (Maia et al., 2021). Durante el proceso de combustión del carbón, se producen grandes cantidades de cenizas volantes y cenizas de fondo, las cuales suelen eliminarse en los vertederos correspondientes. Esta práctica da lugar a impactos ambientales masivos debido a la extensa área de tierra requerida para su disposición. Además, si no se realiza

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 51-58  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

un tratamiento adecuado en la gestión de esos residuos, el impacto al medio ambiente es mucho mayor (Kostova et al., 2023)

Para combatir esta problemática ambiental muchos países han implementado leyes y regulaciones que definen las responsabilidades de los agentes involucrados en la gestión adecuada. Un ejemplo a esto es la implementación de las directivas 2002/96/CE y 2002/95/CE, las cuales tienen como objetivo abordar los desafíos ambientales asociados con la fabricación y gestión de equipos eléctricos y electrónicos. La primera aborda la gestión adecuada de los residuos generados por los dispositivos, donde establece normas para la recogida, tratamiento y reciclaje. La segunda establece la reducción y eliminación de sustancias peligrosas en la fabricación de estos equipos (European Commission, 2003). Las empresas del sector eléctrico usan los informes de sustentabilidad para mostrar las estrategias establecidas para el cumplimiento de las leyes y regulaciones a las que están sujetas.

Estas regulaciones buscan promover la reducción de desechos, la reutilización, el reciclaje y otras formas de recuperación antes de recurrir a la eliminación en vertederos, siguiendo el principio de jerarquía de desechos (Shah et al., 2023). Este principio es una propuesta internacional conformada por diversas normativas ambientales, utilizada por las industrias como guía en la toma de decisiones sobre la gestión de sus excedentes. Esta jerarquía establece el siguiente orden de prioridad para las acciones a tomar: la primera y más deseable es poder evitar la generación de residuos, esto se puede lograr con la implementación de nuevas tecnologías que minimicen la producción de desechos en las etapas desarrolladas dentro de la planta; la segunda es la preparación de los sobrantes para la reutilización; la tercera es el reciclado o compostaje de los desechos, transformando estos en recursos útiles; la cuarta son otros tipos de recuperación, que en este contexto se refiere al aprovechamiento del calor residual de los procesos dentro de la planta; la quinta y última acción a tomar es la eliminación de estos excedentes en vertederos apropiados y con una gestión de alta calidad. (Naik & Satya Eswari, 2022).

La administración de residuos por parte del sector eléctrico representa un aspecto fundamental, este ensayo resalta la importancia de la gestión de residuos en las plantas termoeléctricas, destacando la implementación de diversas técnicas y tecnologías. Comenzaremos examinando la relevancia de las centrales termoeléctricas en el sistema eléctrico colombiano, destacando el papel de dichas plantas en la matriz energética. Posteriormente, exploraremos las normativas regulatorias que rigen el tratamiento de los residuos generados por estas plantas, destacando su papel legal o ético. Finalmente, se realizará un análisis de las tecnologías aplicadas en las centrales termoeléctricas, ya sea en Colombia o en países vecinos, demostrando los beneficios que traen a la planta, la contribución económica y mitigación del impacto al medio ambiente.

En el Contexto del sector energético colombiano, es evidente que Colombia ha logrado un importante avance en la adopción de fuentes de energía renovable, según el plan energético nacional desarrollado por la UPME, donde muestra el avance del sector energético colombiano desde 1975 hasta la actualidad (UPME, 2019). En el presente las centrales hidroeléctricas desempeñan un papel fundamental en la generación de energía en Colombia, dado que representan un 68 % de la matriz energética nacional. Sin embargo, a pesar de la masiva participación de energías renovables en la matriz energética, el sector termoeléctrico sigue siendo indispensable para el país, debido a que contribuye con un 30.7 % a la matriz, además son el respaldo del sistema eléctrico del país, puesto que la mayoría operan bajo contratos de confiabilidad (ACOLGEN, n.d.).

En Colombia, el cargo por confiabilidad es un instrumento que se utiliza para garantizar la disponibilidad de capacidad de generación eléctrica, especialmente en situaciones de alta demanda. Este contrato es establecido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) desde el año 2006 estipulado en la resolución 071 y 086, este contrato fue diseñado para asegurar la suficiente capacidad instalada que atienda las necesidades energéticas del país en momentos críticos, como el fenómeno El Niño (Isabel et al., 2012), (CREG, 2006). Es por esto que las centrales termoeléctricas mediante estos contratos son una herramienta esencial para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico colombiano y evitar apagones o

cortes de energías, como fue el caso del periodo 2015-2016 donde las centrales termoeléctricas llegaron a abastecer el 70% de la demanda nacional por los bajos niveles de los embalses que tenían las hidroeléctricas (Mateus Valencia, 2016).

Dado la importancia de las centrales termoeléctricas en Colombia, es importante definir las problemáticas que tiene el funcionamiento de estas. Una de las más alarmantes es la emisión de contaminantes atmosféricos, resultado de la combustión incompleta de los combustibles utilizados (Martínez, 2005). Esta combustión incompleta se debe a la presencia de impurezas en los combustibles, la combinación de fases en el aire y las condiciones en las que se lleva a cabo la quema de hidrocarburos, como consecuencia de esta combustión se liberan diversos productos químicos dañinos en la atmósfera (Mastrángelo, 2002). Estos contaminantes atmosféricos contribuyen a la degradación de la calidad del aire y a problemas de salud pública (Ugarte-Avilés et al., 2017). Además de la emisión de contaminantes atmosféricos, la generación termoeléctrica también significa la producción de desechos peligrosos. Estos desechos incluyen lodos de tanque de almacenamiento de hidrocarburos y material absorbente contaminado con hidrocarburos. La gestión adecuada de estos desechos es esencial para prevenir impactos negativos en el medio ambiente y proteger la sociedad en general (Prado Guevara, 2017).

Para abordar estos desafíos ambientales, es imperativo ejecutar un sistema de gestión integral y un manejo adecuado de los desechos peligrosos. Para ello se destacan dos estrategias claves y así mitigar los impactos de generación termoeléctrica, el primero es la implementación de tecnologías limpias, como la captura y el tratamiento de gases contaminantes, la co-combustión y el reciclaje de cenizas; el segundo es la reducción en la fuente, lo que implica minimizar la generación de desechos peligrosos desde el principio, esto se logra seleccionando combustibles con menos impurezas, mejorar los procesos de combustión o aplicar prácticas de gestión más eficientes (Daza Zapata, 2018). Para poder establecer estas estrategias es necesario comprender la parte legislativa, para así determinar los límites aceptables respecto a la producción de residuos y los beneficios desde la parte de incentivos a la hora de implementar alguna de estas estrategias.

En Colombia, la regulación de la gestión de residuos se establece a través del decreto 4741 de 2005, el cual tiene como objetivo principal regular y establecer directrices precisas para la generación, manejo, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos, con el objetivo de prevenir la contaminación ambiental (Decreto 4741, 2005). En este decreto se establece los requisitos específicos para los generadores de desechos peligrosos, lo que incluye la clasificación y el etiquetado de los excedentes, así como la documentación de su generación y características. También garantiza el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final donde los actores deben incluir la construcción y operación de instalaciones autorizadas para este propósito, como rellenos sanitarios o incineradores. Además, dicha ley también regula y presenta las sanciones por incumplimiento de las disposiciones del decreto, promoviendo así el cumplimiento del mismo y la responsabilidad de la gestión de los residuos peligrosos (Díaz Guzmán, 2020). Otra ley que es de gran importancia para la mitigación de los contaminantes atmosféricos generados por las termoeléctricas es el decreto 02 de 1982, la cual en el 2015 con el decreto 1076 se unificó con el decreto 948 de 1995 (Decreto 1076 Del 2015, 2015). Estos decretos establecen un marco normativo para la vigilancia y el control de la contaminación al aire con fuentes fijas, así como las medidas de corrección y prevención.

En la actualidad, en Colombia no existen criterios establecidos para controlar las emisiones generadas por la operación de calderas, turbinas o motores que empleen gas natural como combustible (Decreto 2 de 1982, 1982). Hasta el momento las regulaciones de emisiones atmosféricas se rigen por los decretos anteriormente mencionados, para controlar las emisiones de calderas que utilizan como combustible el carbón en relación al material particulado y en establecer las alturas de la chimenea necesaria para la emisión de óxidos de azufre (Herrera Torres, 2008). La necesidad de implementar las regulaciones y mitigar los impactos ambientales de las termoeléctricas impulsa la búsqueda de tecnologías para aprovechar sus residuos. Una de las soluciones más comunes es la implementación de cogeneradores o

ciclos combinados, que aprovechan el calor residual, no obstante, existen otras técnicas que se explorarán a continuación, destacando su implementación, relevancia ambiental y social, así como su eficiencia económica y energética (Noor et al., 2015). La alternativa más asequible a adoptar en las centrales termoeléctricas es la de incorporar en su ciclo termodinámico un ciclo combinado, donde se aprovecha el calor residual del ciclo principal, que normalmente es un ciclo a gas. Dado que la implementación de esta tecnología consiste en adherir un nuevo ciclo con maquinaria nueva, este genera una inversión inicial alta. Es por esto que se debe tener en cuenta un análisis económico (Bori et al., 2022).

Gracias a un estudio económico-ambiental realizado en la planta termoeléctrica Machala i, la cual contempló la incorporación de un ciclo combinado, se observa que, a una proyección de 15 años, se tiene una perspectiva de rentabilidad moderada, a pesar de no tener una proyección de ganancias significativas, la planta está en la capacidad de compensar sus gastos fijos y variables con los ingresos generados. Observando la parte ambiental, tenemos que, al implementar el ciclo combinado, las reducciones en la liberación de CO<sub>2</sub> es del 34 %, demostrando así, que la adopción del ciclo combinado en las centrales termoeléctricas es viable. Además, es importante mencionar que al reducir la producción de CO<sub>2</sub>, la planta tiene el derecho de participar en los mercados de carbono, gracias a la disminución de dichas emisiones. Asimismo, como el incentivo al participar de dicho mercado está ligado a la cantidad de CO<sub>2</sub> en toneladas no producidas, entre más grande sea la planta termoeléctrica, mayor será dicho incentivo (Calle Morocho, 2013). Aun así, con la disminución de CO<sub>2</sub> liberado con el ciclo combinado, las plantas termoeléctricas siguen liberando cantidades preocupantes de CO<sub>2</sub> al ambiente, y para ello, existen alternativas para mitigar estos impactos al medio ambiente como lo es la descarbonización de las plantas mediante la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC), el uso de tecnologías de gasificación del carbón y la idea del llamado carbón limpio. La viabilidad de estas opciones depende de factores como el costo del carbón y del carbono, marcos legales y regulaciones, la aceptación pública y la implementación efectiva de estas tecnologías (Rogieri Pelissari et al., 2023).

La implementación de sistemas CAC en plantas termoeléctricas basadas en carbón con una capacidad instalada mayor a 300 MW puede ser una opción viable. Esto se debe a que el tiempo de vida útil de estas plantas suele ser lo suficientemente largo como para permitir la recuperación de la inversión en la implementación de tecnologías de sistemas CAC. Aunque inicialmente la implementación de este sistema requiere una inversión inicial significativa, los beneficios tanto a nivel ambiental debido a la reducción de emisiones como económico al cumplir con las regulaciones ambientales y participando de los mercados de carbono o recibir incentivos fiscales, conllevan a que en los empresarios se genere un mayor atractivo económico y, por consiguiente, la implementación de los sistemas CAC sean más factibles en una planta termoeléctrica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la viabilidad de estos sistemas también depende de la legislación, el precio del carbono, las regulaciones ambientales y la disposición de la planta en implementar el sistema CAC (Rogieri Pelissari et al., 2023).

Otro de los residuos que generan dichas plantas eléctricas es la ceniza volante, aproximadamente el 13 % de materia prima se transforma en ceniza volante después de la combustión. Este subproducto posee diversas aplicaciones gracias a sus propiedades químicas; por ejemplo, componentes puzolánicos como Silica (SiO<sub>2</sub>) y Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), las cuales pueden ser aprovechados como materia prima para la fabricación de cemento, además, si la ceniza contiene suficiente óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), estos restos pueden ser aprovechados en las industrias siderúrgicas. La utilización de ceniza volante residual de la planta termoeléctrica Termopaipa IV como adhesivo en la industria cementera ejemplifica la reutilización efectiva de los residuos generados por las termoeléctricas. Esta ceniza residual pertenece al tipo F según la norma NTC-3493 de 1993, este tipo de ceniza volante contiene más del 70% de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gracias a estos componentes químicos y a la presencia de aluminosilicatos amorfos presentes en este tipo de ceniza, la convierte en un material idóneo empleado en la producción de cemento (Bautista-Ruiz et al., 2017), (ICONTEC,1993). Un ejemplo del aprovechamiento de este subproducto en el material cementante, se evidencia en un estudio en el que se analizaron mezclas de

concreto convencionales con diferentes proporciones de material cementante (300, 350 y 400 Kg/m<sup>3</sup>). En estas mezclas experimentales, se reemplazó el 40 % del material cementante por un 70 % de ceniza volante y un 30 % de cal hidratada. Como conclusión de la investigación, se demuestra que es factible incorporar ceniza volante y cal hidratada en las mezclas con 350 y 400 kg/m<sup>3</sup> de material cementante ya que las propiedades del concreto no se ven afectadas por la adición de ceniza (Hurtado-Figueroa et al., 2020).

Una de las tecnologías que se han ido desarrollando en los últimos años es la gasificación del carbón, la cual se destaca por su bajo costo en comparación con otras tecnologías. Sin embargo, es importante tener en cuenta que tiene una gran desventaja y es la alta liberación de CO<sub>2</sub>, por tanto, es esencial encontrar un equilibrio entre la capacidad de generar electricidad, los costos de procesamiento y la captura y reducción de las emisiones. Para implementar dicha tecnología en Colombia, es necesario realizar un estudio y planificación energética sólida, optimizando la generación de electricidad y reduciendo la huella de carbono, adoptando tecnologías como la captura y almacenamiento de carbono (Insuasty-Reina et al., 2022). El proceso de gasificación del carbón se lleva a cabo de la siguiente manera: el carbón pulverizado se introduce en un gasificador, donde, mediante la adición de oxígeno y vapor, se genera así una reacción la cual da como resultado un gas sintético; este gas obtenido es sometido a diversos procesos de separación de componentes y como resultado se llega a la producción de hidrógeno azul. El hidrógeno azul, obtenido a partir de este proceso, puede utilizarse como una fuente de energía más limpia comparada con la quema directa del carbón en las centrales del país (Segundo Gutiérrez, 2018).

Para llevar a cabo una comparación precisa entre la matriz energética actual y la propuesta de implementación del hidrógeno azul, es necesario consultar fuentes alternas dado que dichas tecnologías aún no han sido implementadas en el país. La matriz energética actual, considerando sus fuentes de generación constantes, cubrirán la demanda proyectada en Colombia hasta el 2031. Con la implementación del hidrógeno azul, se amplía el periodo de cobertura de la demanda hasta aproximadamente el 2036, lo que da un resultado positivo en cuanto a seguridad energética a largo plazo. En cuanto al análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la implementación de esta tecnología trae beneficios de reducción de dichas emisiones teniendo en cuenta el nivel de producción en el proceso de gasificación y la captura de carbono. Debido a la complejidad de la técnica y los altos costos de la misma, es necesario para su implementación abordarla desde un ámbito económico y tomando en consideración los aspectos regulatorios (Insuasty-Reina et al., 2022).

A modo de conclusión, podemos afirmar que, en medio de la urgente necesidad de adaptarse al cambio climático, las naciones del mundo están impulsando la diversificación de las fuentes de generación de energía eléctrica, buscando reducir así la dependencia de combustibles fósiles que son altamente contaminantes. A pesar de este impulso hacia energías más limpias, las termoeléctricas mantienen un rol significativo en la matriz energética y su contribución se basa en dos pilares fundamentales: la confiabilidad que aportan a la estabilidad de los sistemas eléctricos y la infraestructura existente ya que en muchos países dependen más del 50 % de este tipo de generación. Es innegable que la fiabilidad y consistencia que ofrecen las termoeléctricas han sido esenciales para sostener la demanda energética, especialmente en Colombia donde mayormente la generación depende de fuentes hídricas. Es por esto que se requieren continuas investigaciones y desarrollo tecnológico que tengan como objetivo mejorar la eficiencia y minimizar su huella ecológica.

Al día de hoy, se han estudiado diversas tecnologías para aprovechar los residuos generados por las plantas termoeléctricas que funcionan a carbón o gas. Una de estas opciones prometedoras es la reutilización de cenizas volantes en la fabricación de cemento, ofreciendo una alternativa para evitar la acumulación de estos residuos en vertederos. Otra área de gran importancia es la implementación de sistemas de captura y almacenamiento de carbono, esta tecnología es primordial para la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta captura puede ir complementada con el

aprovechamiento del calor residual por medio del ciclo combinado, dado que este al ser incorporado, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen un 30 % aproximadamente. Otra tecnología prometedora es la gasificación del carbón, que, a diferencia de la quema directa, la gasificación transforma el carbón en un gas sintético, permitiendo un proceso más limpio y eficiente.

Además de los beneficios medioambientales, la implementación de estas tecnologías implica beneficios económicos, tales como la venta de cenizas, la reutilización de calor residual para la generación de energía y otros procesos productivos y la participación de los mercados de carbono. Se requiere un esfuerzo significativo en Colombia en términos de investigación y aplicación de estas tecnologías, ya que pueden desempeñar un papel crucial en el progreso del país, esto abarca que la transición energética sea más sostenible, el incremento de la eficiencia de las plantas termoeléctricas, la garantía de un mercado energético más estable y confiable, la protección del medio ambiente y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La inversión en estas tecnologías no solo beneficia el desarrollo económico y energético de Colombia, sino que también contribuye al cuidado del medio ambiente y a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

## Referencias

- ACOLGEN. (n.d). VISIÓN-2030. [https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2022/04/ACOLGEN\\_VISION-2030.pdf](https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2022/04/ACOLGEN_VISION-2030.pdf)
- Bautista-Ruiz, W. A., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 135-146. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>
- Bori, I., Orah, A. M., & Ayo, S. A. (2022). Techno-economic analysis of combined cycle power plants for electricity generation in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 41(4), 729-738. <https://doi.org/10.4314/njt.v41i4.10>
- Calle Morocho, F. F. (2013). Determinación de los beneficios económicos y ambientales por la conversión de la central termogas Machala i a una central con ciclo combinado [Tesis de Ingeniería Eléctrica, UNIVERSIDAD DE CUENCA]. <http://dspace.ucuenca.sedu.ec/handle/123456789/4304>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2006). RESOLUCIÓN 71 DE 2006. Por la cual se adopta la metodología para la remuneración del cargo por confiabilidad en el Mercado Mayorista de Energía.
- Daza Zapata, C. S. (2018). Análisis al proceso de evaluación ambiental en la gestión de residuos sólidos para centrales termoeléctricas sometidas al sistema de evaluación de impacto ambiental [Tesis de Química Ambiental, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168102>
- Díaz Guzmán, C. (2020). Diagnóstico y seguimiento a la gestión de residuos peligrosos de la Central Termoeléctrica GECELCA 3 S.A.S. E.S.P. [Tesis de ingeniería ambiental, Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3907>
- European Commission. (2003). Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.



- European Environment Agency (EEA). (2023, June 28). Waste generation in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-generation-and-decoupling-in-europe?activeAccordion=ecdb3bcf-bbe9-4978-b5cf-0b136399d9f8>
- Herrera Torres, Gabriel. L. L. Cristina. S. Q. M. V. (2008). Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. *Épsilon*, 10(6).
- Hurtado-Figueroa, O., Bonilla-Granados, C. A., & Cardenas-Gutierrez, J. A. (2020). Concrete slump with partial replacement of cementitious material by fly ash and hydrated lime: Asentamiento en concretos con reemplazo parcial de material cementante por ceniza volante y cal hidratada. *Respuestas*, 25(S2), 46-52. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/2301>
- ICONTEC (1993). NTC 3493. Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento pórtland.
- Insuasty-Reina, J. G., Osorio-Gomez, J. C., & Manotas-Duque, D. F. (2022). A System Dynamics Model for the Analysis of CO2 Emissions Derived from the Inclusion of Hydrogen Obtained from Coal in the Energy Matrix in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(2), 72-82. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12538>
- Kostova, I., Apostolova, D., Bechtel, A., Groß, D., & Stefanova, M. (2023). Fly ashes generated from coal-fired thermoelectric power plants on the Balkan Peninsula – Organic geochemical study. *International Journal of Coal Geology*, 276, 104326. <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2023.104326>
- Maia, R., Ottoni, M., Barros, J., & dos Santos, M. A. (2021). Assessment of the waste management reporting in the electricity sector. *Cleaner and Responsible Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2021.100031>
- Martinez, J. (2005). Fundamentos Tomo 1. In *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos* (Vol. 1).
- Mastrángelo, S. (2002). Conceptos de Generación Termoeléctrica: Combustibles Utilizados e Impactos Ambientales. *Boletín Energético* N° 10, Comisión Nacional de Energía Atómica, Grupo de Prospectiva y Planeamiento Energético.
- Mateus Valencia, A. C. (2016). Crisis energética en Colombia. *Tecnología Investigación y Academia* (TIA), 4(2), 74-81. <http://hdl.handle.net/11349/21158>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Colombia. (2005). Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (20015). Decreto 1076 del 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo sostenible.
- Naik, S., & Satya Eswari, J. (2022a). Electrical waste management: Recent advances challenges and future outlook. *Total Environment Research Themes*, 1-2, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2022.100002>

- Noor, A., Puteh, R., Ricardo, M.-B., Romagnoli, A., Basheer, U., Hussein, S., Salleh, S., Hanafi, M., & Md Sah, M. H. (2015, October). Technologies for Waste Heat Energy Recovery from Internal Combustion Engine: A Review. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14893.90084>
- Prado Guevara, M. B. (2017). Propuesta de gestión integral de desechos peligrosos generados en las centrales termoeléctricas de la Unidad de Negocios Termopichincha ubicadas en la zona Sierra. [Tesis de Ingeniería Ambiental, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17452>
- Presidente de la República de Colombia. (1982). Decreto 2 de 1982. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a las emisiones atmosféricas.
- Restrepo Estrada, M, Arango Aramburo, S y Vélez, L. (2012). La confiabilidad en los sistemas eléctricos competitivos y el modelo colombiano de cargo por confiabilidad. Facultad de Ciencias Económicas - Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/43000>
- Rogieri Pelissari, M., San Martín Cañas, S., Oliveira Barbosa, M., & Gaeta Tassinari, C. C. (2023). Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to a thermoelectric complex in Brazil. *Results in Engineering*, 19, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101249>
- Segundo Gutiérrez, J. (2018). Simulación de una planta de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC) mediante Aspen Plus. Comparación entre configuraciones sin captura y con captura de CO<sub>2</sub>. <http://hdl.handle.net/10498/20045>
- Shah, S. A. R., Zhang, Q., Abbas, J., Tang, H., & Al-Sulaiti, K. I. (2023). Waste management, quality of life and natural resources utilization matter for renewable electricity generation: The main and moderate role of environmental policy. *Utilities Policy*, 82, 101584. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2023.101584>
- Ugarte-Avilés, T., Manterola, C., Cartes-Velásquez, R., & Otzen, T. (2017). Impact of proximity of thermoelectric power plants on bronchial obstructive crisis rates. *BMC Public Health*, 17(1), 96. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-4008-7>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). Plan Energético Nacional 2020-2050. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)

## **¿La regulación ambiental actual en Colombia promueve la mitigación de los gases de efecto invernadero de la generación eléctrica?**

Jorge Leonardo Rico Ortiz - Luis Alejandro Toro Hernández  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La producción de energía eléctrica es fundamental para el progreso de las sociedades contemporáneas, ya que permite el funcionamiento de hogares, empresas y servicios básicos. Sin embargo, la paradoja que nos encontramos es que la mayoría de la generación de energía se ha basado en fuentes convencionales de energía fósil como el gas natural, el petróleo y el carbón, las cuales, aunque son eficientes, también son consideradas unas de las principales culpables de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. A pesar de que las fuentes de energía convencionales han sido cruciales para abastecer la creciente demanda de energía en las sociedades modernas, su quema para generar electricidad resulta en la liberación considerable de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero como el metano, hidrofluorocarbonos, óxidos de nitrógeno y vapor de agua. Estas emisiones de gases de efecto invernadero se han identificado como uno de los principales impulsores del cambio climático a nivel mundial con consecuencias perjudiciales que incluyen el aumento de las temperaturas globales, el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar y la intensificación de fenómenos climáticos extremos. (Giraldo, 2018).

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 59-67  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Es bien sabido que el 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia provienen de la producción de energía eléctrica mediante fuentes convencionales. Esto indica que el país tiene un gran potencial para reducir sus emisiones mediante la transición a una generación de energía eléctrica más limpia y sostenible, logrando progresos en la regulación ambiental de la producción de energía eléctrica en Colombia, todavía hay importantes debilidades en el impulso a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, por eso es necesario abordar de manera inmediata estas carencias mediante la implemen-

tación de políticas más enérgicas y efectivas que promuevan la transición hacia fuentes de energía más ecológicas y sostenibles. Cabe recalcar que las plantas hidroeléctricas representan el 68 % de la oferta energética en Colombia y estas plantas generan menos gases de efecto invernadero en comparación con las fuentes de energía no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural las cuales representan (50, 40 y 25) veces más respectivamente, este es un aporte importante para cumplir con los compromisos internacionales y contribuir al enfrentamiento del problema del cambio climático. Los objetivos más importantes para enfrentar el problema de gases de efecto invernadero, radica en la legislación dirigida a convertir el sistema eléctrico colombiano en un sistema sostenible, el cual ayude a mitigar los gases de esta índole. En este contexto, las regulaciones ambientales son cruciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la generación de energía eléctrica. (Giraldo, 2018)

Además, las normas actuales han establecido objetivos ambiciosos como la disminución del 20 % de las emisiones para el año 2030, lo que demuestra un compromiso firme en la lucha contra el cambio climático, estas normativas han introducido diversas estrategias para lograr estos propósitos, como la instauración de un sistema de incentivos destinado a estimular proyectos de energía renovable, el posicionamiento de un mercado de carbono y el establecimiento de estándares técnicos para mejorar la eficiencia energética. Aunque la aplicación de estas herramientas ha tenido un impacto positivo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de energía en Colombia, es necesario perfeccionar su implementación para cumplir con los objetivos climáticos del país. Por lo tanto, se resalta la importancia de fortalecer las regulaciones medioambientales como un avance fundamental para que Colombia cumpla con sus compromisos en materia climática y avance hacia la neutralidad de carbono. La neutralidad de carbono implica equilibrar las emisiones de carbono con acciones que eliminan o compensan una cantidad equivalente de emisiones. Esto podría lograrse a través de la reforestación, el uso de tecnologías de captura de carbono, y otras estrategias que reduzcan la huella del país, fortaleciendo las regulaciones medioambientales para garantizar el cumplimiento de estos compromisos y avanzar hacia un desarrollo sostenible y respetuoso con el medio ambiente. (Reyes. 2023)

Para empezar, los desafíos ambientales inherentes a la generación de energía eléctrica a través de fuentes convencionales en Colombia, es esencial comprender que estas fuentes han desempeñado un papel fundamental en la satisfacción de la demanda energética y el fomento del crecimiento económico en el país. La disponibilidad de recursos fósiles ha asegurado un suministro ininterrumpido de electricidad, habilitando el florecimiento de la industria y contribuyendo a una mejora en la calidad de vida de la población. Colombia es rico en recursos naturales, destacando la energía hidroeléctrica en un 68 %, los cuales tienen el potencial de complementar la producción energética convencional y al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental. Colombia se encuentra en una posición privilegiada para aprovechar estos recursos, lo que le permite mantener un equilibrio en su matriz energética, pero el desafío central radica en hallar la armonía entre la creciente demanda energética y la reducción de los efectos ambientales. La diversificación de la matriz energética y la inversión en tecnologías más amigables con el medio ambiente pueden ser vías a seguir para Colombia en esta búsqueda, aunque no debemos pasar por alto la invaluable contribución histórica de las fuentes convencionales al progreso del país.

Con respecto a lo anterior, las emisiones de gases de efecto invernadero debido a su fuerte dependencia de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, Colombia enfrenta importantes problemas ambientales en el país como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que se libera durante la combustión de carbón, petróleo y gas natural, la elevación del nivel del mar, que representa una amenaza directa para las áreas costeras, y la agravación de las sequías e inundaciones, que tienen un impacto significativo en la agricultura y la disponibilidad de agua dulce. La biodiversidad de Colombia es extraordinariamente rica y diversa, ubicándose entre las más destacadas a nivel mundial. Esta riqueza se debe a la variedad de ecosistemas presentes en el país, que incluyen selvas tropicales, páramos, manglares, sabanas y diversos tipos de bosques. La conservación de la biodiversidad en Colombia y en

todo el mundo requiere esfuerzos concertados para mitigar el cambio climático, proteger hábitats críticos, implementar prácticas sostenibles y fomentar la adaptación de las especies a las nuevas condiciones ambientales. La comprensión y concienciación sobre estos problemas son esenciales para abordar estos desafíos y proteger la valiosa biodiversidad del país. (Rangel, 2015)

Por lo tanto, es necesario utilizar fuentes de energía más limpias y sostenibles, como la energía solar, y eólica, para contrarrestar estos efectos negativos y cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones. Las opciones mencionadas no solo permitirán disminuir las emisiones, sino también disminuir los efectos del cambio climático en Colombia. La contaminación atmosférica debido a la quema de combustibles fósiles no solo provoca el cambio climático, sino que también produce contaminantes nocivos en la atmósfera. Estos contaminantes, que incluyen partículas finas, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), tienen efectos negativos significativos en la calidad del aire y la salud de las personas. La exposición prolongada a estas sustancias está relacionada con enfermedades respiratorias, como el asma y la bronquitis, así como enfermedades cardiovasculares y en algunos casos, cáncer. También, la contaminación del aire tiene un impacto desproporcionado en las áreas vulnerables y desfavorecidas, lo que agrava las desigualdades sociales en Colombia. (Ladrián, 2018)

Es por esto que el Ministerio de Salud y Protección Social del país informó que la contaminación del aire causó alrededor de 13,000 muertes prematuras en 2022. Alarmanamente, la exposición a contaminantes producidos por la generación de energía eléctrica es responsable del 20 % de estas muertes. Esto enfatiza la urgencia de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y utilizar tecnologías más verdes para generar energía eléctrica. El agotamiento de recursos naturales en la economía de Colombia depende en gran medida de la extracción de combustibles fósiles, que proporciona una gran cantidad de energía. Los recursos como el petróleo, el gas natural y el carbón son esenciales para el progreso industrial y económico de la nación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la extracción insostenible de estos recursos puede causar graves daños ambientales como la degradación ambiental, contaminación del agua y del aire, impacto en la Salud humana, Conflicto y desplazamiento, entre otros, además de poner en peligro su disponibilidad en el futuro. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022)

Por ejemplo, en cuanto al agotamiento de los recursos naturales no renovables, si no se gestiona de manera responsable, la explotación intensiva de estos recursos puede terminar rápidamente las reservas existentes. Esta situación no solo pone en peligro la seguridad energética y económica de la nación a largo plazo, sino que también puede tener efectos perjudiciales en el medio ambiente como se mencionó anteriormente. La pérdida de estos recursos es un problema que tendría un impacto en una variedad de áreas de la sociedad y podría obstaculizar el progreso sostenible, la extracción de petróleo y gas natural implica el peligro de derrames que pueden causar daños significativos al medio ambiente. Los derrames de petróleo pueden afectar la biodiversidad local, los ecosistemas terrestres y los cuerpos de agua. Estos eventos pueden afectar la salud de los ecosistemas a corto y largo plazo, así como la recuperación de la flora y fauna afectada.

Por lo tanto, es esencial que se lleve a cabo de manera responsable para garantizar que estos recursos estén disponibles a largo plazo y reducir los efectos ambientales de su extracción y transporte. Esto implica la adopción de prácticas y tecnologías más limpias y seguras, así como regulaciones más estrictas para prevenir derrames y reducir sus efectos ambientales. A medida que Colombia se enfrenta a los desafíos del agotamiento de recursos y la preservación del medio ambiente, la gestión sostenible de los recursos no solo protegerá el entorno natural, sino que también contribuirá a la seguridad y estabilidad económica del país como la diversificación económica, la cual ayuda a reducir la dependencia de la economía en recursos no renovables mediante la diversificación económica, invertir en sectores como las energías renovables, el turismo sostenible, la agricultura y la tecnología verde, la resiliencia ante fluctuaciones en los precios de los recursos, estos involucran a los precios de los recursos naturales los cuales son volátiles y pueden verse afectados por factores globales, diversificar la economía reduce la

vulnerabilidad del país a estas fluctuaciones, proporcionando una base más estable para el crecimiento económico, la generación de empleo sostenible que puede generar empleo a largo plazo, especialmente en áreas como las energías renovables y la conservación del medio ambiente.

Por otro lado, la deforestación de áreas naturales, la alteración de los cursos de agua, la pérdida de hábitats, la pérdida de biodiversidad natural y la degradación del suelo, debido a la construcción y operación de centrales eléctricas tradicionales, pueden causar alteraciones directas a los ecosistemas, y estos son aspectos comunes de la construcción de infraestructuras energéticas, es aquí donde entran en funcionamiento las normativas para la mitigación y mejora de todos los aspectos negativos y perjudiciales que se mencionaron anteriormente. La infraestructura es un aspecto importante para respaldar el crecimiento de las energías renovables en Colombia que no se puede ignorar durante este proceso de transición. Esto implica la creación de nuevas redes de distribución y transmisión que puedan transportar la energía renovable a los centros de consumo de manera eficiente. Incluso cuando existe la voluntad de adoptar tecnologías más limpias, la falta de infraestructura adecuada puede perjudicar la expansión de las fuentes de energía renovable. Es por esto que se requiere la adquisición de estas infraestructuras y así poder tener viabilidad con respecto a energías renovables y también ofrece la posibilidad de modernizar y mejorar el sistema energético en general.

También, los límites a las emisiones de contaminantes en Colombia tienen regulaciones que restringen estas emisiones porque juegan un papel importante en la disminución de los efectos ambientales de la producción de energía eléctrica. Estas regulaciones son esenciales para combatir la contaminación del aire y reducir los efectos perjudiciales que tiene en la salud humana y el medio ambiente. La Resolución 909 de 2023 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia es un ejemplo notable de estas regulaciones, las cuales establecen limitaciones precisas a la cantidad de gases y partículas contaminantes que las centrales eléctricas, las plantas industriales y otras instalaciones pueden liberar a la atmósfera. Los límites establecidos abordan tanto las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los contaminantes atmosféricos, como las partículas finas, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los cuales fueron mencionados anteriormente con sus respectivas afectaciones. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

En ampliación, en Colombia los Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y Minas y Energía (MME) están a cargo de la regulación ambiental de la producción de energía eléctrica. Estas organizaciones han establecido varias regulaciones con el fin de reducir los efectos negativos que tiene la producción de energía eléctrica en el medio ambiente. Entre las principales normativas de mitigación del impacto ambiental por la generación de energía eléctrica en Colombia que se encuentran referenciadas al final del documento, como por ejemplo la Resolución 0912 de 2013 del MADS, la cual establece los requisitos ambientales para la construcción, operación y mantenimiento de centrales eléctricas. Entre los requisitos más importantes se encuentra la evaluación del impacto ambiental que se refiere a que las empresas deben realizar una evaluación del impacto ambiental de sus proyectos de generación de energía eléctrica. Esta evaluación debe considerar los posibles impactos ambientales como las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica, el agotamiento de recursos naturales, la alteración de los ecosistemas y el desplazamiento de poblaciones. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

Otras acciones de las compañías que deben ponerse en marcha son las de reducción, con el fin de disminuir los efectos ambientales de sus proyectos de producción de electricidad. Estas acciones podrían implicar la adopción de fuentes de energía sostenible, el cumplimiento de normativas de eficiencia energética, la disminución de emisiones de contaminantes atmosféricos y la preservación de los recursos naturales. La consulta y participación se refiere a que las empresas deben consultar y participar con las comunidades afectadas por sus proyectos de generación de energía eléctrica. Esta consulta debe realizarse de manera previa, informada y libre. La Resolución 911 de 2013 del MADS establece los requisitos ambientales para la construcción, operación y mantenimiento de líneas de

transmisión eléctrica. Entre los requisitos más importantes se destaca la evaluación del impacto ambiental, el cual informa que las empresas deben realizar una evaluación del impacto ambiental de sus proyectos de construcción de líneas de transmisión eléctrica. Esta evaluación debe considerar los posibles impactos ambientales, como la pérdida de hábitat, la fragmentación de ecosistemas y el impacto visual. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

En cuanto a las medidas de mitigación, se destaca que las empresas deben implementar medidas de mitigación para reducir los impactos ambientales de sus proyectos de construcción de líneas de transmisión eléctrica. Estas medidas pueden incluir la selección de rutas que minimicen el impacto ambiental, la restauración de los hábitats afectados y la compensación por el impacto visual. Mencionando la Resolución 067 de 2016 del MME, esta resolución establece los criterios para la evaluación de la calidad del aire en centrales eléctricas. Entre los criterios más importantes se encuentran los monitoreos de la calidad del aire, hace referencia a que las centrales eléctricas deben realizar un monitoreo regular de la calidad del aire. Este monitoreo debe incluir la medición de las concentraciones de gases contaminantes, como el dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y las partículas finas. Los límites de emisión y las centrales eléctricas deben cumplir con límites de emisión para los gases contaminantes. Estos límites están diseñados para proteger la salud humana y el medio ambiente. (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

Para el caso de las medidas de control de emisiones, son las centrales eléctricas las que deben implementar medidas de control de emisiones para reducir las emisiones de gases contaminantes. Estas medidas pueden incluir el uso de filtros y depuradores. Como se mencionó anteriormente, los combustibles fósiles han sido ampliamente utilizados durante más de dos siglos. Además de ser limitadas, estas fuentes tienen un impacto significativo en el medio ambiente, lo que contribuye al cambio climático. Debido a su eficiencia y bajo costo, siguen siendo la principal fuente de energía en la matriz energética global, a pesar de estos efectos negativos (*International Energy Agency*, 2016). A nivel global, los combustibles fósiles representan aproximadamente el 66 % de la energía, mientras que las plantas hidroeléctricas representan el 16,6 % y las plantas nucleares el 10,6 %. Las fuentes de energía no convencionales, que suelen depender de recursos renovables, sólo representan el modesto 6 %.

Por otra parte, la situación en Colombia es similar, en 2012, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) informó que alrededor del 93 % de la producción y generación de energía del país se realizaba a través de recursos de origen fósil. El 46 % de este porcentaje se destina a la producción de carbón mineral, el 38 % a la producción de petróleo y el 9 % a la producción de gas natural, lo que deja solo un 7 % para la generación de energía a partir de fuentes renovables no convencionales. Finalmente, la información revela la importancia de fomentar y ampliar la producción de energía a partir de fuentes renovables no convencionales de manera más amplia y sostenible tanto en Colombia como en el resto del mundo. Esto es fundamental para enfrentar el cambio climático y prevenir una crisis energética en el momento en que se agoten los recursos no renovables, que como se ha venido mencionando, y como su nombre lo indica, no son renovables.

En conclusión, es evidente que Colombia enfrenta grandes desafíos ambientales derivados de su dependencia en fuentes convencionales para la generación de electricidad. Si bien estas fuentes han sido clave para el desarrollo económico, la quema de combustibles fósiles está teniendo graves consecuencias como las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica y la degradación de ecosistemas. Para avanzar hacia un futuro energético más sostenible, es crucial que Colombia acelere la transición hacia fuentes renovables no convencionales como la eólica, solar, biomasa y geotérmica. Adicionalmente, se deben fortalecer los marcos regulatorios y los incentivos para promover más decididamente estas tecnologías limpias. Asimismo, es necesario adoptar medidas para mitigar el impacto ambiental de la extracción de recursos fósiles, mejorando los estándares, la vigilancia y la responsabilidad empresarial. En cuanto a las iniciativas ciudadanas y la concienciación pública en

torno a estos desafíos serán fundamentales para lograr los cambios que el país requiere con urgencia en su matriz energética, en aras de la sostenibilidad ambiental y el bienestar de las futuras generaciones.

En consecuencia, la diversificación de la matriz energética fortalece la economía nacional y reduce la vulnerabilidad a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles en los mercados globales. Además, la gestión sostenible de los recursos naturales no renovables es fundamental para mantener un suministro de energía a largo plazo y proteger el entorno natural y puesto que la dependencia de fuentes convencionales para la producción de electricidad en Colombia ha mostrado grandes beneficios económicos, pero también graves consecuencias ambientales que no pueden ser ignoradas. La quema de combustibles fósiles está amenazando los ecosistemas del país y comprometiendo su biodiversidad. Asimismo, las emisiones de gases de efecto invernadero ponen en riesgo el cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales. Por esto, no se debe postergar la transición energética en Colombia y así diversificar la matriz con un mayor aprovechamiento del inmenso potencial renovable, ya que deben pasar a un primer plano. Simultáneamente, es clave fortalecer la institucionalidad y regulación ambiental del sector, asegurando prácticas sostenibles en toda la cadena de producción y consumo. Cumplir con las metas climáticas y proteger el medio ambiente debe ser una política de Estado. Sólo así se podrá garantizar el bienestar de las actuales y futuras generaciones.

## Referencias

- Arango A., M. A., & Arroyave O., S. (2016). Análisis de combustibles fósiles en el mercado de generación de energía eléctrica en Colombia: un contraste entre modelos de volatilidad. *Revista De Métodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa*, 22, Páginas 190 a 215. <https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.2347>
- Bacca-García, J. O., & Toro, J. (2021). Análisis de la vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia. *Gestión y ambiente*, 24(Supl2), 27-45. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.92923>
- Ballesteros-Ballesteros, V A, & Gallego-Torres, A P. (2019, 10 de febrero). Model of Education in Renewable Energies from the Public Engagement and the Energetic Attitude. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(52), 27-42. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9652>
- Beltrán Gómez L. V. (2016). Análisis de los diferentes tipos de energías alternativas y su implementación en Colombia. *Universidad militar nueva granada*, 3-19, <http://hdl.handle.net/10654/14563>
- Castañeda Álvarez, C. (2020, 4 de febrero) Efectos económicos de la transición energética en la exportación de petróleo en Colombia. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8355>
- Cárdenas, C., & Alejandro, M. (2020). Estudio al respecto de la reglamentación para el uso de fuentes de energía alternativa en Colombia. Análisis de sus características, aspectos a mejorar y visión a la luz de las acciones internacionales. *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*, 14-19, de <http://hdl.handle.net/20.500.12010/12896>
- Compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Consecuencias económicas, C. de R. de E. de G. (s/f). *Archivos de economía. Gov.co*. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/440.pdf>
- Corredor, C. A. A., Díaz, A. L. A., Lugo, D. C. R., & Sánchez, D. (2019, 31 de agosto). Propuesta para la reducción de aportes de gases de efecto invernadero, asociados a Los sistemas de transporte, utilizados por la comunidad académica de las unidades tecnológicas de santander, uts, en



- Bucaramanga, Santander, Colombia. Artículo Científico. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/dfaea2a43b5b59e5c62efa487849dfa4072476f8>
- Di-Terlizzi-Escallón, S., Gama-Rodríguez, I. D., & Jaramillo-Quintero, T. (2021). Transición energética en Colombia: No necesariamente una realidad que se sustenta en el cambio climático. *Unilibre*, 46(2), 105-128. <https://doi.org/10.18041/0121-3474/verbaiuris.2.8493>
- García-Rodríguez, L. E., & González-Guzmán, L. G. (2022). Uso de la tecnología convencional para la reducción de agua de consumo y gases de efecto invernadero a través de la recirculación del agua residual no doméstica: Piloto Industrial en Colombia. *Economía Circular. Revista Fuentes el reventón energético*, 20(2), 75-90. Recuperado de <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n2-2022007>
- Giraldo, M., Vacca Ramírez, R., & Urrego Quintanilla, A. (2018). las energías alternativas ¿una oportunidad para Colombia? *Punto de Vista*, 9(13). <https://doi.org/10.15765/pdv.v9i13.1117>
- Helena, G. Alejandra C., Laura C., & Miguel G. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. *Org.co*. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/331/Repor\\_Octubre\\_2013\\_Garcia\\_et\\_al.pdf?isAllowed=y&sequence=3](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/331/Repor_Octubre_2013_Garcia_et_al.pdf?isAllowed=y&sequence=3)
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Fisher, S., Suk, W. A., Sly, P. D., Chiles, T. C., & Bose-O'Reilly, S. (2018). Pollution and children's health. *Science of the Total Environment*, 650, 2389-2394. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.375>
- López, A. A. M. (2021). Manual de buenas prácticas aplicables a las actividades generadoras de emisiones de gases de efecto invernadero en las instalaciones de la empresa alico s.a - un apoyo para la gestión de la huella de carbono corporativa. *Edu.co*. Recuperado 16 de noviembre de 2023, de [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/20399/5/ArbelaezAna\\_2021\\_BuenasPracticasAmbientales.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/20399/5/ArbelaezAna_2021_BuenasPracticasAmbientales.pdf)
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2022). Informe de calidad del aire y salud 2022. *H* <https://www.minsalud.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Resolución 909 de 2023 por la cual se establecen los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Resolución 0912 de 2013 por la cual se adoptan los criterios y parámetros para el seguimiento a los vertimientos realizados a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). Resolución 067 de 2016 por la cual se establecen los criterios de evaluación de la calidad del aire y de los sistemas de ventilación de las centrales térmicas de generación eléctrica. <https://www.minenergia.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Resolución 911 de 2013 por el cual se establecen los Estándares de Calidad del Aire y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co>
- Madrid, J. A. (2016). Construcción de explicaciones en torno al uso de combustibles fósiles y una posible

crisis energética global a partir del estudio de cuestiones socialmente vivas. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/327>

- Obregon, L., Valencia, G., & Duarte, J. (2019). Study on the applicability of sustainable development policies in electricity generation systems in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 492-502. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8375>
- Palacios Mosquera, J. C., & Salazar Blandón, B. A. (2022, 16 de septiembre). Diseño de un sistema solar fotovoltaico para atender la demanda energética y reducir los gases de efecto invernadero en la población del corregimiento de Boca de León - Alto Baudó. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba Quibdó, Colombia. 3(10).
- Palazuelos, E. (2019). *El oligopolio que domina el sistema eléctrico*. Ediciones Akal. [https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=aRW3DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=La+producci%C3%B3n+de+energ%C3%ADa+el%C3%A9ctrica+es+fundamental+para+el+progreso+de+las+sociedades+contempor%C3%A1neas,+ya+que+permite+el+funcionamiento+de+hogares,+empresas+y+servicios+b%C3%A1sicos&ots=8GgKEW36y0&sig=pbYmcpdBQS0WqN\\_mYfdmE8fifw](https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=aRW3DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=La+producci%C3%B3n+de+energ%C3%ADa+el%C3%A9ctrica+es+fundamental+para+el+progreso+de+las+sociedades+contempor%C3%A1neas,+ya+que+permite+el+funcionamiento+de+hogares,+empresas+y+servicios+b%C3%A1sicos&ots=8GgKEW36y0&sig=pbYmcpdBQS0WqN_mYfdmE8fifw)
- Peñalosa-Bernal, J. P., & Ossa-Carrasquilla, L. C. (2023, 8 de junio). Estimación de gases de efecto invernadero emitidos por la paca biodigestora durante el tratamiento de residuos orgánicos. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 55-69. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.05>
- Pereira-Blanco, M. J. (2015, 1 de enero). Relación entre energía, medio ambiente y desarrollo económico a partir del análisis jurídico de las energías renovables en Colombia. Recuperado 16 de noviembre de 2023, de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/saber/article/view/868>
- Rangel-Ch, J. O. (Ed.). (2015). *Colombia Diversidad Biótica XIV: La región de vida paramuna en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramos-Cárdenas, M. C., Hernández-Cipamocha, D. C., Pérez-Arenas, H. Y., & Sierra-Cárdenas, E. (2019, 20 de diciembre). análisis y perspectivas de la implementación de tecnologías limpias para la generación de energía en Colombia. *I3+*, 4(2). Vol.4 Núm. 2(2019). Recuperado de <https://doi.org/10.24267/23462329.941>
- Ramos-Sanz, A. I. (2020). Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una matriz energética sustentable mediante análisis de escenarios. Estudio de caso en zonas áridas con alto riesgo hídrico. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(2), 114-125. Vista de Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una matriz energética sustentable mediante análisis de escenarios. Estudio de caso en zonas áridas con alto riesgo hídrico ([ucatolica.edu.co](http://ucatolica.edu.co))
- Reyes-Gil, R. E., Turriago-Hoyos, Á., Cárdenas Piñeros, M., & Danna-Buitrago, J. P. (2023, 20 de febrero). Análisis de Políticas Públicas para la adopción de Energías Renovables No Convencionales en Colombia. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, Cuadernos Latinoamericanos de Administración, 19(36). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v19i36.4052>
- Resoluciones-archivos. (s. f.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado 16 de noviembre de 2023, de *Resoluciones archivos - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* ([minambiente.gov.co](http://minambiente.gov.co))

- Rodríguez-Buitrago, A. M., & Gutiérrez, F. (2018, 15 de mayo). Reducción de la huella de carbono por medio de la implementación de un sistema fotovoltaico en el sector hotelero. Caso de estudio anaira hostel (Leticia-Amazonas - Colombia). *Revista de Tecnología*, 16(1), 169. <https://doi.org/10.18270/rt.v16i1.2323>
- Salazar, A. (2023, 24 de enero). Caracterización del potencial térmico RSU, para la generación de energía eléctrica, utilizando carbonización hidrotérmica. *Ingenius*, 29, 58-65. <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.05>
- SÁNCHEZ PÉREZ G. (Marzo 2002). Desarrollo y medio ambiente: una mirada a Colombia. Recuperado 16 de noviembre de 2023, 3-20, de <https://guao.org/sites/default/files/biblioteca/Desarrollo%20y%20medio%20ambiente%20una%20mirada%20a%20Colombia.pdf>
- Serna, M., & Andres, D. (2015, 29 de enero). Lógica en la toma de decisiones de inversión en el sector de extracción de petróleo y gas natural. *Colegio mayor de nuestra señora del rosario*, 11-38, [https://doi.org/10.48713/10336\\_10189](https://doi.org/10.48713/10336_10189)
- Sierra-Ramírez, E, Andrade-Castañeda, H J, & Segura-Madrigal, M A. (2022). Impacto de las características de los hogares urbanos en las emisiones de gases de efecto invernadero en Ibagué, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 12(2), 293-304. <https://doi.org/10.19053/20278306.v12.n2.2022.15272>
- Valdés García, E. (2019, 12 de noviembre). Metodología multiobjetivo para la planificación sostenible de la expansión de generación y transmisión del sector eléctrico. Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/17997>
- Vera-Vásquez, M. E., López, J. R., & Arévalo Gómez, W. A. (2023, 31 de mayo). Reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) en el Comedor Universitario de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas de La Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Impresa)*, 26(51). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25314>

## **Más allá de la energía: Explorando las implicaciones de las grandes hidroeléctricas a niveles regionales y fortalecer su camino hacia una energía renovable sustentable.**

Anthony Parra Malaver - Leonardo Diaz Orozco  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Las centrales hidroeléctricas generan energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía potencial contenida en el flujo de agua, estas desempeñan un papel crucial en la matriz energética global. La mayor composición de centrales generadoras a nivel mundial aprovecha el agua como recurso para generar energía. Según (*Energy Agency, 2021*) “A nivel mundial, la industria hidroeléctrica cubre casi el 17 % de la demanda mundial de electricidad”, contribuyendo así significativamente a la estabilidad y sostenibilidad del suministro energético. Estas instalaciones de generación pueden estar clasificadas según la magnitud de su capacidad, adaptándose a las diversas necesidades y condiciones geográficas de cada región. Además de su importancia como fuente de energía renovable, las hidroeléctricas también proporcionan beneficios adicionales, como el almacenamiento de energía y la regulación del suministro eléctrico, lo que las convierte en una opción integral para el desarrollo sostenible a nivel mundial.

La construcción y operación de centrales hidroeléctricas a gran escala generan una serie de impactos ambientales significativos, aunque las centrales más pequeñas también lo hagan, el enfoque se centrara en las primeras. Además de los cambios en el territorio y las alteraciones en el ecosistema natural, estas instalaciones pueden perturbar el ciclo de vida de la fauna local al modificar el flujo natural del agua, afectando los patrones reproductivos y desplazando especies acuáticas. La acumulación de sedimentos en el embalse creado por la represa puede provocar cambios en la composición del lecho del río aguas abajo, comprometiendo la biodiversidad y la salud de los hábitats circundantes. La calidad del agua represada se ve afectada por la acumulación de materia orgánica, nutrientes y sedimentos, lo que afecta los ecosistemas acuáticos y las comunidades que dependen de fuentes de agua saludables. La pérdida de zonas de pesca y hábitats ribereños subraya cómo estos proyectos pueden afectar directamente las actividades económicas y la biodiversidad local (Restrepo et

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 68-76  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

al., 2019). Por lo tanto, es crucial implementar medidas de mitigación y prácticas sostenibles en la planificación y gestión de centrales hidroeléctricas para minimizar su impacto ambiental y promover un equilibrio entre la generación de energía y la conservación del medio ambiente.

Los impactos ecológicos de las centrales hidroeléctricas también se ven reflejados en la fragmentación de los ríos, se estima que el 70 % de los ríos del mundo están interrumpidos por presas, y la construcción y el funcionamiento de más de 50 000 grandes presas en todo el mundo han alterado gravemente el flujo global de agua y sedimentos de los continentes a los océanos, lo que impide la migración de peces y la conectividad de ecosistemas acuáticos (Cui et al., 2021). A nivel social, las comunidades locales han sufrido desplazamientos forzados, afectando su modo de vida y actividades productivas. Durante el desarrollo de este ensayo se profundizará en el análisis de los principales impactos ecológicos y sociales derivados por la instalación de hidroeléctricas, y se examinará cómo estos impactos varían de acuerdo al dimensionamiento de la misma. En el contexto actual de la generación de energía hidroeléctrica, es fundamental analizar si es posible desarrollar un modelo que sea ambiental y socialmente sustentable, o si los impactos ecológicos y comunitarios son inevitables.

Las centrales hidroeléctricas suelen operar desviando el curso natural de los ríos, almacenando el agua en grandes embalses antes de liberarla de manera controlada hacia las turbinas generadoras y, finalmente, devolverla al cauce aguas abajo. No obstante, este proceso altera drásticamente los caudales en ciertos periodos y genera volúmenes considerables de agua en otros. Además, perturba el transporte normal de nutrientes y sedimentos, provocando consecuencias ecológicas de gran magnitud. La interrupción de estos procesos esenciales puede afectar negativamente la biodiversidad acuática, la calidad del agua y la salud general de los ecosistemas fluviales. Por consiguiente, la planificación y gestión cuidadosa de las operaciones hidroeléctricas son esenciales para mitigar estos impactos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados.

En este contexto, uno de los impactos significativos de las centrales hidroeléctricas radica en la perturbación del caudal ecológico de los ríos. El término "caudal ecológico" se refiere al flujo mínimo de agua necesario en un río para preservar los procesos ecológicos y la biodiversidad (Aguilera & Pouilly, 2012). Este fenómeno destaca la relevancia del concepto de caudal ambiental, que busca proteger y conservar los valores ambientales de un río al asegurar la presencia de un volumen adecuado de agua en su cauce. Esta noción no solo aborda la dimensión cuantitativa del caudal, sino que también reconoce la importancia de mantener los patrones naturales de este. La regulación del caudal por las hidroeléctricas no solo interrumpe estos patrones naturales, sino que también puede disminuir de manera significativa los caudales, especialmente durante periodos de bajos niveles de agua (Santacruz & Palacios, 2013).

Estas alteraciones afectan la dinámica de los ecosistemas acuáticos y ribereños que dependen de las variaciones estacionales y los pulsos de inundación para funcionar correctamente. Es aquí donde el caudal ambiental cobra relevancia, ya que su alcance va mucho más allá que la cantidad de agua presente en el río. La permanencia y el volumen adecuado de agua en el cauce se convierte en un mecanismo crucial para la conservación del ecosistema. Este equilibrio asegura no solo la supervivencia de diversas especies acuáticas y ribereñas, sino también el transporte apropiado de sedimentos, nutrientes y materia orgánica. Estos procesos son esenciales para mantener la salud y la diversidad biológica de los ecosistemas fluviales, contribuyendo a su sostenibilidad a largo plazo. Es por esto que, la gestión cuidadosa del caudal ambiental se revela como un componente vital para mitigar los impactos adversos de las alteraciones hidroeléctricas en los sistemas acuáticos y ribereños.

En este contexto de interdependencia ecológica, uno de los efectos más destacados de las hidroeléctricas es la eutrofización, un proceso en el cual la disminución del flujo de agua en el embalse conlleva una reducción del oxígeno disuelto y un aumento en la concentración de nutrientes, fomentando el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas. Esta alteración impacta todo el ecosistema y puede

resultar en la muerte masiva de peces y otras especies debido a la falta de oxígeno, causada por el cambio en la presión arterial ocasionada por las burbujas que bloquean los vasos sanguíneos (Li et al., 2010; Tomczyk & Wiatkowski, 2021). Además, la represa bloquea las rutas migratorias de los peces aguas arriba y aguas abajo, impidiendo su encuentro para el desove, lo que afecta significativamente la biodiversidad de los peces en los ecosistemas fluviales. Este impacto en la biodiversidad de los peces ha sido destacado por estudios recientes (Sedighkia & Abdoli, 2023; Wu et al., 2019).

Adicionalmente, el embalse inunda extensas áreas de bosque y vegetación ribereña, ocasionando la destrucción de hábitats y nichos ecológicos. Esto afecta toda la red trófica, desde anfibios, aves e insectos hasta grandes depredadores como jaguares que dependen de la caza de peces migratorios. Para abordar estos desafíos, es esencial emplear sistemas de evaluación que consideren todos los posibles impactos ambientales y sociales. Uno de estos enfoques, propuesto por (Zi,2010), implica establecer clasificaciones que permitan estimar los servicios ecosistémicos hídricos de los ríos. Esta perspectiva ofrece juicios de valor que facilitan la minimización de los impactos generados. Además, la aplicación de tecnologías geoespaciales, como la empleada en Brasil por (Jardini et al.,2013) para la central eléctrica de Lajeado, se presenta como otro método valioso en este contexto.

El uso del método geoespacial implica realizar un análisis riguroso para determinar el comportamiento económico de las zonas y su repercusión que causa en estas desde la creación de la hidroeléctrica, con el objetivo de proporcionar y fomentar actividades económicas como la agricultura, la pesca, el turismo y otras relacionadas. De esta manera, se busca optimizar el uso del suelo del embalse, no limitándolo únicamente al impacto ambiental y social generado. Un ejemplo ilustrativo de este enfoque se encuentra en los proyectos hidroeléctricos en Nigeria, que según (Chioma et al.,2019), estos han “contribuido positivamente al desarrollo económico de Nigeria y ha brindado muchas oportunidades a las comunidades locales con empleo antes y después de la construcción”. Además, los lagos embalses representan elementos activos con potencial para impulsar el turismo. Estos cuerpos de agua no solo sirven como sitios de recreación, sino que también ofrecen oportunidades para diversas actividades acuáticas, como paseos en bote, esquí, pesca y alojamiento. En consecuencia, este enfoque integral no solo busca mitigar los impactos negativos, sino también capitalizar las oportunidades económicas y recreativas asociadas con los embalses (Bobat, 2015).

Este enfoque integral para aprovechar los embalses, no solo busca mitigar los impactos negativos, sino también capitalizar las oportunidades económicas y recreativas asociadas. En el mismo contexto, la construcción de centrales hidroeléctricas se ve influenciada por la zona de intervención y los tipos de estructuras ejecutadas, como represas con embalses, represas con almacenamiento por bombeo y centrales de generación en cascada o de paso. A pesar de que estudios indican que las centrales de generación en cascada tienen menores impactos ecológicos, ya que aprovechan la corriente natural del río sin necesidad de represar grandes volúmenes de agua ni alterar significativamente el ecosistema, aunque presentan desventajas en su capacidad de generación en comparación con las grandes represas (Fu et al., 2008; Naidoo, 2009). Por lo tanto, la selección del tipo de central debe considerar cuidadosamente los beneficios energéticos y los impactos ambientales para cada situación particular.

En el embalse de una hidroeléctrica, se observa un fenómeno preocupante asociado a la generación de una cantidad considerable de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), específicamente de dióxido de carbono (C). Esta abundancia de emisiones plantea interrogantes sobre la magnitud real de la reducción de las emisiones de GEI atribuidas comúnmente a las hidroeléctricas (Jin et al., 2016). Este debate ha generado controversias al cuestionar la posición de un método de generación ampliamente utilizado en todo el mundo y que ha sido considerado renovable (Xiaosan et al., 2021). La magnitud del problema ha llevado a afirmaciones, aunque exageradas, de que las emisiones de GEI por kilovatio hora de los embalses podrían equipararse a las de una central termoeléctrica convencional (Fearnside, 2004; Giles, 2006; Roland et al., 2010a; Rudd et al., 1993). Este dilema ha motivado la realización de diversos estudios en diferentes embalses de hidroeléctricas en el mundo como lo son los realizados en el lago

Soyang de Corea del Sur (Jin et al., 2016), y los embalses brasileños de Luis C. B de Carvalho, Manso, Funil, Furnas, Mascarenhas de Moraes (Roland et al., 2010). Estos estudios han permitido establecer puntos fundamentales con las emisiones y el impacto ecológico generado por hidroeléctricas. La intensidad de estas emisiones se puede presentar con mayor o menor intensidad dependiendo de diferentes factores como el clima, la ubicación geográfica, el tamaño del embalse, la hidrología, la biomasa inundada y el aporte de materia orgánica de la cuenca (Roland et al., 2010).

La contaminación de las hidroeléctricas se atribuye a varios factores, entre ellos, las inundaciones para la creación de los embalses, ya que estas descomponen la vida vegetal, así como el suelo, generando que estos liberen metano y dióxido de carbono. La parte más alta de los embalses funciona como un punto de llegada de materia orgánica, esta se degrada y produce CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, ya sea por procesos de desgasificación o de oxidación (Rahman et al., 2022). A pesar de los impactos ambientales de las grandes centrales hidroeléctricas, que han provocado cambios en el medio ambiente por la cantidad de destrucción de la fauna y flora (Heydari et al., 2013), pero a su vez las mega construcciones pueden ayudar a reducir los niveles de impacto ambiental. (Lee, 2004), señala que el proyecto de las Tres Gargantas en China ha reducido aproximadamente 40 millones de toneladas de carbón asociadas a emisiones de dióxido de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Además (Kusakana et al., 2008), nos enseña que debemos considerar y cómo se puede implementar sistemas híbridos de hidroenergía y diésel que nos pueden ayudar a reducir los niveles contaminantes de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, es fundamental reconocer que no solo las hidroeléctricas a mediana y gran escala pueden generar impactos negativos en el medio ambiente. También existen situaciones donde un diseño deficiente y una implementación inadecuada de estos sistemas de generación puede intensificar su impacto. Por ejemplo, un estudio realizado en el río Jauru evaluó la calidad del agua antes y después de la instalación de seis pequeñas hidroeléctricas en cascada, concluyendo que estas generan un deterioro acumulativo en las características del agua (da Silva et al., 2019). De manera similar, los hallazgos de (Light, 2016) revelaron resultados análogos, evidenciando cambios significativos en la temperatura del agua, el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la conductividad entre los sitios aguas arriba y aguas debajo de la descarga de la central, subrayando la importancia de considerar cuidadosamente incluso las instalaciones hidroeléctricas de menor escala.

Las hidroeléctricas de gran escala se pueden ver en dos localizaciones claves que definen la cantidad de terreno que necesitarán para la creación de su embalse. Aquellas que estén construidas en zonas montañosas requerirán de un área menor, ya que poseerán una mayor profundidad; por el contrario, aquellas que estén en zonas llanas van a requerir de una mayor extensión (Rahman et al., 2022). Esto ocurre en zonas como en las amazonas donde hidroeléctricas brasileñas como Tucuri, Balbina, Samuel HPP, Belo Monte, cada una con 2400 km<sup>2</sup>, 2360 km<sup>2</sup>, 560 km<sup>2</sup>, 516 km<sup>2</sup> (originalmente se había planeado para 860 km<sup>2</sup>), respectivamente (da Silva Junior et al., 2018a). Estas grandes extensiones de terreno hacen que sea necesario un análisis exhaustivo de las tierras aguas arriba de la represa las cuales se verán inundadas, ya que en estas puede haber asentamientos de personas, reservas naturales, zonas arqueológicas, resguardos indígenas, etc (Rahman et al., 2022).

Esta zona de influencia de la hidroeléctrica no se limitará únicamente al lugar en donde se encuentre la represa, sino que también estará en un área mucho más extensa de lo que se podría pensar inicialmente, generando un cambio en toda esta zona y mostrando una apropiación del territorio. Para las hidroeléctricas que se encuentran en las zonas amazónicas mencionadas anteriormente, se logra encontrar que en Tucuri había 1000 km de carreteras para 1974 y para el 2015 este ascendió a 13000 km. Analizando 90000 km<sup>2</sup>, se encuentra un 52 % de deforestación, y de las áreas sumergidas 36 % pertenecían al pueblo indígena Parakan. En Samuel HPP, había 3700 km de carretera y para el 2015 hay aproximadamente 8000 km. Considerando el peor panorama, se podría presenciar la pérdida del 32 % de la cubierta vegetal del área circundante. Aunque en este caso, río arriba no se inundó territorio

indígena, aguas abajo a 160 km, la tribu Uru-Eu-Uau-Uau si notó el cambio en la migración de peces y en el comportamiento del río, que hacía parte vital de su sustento. En Belo Monte ya había un alto porcentaje de deforestación para el 2011 fue de 17198 km<sup>2</sup> y para el 2015 de 19000 km<sup>2</sup> un aumento del 10 % (da Silva Junior et al., 2018a).

Todos estos datos son preocupantes dado el papel fundamental de que tiene los árboles en la eliminación del carbono que es liberado a la atmósfera, se estima que los ecosistemas terrestres ayudan a la eliminación de un 29 % de estas emisiones (Lawrence et al., 2022). La deforestación, aparte de reducir la capacidad natural del planeta para la eliminación de estas, es una actividad que por sí sola ya genera un impacto significativo de emisiones (Lawrence et al., 2022). En las hidroeléctricas ubicadas en la amazonia que se presentaron anteriormente, la madera extraída de las zonas subyacentes a las represas se usó allí mismo debido a los crecimientos poblacionales del lugar, pero también, dadas las grandes cantidades de bosques deforestados, estas comenzaron un proceso de comercialización, de exportación o de consumo interno en los países sudamericanos (da Silva Junior et al., 2018b). El panorama sigue empeorando si se tiene en cuenta que la deforestación ya ha alcanzado casi el 20 % de la superficie forestal original de la Amazonía brasileña (Zemp et al., 2017), por lo que es de necesidad inmediata llevar a cabo políticas en las que se desligue por completo a la creación de hidroeléctricas con este tipo de actividades perjudiciales para el medio ambiente y en especial para una zona tan importante en el panorama global como lo es la selva amazónica (Rödiger et al., 2018; Silva-Olaya et al., 2022).

Teniendo en cuenta las extensiones de terreno que abarcan estos proyectos, es inevitable que, ya sea aguas arriba o aguas abajo, se generen conflictos de interés entre los promotores de los proyectos y las comunidades aledañas. Estos choques pueden llegar a generar un atraso del cronograma, una posible detención de obra, o incluso la no realización de esta (Sperling, 2012). En relación con las comunidades indígenas es necesario llevar a cabo un acompañamiento íntegro que permita el desarrollo de estrategias para la generación de armonía entre ambas partes. Por ejemplo, en la construcción del embalse en el río *Black Volta* en Bui, Ghana, donde hubo una fuerte oposición de la comunidad a la creación de la obra, lo que obligó a las autoridades y promotoras de la obra a llevar a cabo procesos de exhumación y reubicación de restos ancestrales gracias a la evaluación del impacto social y ambiental promovido por la *Bui Power Authority* (BPA) (Apoth & Gavua, 2016a), estos procesos fueron importantes para las comunidades aledañas, donde se tuvo una gran participación de expertos en arqueología, poniendo esta labor como un partícipe relevante en la conservación de los derechos humanos y el patrimonio cultural de las comunidades (Apoth & Gavua, 2016b). Lamentablemente, en algunos casos se podría estar hablando incluso de la inundación de poblados con habitantes, generando desalojos, reubicación y migración forzada de poblados, lo que podría llevar a un resentimiento entre las comunidades trasladadas de sus zonas de origen a lugares desconocidos. Además, las ayudas gubernamentales prometidas no siempre se cumplen, y en caso de cumplirse, no garantizan que la reubicación y las nuevas viviendas mantengan las condiciones de vida previas en las zonas de origen (Lee, 2004; Apoth & Gavua, 2016a).

La generación de energía eléctrica mediante plantas hidroeléctricas ha experimentado una consolidación considerable en los últimos años, destacándose como una forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Su eficacia se refleja en bajas emisiones de gases de efecto invernadero y su capacidad para implementarse en diversas regiones del mundo, lo que ha contribuido significativamente a la matriz energética global. Se anticipa que esta participación seguirá creciendo en los próximos años, impulsada por la creciente necesidad global de transitar hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, alejándose de los combustibles fósiles. No obstante, a pesar de ser parte integral de esta transición hacia opciones más renovables, la energía hidroeléctrica enfrenta desafíos cruciales que requieren atención detallada. Es esencial reconocer que, para considerarla verdaderamente renovable, deben abordarse y mitigarse los problemas asociados con la construcción y operación de estas infraestructuras.



La tala indiscriminada de árboles representa uno de los problemas críticos, ya que puede resultar en la pérdida de hábitats naturales y afectar negativamente la biodiversidad. El desplazamiento forzado de comunidades locales, a menudo necesario para la creación de embalses, plantea cuestionamientos éticos y sociales que deben ser considerados y abordados de manera justa. La violación de los derechos de los pueblos indígenas es otro aspecto delicado que requiere atención, ya que las represas a menudo afectan áreas de importancia cultural y espiritual para estas comunidades. Además, los cambios en la fauna y los impactos en el ecosistema acuático son preocupaciones medioambientales significativas. La construcción de represas puede alterar drásticamente los patrones naturales de los ríos, afectando a especies de peces y otros organismos acuáticos. Asimismo, la contaminación asociada con la construcción y operación de plantas hidroeléctricas, así como la gestión inadecuada de los residuos, pueden generar impactos negativos en los cuerpos de agua y en los ecosistemas circundantes.

Para abordar estos desafíos, es crucial llevar a cabo investigaciones rigurosas desde una perspectiva académica y profesional. Se deben desarrollar herramientas y mecanismos que reduzcan al máximo el impacto ambiental y social de la energía hidroeléctrica. La implementación de prácticas sostenibles, la aplicación de tecnologías más avanzadas y la participación activa de las comunidades afectadas son elementos esenciales para garantizar que la energía hidroeléctrica se posicione como una alternativa renovable con mínimos efectos negativos en las emisiones de gases de efecto invernadero y en el medio ambiente en general.

## Referencias

- Aguilera, G., & Pouilly, ; Marc. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. *Acta zoológica lilloana*, 56(2), 15-30.
- Apoh, W., & Gavua, K. (2016a). “We will not relocate until our ancestors and shrines come with us”: Heritage and conflict management in the bui dam project area, ghana. *Community Archaeology and Heritage in Africa: Decolonizing Practice*, 204-223. <https://doi.org/10.4324/9781315621708-17>
- Apoh, W., & Gavua, K. (2016b). “We will not relocate until our ancestors and shrines come with us”: Heritage and conflict management in the bui dam project area, ghana. *Community Archaeology and Heritage in Africa: Decolonizing Practice*, 204-223. <https://doi.org/10.4324/9781315621708-17>
- Bobat, A. (2015). *Thermal Pollution Caused by Hydropower Plants*. 19-32. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16024-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16024-5_2)
- Chioma, O., Thomas, S., Hussein, S. U., Aboi, G., Oshiga, O., & Ahmed, A. A. (2019). Hydro power generation In nigeria: Impacts and mitigation. *2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation, ICECCO 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICECCO48375.2019.9043184>
- Cui, G., Wang, B., Xiao, J., Qiu, X. L., Liu, C. Q., & Li, X. D. (2021). Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in karst hydroelectric reservoirs. *Journal of Hydrology*, 592. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125607>
- da Silva, A. C. C., Fantin-Cruz, I., de Lima, Z. M., & de Figueiredo, D. M. (2019). Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru River, tributary of the Pantanal floodplain. *RBRH*, 24, e18. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180047>
- da Silva Junior, O. M., dos Santos, M. A., Szlafsztein, C. F., Gomez, J. M. A., & Pereira, J. P. (2018a).

- Protected areas as strategies for preserving vegetation cover in the vicinity of hydroelectric projects in the Brazilian Amazon. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1186/S13705-018-0172-1>
- da Silva Junior, O. M., dos Santos, M. A., Szlafsztein, C. F., Gomez, J. M. A., & Pereira, J. P. (2018b). Protected areas as strategies for preserving vegetation cover in the vicinity of hydroelectric projects in the Brazilian Amazon. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1186/S13705-018-0172-1>
- Energy Agency, I. (s/f). *Hydropower Special Market Report*. Recuperado el 22 de octubre de 2023, de [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- Fearnside, P. M. (2004). Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. An editorial comment. *Climatic Change*, 66(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043174.02841.23/METRICS>
- Fu, Y. Q., Zhang, Q. W., & Cheng, W. (2008). Assessing the sustainability of cascade hydropower development based on complex ecology system. *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2008*, 4282-4285. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2008.570>
- Giles, J. (2006). Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 444(7119).  
<https://doi.org/10.1038/444524A>
- Heydari, M., Othman, F., & Noori, M. (2013). A Review of the Environmental Impact of Large Dams in Iran. *International Journal of Advancements Civil Structural and Environmental Engineering – IJACSE*, 1, 1-4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18263>
- Jardini, M. G. M., Jardini, J. A., Oliveira, E. C. F. G., Quintanilha, J. A., Magrini, L. C., Chen, E. W., Nicoli, S., & Dzedzej, M. (2013). Geotechnology application upon a Brazilian hydroelectric plant to determine ambient impacts and environmental restrictions. *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013*. <https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652084>
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J., & Park, J. H. (2016a). Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124003>
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J., & Park, J. H. (2016b). Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124003>
- Kusakana, K., Munda, J. L., & Jimoh, A. A. (2008). Economic and environmental analysis of micro hydropower system for rural power supply. *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, 441-444. <https://doi.org/10.1109/PECON.2008.4762516>
- Lawrence, D., Coe, M., Walker, W., Verchot, L., & Vandecar, K. (2022). The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2022.756115>
- Lee, W. J. (2004). The environmental impact of large scale hydroelectric development: Lessons from three gorges. *2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2, 1390-1392.  
<https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373090>

- Li, W., Liu, D., Yang, X., & Huang, Y. (2010). The impact of hydroelectric energy development on fish habitat. *Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010*, 2, 696–698. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.367>
- Light, T. (2016). Chemical and Physical Characteristics of Rivers Above and Below Four Hydroelectric Power Facilities in the Chiriquí Viejo and Chico Watersheds of Chiriquí, Panama. *Independent Study Project (ISP) Collection*. [https://digitalcollections.sit.edu/isp\\_collection/2393](https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2393)
- Naidoo, P. (2009). New strategies for harvesting large scale bulk energy from the Congo river without a conventional dam. *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275457>
- Rahman, A., Farrok, O., & 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. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112279>
- Restrepo, M., Francesca, R., & Maetzke, L. (2019). Afectaciones socioambientales en las zonas aguas abajo de grandes represas hidroeléctricas, casos de estudio Hidroituango y La Miel. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15909>
- Rödig, E., Cuntz, M., Rammig, A., Fischer, R., Taubert, F., & Huth, A. (2018). The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest. *Environmental Research Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AABC61>
- Roland, F., Vidal, L. O., Pacheco, F. S., Barros, N. O., Assireu, A., Ometto, J. P. H. B., Cimpleris, A. C. P., & Cole, J. J. (2010a). Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, 72(3), 283–293. <https://doi.org/10.1007/S00027-010-0140-0>
- Roland, F., Vidal, L. O., Pacheco, F. S., Barros, N. O., Assireu, A., Ometto, J. P. H. B., Cimpleris, A. C. P., & Cole, J. J. (2010b). Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, 72(3), 283–293. <https://doi.org/10.1007/S00027-010-0140-0>
- Rudd, J., Harris, R., Kelly, C., & Hecky, R. (1993). Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases? 22, 1–3.
- Santacruz, M., & Palacios, S. (2013). Régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23, 77. <https://doi.org/10.18359/rcin.224>
- Sedighkia, M., & Abdoli, A. (2023). An optimization approach for managing environmental impacts of generating hydropower on fish biodiversity. *Renewable Energy*, 218, 119283. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119283>
- Silva-Olaya, A. M., Ortíz-Morea, F. A., España-Cetina, G. P., Olaya-Montes, A., Grados, D., Gasparatos, A., & Cherubin, M. R. (2022). Composite index for soil-related ecosystem services assessment: Insights from rainforest-pasture transitions in the Colombian Amazon. *Ecosystem Services*, 57. [https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2022.101463/COMPOSITE\\_INDEX\\_FOR\\_SOIL\\_RELATED\\_ECOSYSTEM\\_SERVICES\\_ASSESSMENT\\_INSIGHTS\\_FROM\\_RAINFOREST\\_PASTURE\\_TRANSITIONS\\_IN\\_THE\\_COLOMBIAN\\_AMAZON.PDF](https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2022.101463/COMPOSITE_INDEX_FOR_SOIL_RELATED_ECOSYSTEM_SERVICES_ASSESSMENT_INSIGHTS_FROM_RAINFOREST_PASTURE_TRANSITIONS_IN_THE_COLOMBIAN_AMAZON.PDF)
- Sperling, E. Von. (2012). Hydropower in Brazil: Overview of positive and negative environmental

- aspects. *Energy Procedia*, 18, 110–118.  
[https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.05.023/HYDROPOWER\\_IN\\_BRAZIL\\_OVERVIEW\\_OF\\_POSITIVE\\_AND\\_NEGATIVE\\_ENVIRONMENTAL\\_ASPECTS.PDF](https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.05.023/HYDROPOWER_IN_BRAZIL_OVERVIEW_OF_POSITIVE_AND_NEGATIVE_ENVIRONMENTAL_ASPECTS.PDF)
- Tomczyk, P., & Wiatkowski, M. (2021). The Effects of Hydropower Plants on the Physicochemical Parameters of the Bystrzyca River in Poland. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2075, 14(8), 2075.  
<https://doi.org/10.3390/EN14082075>
- 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. *Journal of Cleaner Production*, 221, 480–489. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.001>
- Xiaosan, Z., Qingquan, J., Iqbal, K. S., Manzoor, A., & Ur, R. Z. (2021). Achieving sustainability and energy efficiency goals: Assessing the impact of hydroelectric and renewable electricity generation on carbon dioxide emission in China. *Energy Policy*, 155, 112332.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112332>
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., & Rammig, A. (2017). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6182–6190.  
<https://doi.org/10.1002/2017GL072955>
- Zi, T. (2010). Assessment on water ecosystem services in the Songhua River basin by AHP method. 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010.  
<https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5514915>

## Para las hidroeléctricas, el agua es solamente su materia prima

Diana Lucía Ramírez García

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Durante las veinticuatro horas del día se consumen cantidades inimaginables de energía eléctrica en todo el planeta, al preparar una taza de café en la mañana el gasto de energía inicia desde el momento de siembra y cosecha, riegos de agua, transporte de fertilizantes, alimentación del campesino, mano de obra que se paga con dinero, dinero que necesita maquinas, papel, algodón y tintas para su elaboración, bolsas para empacar el grano limpio y seco, moliendas, máquinas de expresso o cafeteras convencionales, tuberías transportadoras de agua, ¡Energía Eléctrica!. Todas nuestras acciones conllevan un gasto energético directo e indirecto. Desde el tiempo del *Homo Erectus* cuando se descubrió el fuego gracias al movimiento impuesto en dos pequeñas rocas, se empezaron a generar cambios en el comportamiento humano enfocados a sobrevivir en tiempos de invierno o verano, ataques de animales y para la alimentación; a medida que el hombre evolucionó, se generó la necesidad de usar la naturaleza para crear comodidad; el planeta poseía infinitas posibilidades de materia prima para construir, transportar y disminuir el tiempo de trabajo empleado en tareas diarias; el agua empezó a usarse como fuente de energía para moler cereales por medio de molinos, con el paso de los años se siguen usando recursos naturales para hacer más cómoda la existencia, la diferencia entre el pasado y el presente es el crecimiento poblacional y la disminución casi a cero de muchos de estos recursos.

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 77-84  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

El agua es la sustancia más importante para la permanencia y vitalidad de todos los seres vivos en este planeta, el 70 % de la superficie de la Tierra es agua, y de esa totalidad, sólo el 2.5 % es dulce, el porcentaje de agua dulce se divide entre glaciares, nieve o hielo 70 %, subterráneas 29 % y sólo el 1 % es disponible para consumo humano y ecosistémico (Fundación Aqueae, 2021), una parte de este último porcentaje es direccionado al sector agropecuario, industrial y poblacional; este recurso natural está siendo usado de manera inconsciente, el consumo en industrias, casas, restaurantes y hoteles es sólo una parte del problema, todas las aguas residuales no son tratadas , son liberadas

al ambiente contaminando ríos, mares y océanos, también se deben tener en cuenta algunos patrones climáticos naturales como el fenómeno de El Niño que aumenta la temperatura de las aguas superficiales, especialmente en el océano Pacífico central y oriental provocando sequías e incluso incendios forestales en bosques tropicales húmedos (IDEAM, 2023). En muchos lugares del planeta, el agua es usada para generar electricidad, este proceso no altera el ciclo de vida del recurso natural mencionado ni tampoco lo contamina; el sector industrial y poblacional debe pagar por el servicio de acueducto y electricidad, las plantas hidroeléctricas brindan uno de estos servicios a la población, sin embargo, estas empresas se lucran a partir del uso de un recurso natural indispensable para la vida humana que no representa ningún gasto monetario para ellas.

El consumo de energía eléctrica ha aumentado con el paso del tiempo, los cambios en las construcciones, las adaptaciones tecnológicas, las maquinarias con mejor diseño y material, la disminución del tiempo empleado para obtener un producto, el aumento poblacional y la producción de alimento para suplir las necesidades básicas de la población han generado una disminución de los recursos naturales debido a la destrucción parcial o total de algunos ecosistemas. Con el fin de asegurar una mejor calidad de vida se han implementado otras formas de generación de energía eléctrica diferentes a las térmicas donde se usan recursos naturales renovables como el agua, el sol y el viento. Colombia es un país ubicado en medio de tres cordilleras por lo que cuenta con una geografía montañosa que favorece la producción de agua, permitiendo la formación de fuentes hídricas que proporcionan sustento al ser humano, la fauna y la flora. La demanda de energía eléctrica en este país se suplir en gran medida por hidroeléctricas ubicadas en los departamentos de Boyacá, Antioquia, Huila, Caldas, Cundinamarca, Córdoba y Santander, la construcción de estos embalses genera impactos en el ambiente y en la población, modificando la economía, agricultura, pesca y ganadería del territorio. (Hernández, 2011)

Los conflictos generados en la población a causa de las construcciones de hidroeléctricas son recurrentes y es indispensable poner en equilibrio aspectos políticos, religiosos, económicos, sociales, salubres y de protección ecosistémica para llegar a acuerdos que sean beneficiosos para todos los implicados, una parte de la población es flexible con respecto a los cambios territoriales, la mayoría de las veces se encuentra solución en la venta o permutación de sus predios, desenlace que muchas poblaciones indígenas no aceptan ya que ven el universo compuesto por dos tiempo-espacio coexistentes (lo divino y lo mundano), para ellos es importante conservar y respetar la naturaleza para mantener el equilibrio del cosmos y permanecer de manera armoniosa en este plano terrenal (López, 2012). Es difícil para los inversionistas o responsables del proyecto llegar a un acuerdo con cada una de las partes, porque deben respetar los lineamientos estatales, las leyes ambientales y la conservación del equilibrio ecosistémico, también deben ser capaces de comprender y apaciguar el miedo de la población a los cambios, al conflicto armado, la corrupción y los actos erróneos que se han vivido en las últimas décadas, donde la violencia, el asesinato y el chantaje son una de las maneras para conseguir que un proyecto de este tipo se pueda consolidar.

Algunas de las luchas sociales que se generan cuando se quiere poner en marcha estos proyectos son por la conservación del territorio y los derechos fundamentales de cada persona que habita el presente, sin embargo, esta lucha por el bienestar no se limita sólo al presente puesto que se adquiere un compromiso con las generaciones futuras para asegurar una calidad de vida mejor o igual a la actual en la que puedan contar, por lo menos, con los mismos recursos que se tienen en la actualidad. Las hidroeléctricas encontraron un equilibrio perfecto entre la energía mecánica, potencial y cinética con un fluido que permite generar electricidad, el servicio que brindan a la comunidad no es el problema, de hecho, el producto que ofrecen es indispensable para todas las labores cotidianas en la industria, el comercio y el transporte. Las luchas sociales entorno a este escenario son en su mayoría por la defensa de la materia prima que usan dichas empresas y todos los cambios espaciales que se realizan para llevar a cabo la construcción de la planta. Entonces, surge el siguiente cuestionamiento para crear consciencia sobre la situación que viven ambas partes. Las hidroeléctricas deben suplir la demanda

energética poblacional, pero ¿Cuánta agua y energía eléctrica de la que usamos es indispensable para vivir bien? ¿Cuánta es desperdiciada?

Los recursos naturales aprovechables de Colombia pueden generar mucho dinero a inversionistas, sin embargo, existen aspectos que convierten estos proyectos hidráulicos en una entidad más, llena de poder sobre el territorio y el pueblo pues aprovechan la poca solvencia económica y tecnológica de la población para ser atractivas fuentes de progreso, en ocasiones miembros de dichos proyectos tienen conexión con grupos subversivos de la región que intimidan a la población rural y los obligan a abandonar sus tierras, cuando no cumplen con sus requerimientos recurren al asesinato de personas y líderes sociales que hacen respetar sus derechos fundamentales, es este el punto de inflexión para que la sociedad rechace estos proyectos (Bolaños, 2014). La historia de violencia y miedo de este país, marca el presente y no permite ver con claridad el futuro, el beneficio obtenido de las hidroeléctricas es significativo pero la mayoría de la población sólo tiene presente el caos inicial, la deformación de una estructura social, espacial y económica ya establecida, el abuso de poder político y la violencia. Para disminuir los impactos sociales que desencadenan estos conflictos es necesario contar con espacios adecuados que generen tranquilidad a todas las partes afectadas y beneficiadas, en los que se lleven a cabo reuniones y conciliaciones donde se brinden discursos honestos, se expongan propuestas claras y soluciones viables a posibles problemas, espacios en los que se muestre el verdadero proceso generador de energía eléctrica, el uso del agua y los beneficios que se pueden obtener en cuanto a desarrollo económico. (Morales, 2022)

Hasta este punto, han tenido mayor prevalencia temas ecosistémicos, de afectación poblacional, de infraestructura, costo de materia prima y uso de la energía eléctrica, sin embargo, debe darse importancia a los flujos de inversión extranjera que aportan cerca del 44 % en el sector hidroeléctrico de Colombia, diversificando la economía y beneficiando el Producto Interno Bruto del país, los recursos naturales, la mano de obra barata y la tecnificación se convierten en un atractivo para muchos inversionistas. Hay aspectos positivos y negativos, directos e indirectos respecto a estos proyectos; entre los beneficios que se obtienen está la integración de la economía con multinacionales y empresas nacionales (pequeñas y medianas), se promueve el crecimiento productivo, se aumenta el desarrollo industrial y tecnológico y se aumentan los niveles de empleo (Martínez & Castillo, 2016); los factores negativos se centralizan en el campo ambiental y el uso de dicho recurso natural sin pagar ningún valor monetario, lo que convierte a las hidroeléctricas en la forma de generar energía eléctrica más rentable del mercado pues la inversión mayor se hace al inicio del proyecto, en el momento de la construcción del embalse, el redireccionamiento del río, la compra e instalación de turbinas, generadores, computadoras y demás; a lo largo del tiempo los gastos están delimitados a los mantenimientos, la mano de obra, empleados de diferentes ramas de la ciencia, administrativos y contribuciones en la parte social de la región donde se encuentra ubicada la represa. Entonces, se hace evidente otro cuestionamiento: ¿Es moral y económicamente acertado una ausencia de pago por el uso del agua?

Se ha expuesto la ambivalencia de las hidroeléctricas en cuanto a beneficio y perjuicio, la balanza siempre tiende a ir al lado negativo; escenarios como los mencionados anteriormente son en su mayoría afectaciones sociales y ambientales; sin embargo, cuando se tiene la posibilidad de visitar y recorrer una hidroeléctrica para ver su funcionamiento e infraestructura el panorama cambia drásticamente. El impacto inicial generado por la transformación del paisaje, causa miedo e incertidumbre, pero una vez está todo instaurado se crea un sistema de intercambio entre la región donde se encuentra la planta generadora de energía y la misma planta. Un embalse es un escenario que permite ver la inigualable capacidad de imaginación y creación de los seres humanos, el deseo de inversión, de suplir las necesidades energéticas y de generar dinero hace que la ingeniería encuentre diferentes formas y diseños para conseguir un producto de calidad y con mejor eficiencia, son estos escenarios llamativos los que atraen a turistas y diversifica la economía del sector. Es importante destacar que una hidroeléctrica no es solamente su infraestructura, muchas hectáreas de bosque crean

un anillo alrededor de la planta generadora de energía contribuyendo a la mitigación de la huella de carbono; son terrenos privados a los que la comunidad no tiene acceso, pero que, por medio de entidades y fundaciones de protección animal, ayudan a conservar y reproducir especies de flora y fauna en vía de extinción, un ejemplo es la hidroeléctricas El Quimbo, ubicada en el departamento del Huila cuenta con planes de conservación y restauración de bosques secos tropicales. (Fundación Natura, 2017)

Las hidroeléctricas deben cumplir con normativas sobre concesión de aguas y regirse a las leyes ambientales vigentes propias del país, antes y durante su funcionamiento, si no tienen una licencia ambiental no podrán llevar a cabo el proyecto. Estas condiciones legislativas permiten asegurar que la construcción de la planta no afecte de manera radical el ecosistema, para esto es pertinente realizar estudios hidrológicos, socioeconómicos, cartográficos y topográficos, geológicos, geomórficos y estudios de impacto ambiental, también tienen limitaciones con respecto al uso del cuerpo de agua que actúa como su materia prima; una de las principales condiciones es respetar un nivel mínimo de agua del río y preservar la biota que pertenece al lecho fluvial, cuando devuelven al río la materia prima usada luego de la generación de energía eléctrica deben hacer mediciones de oxígeno y aquietar el agua, con el fin de asegurar que no se afecte la vida acuática aguas abajo. Muchas hidroeléctricas generan empleo a un gran número de personas que se encuentran en la región, para hacer un seguimiento detallado de los peces y confirmar que en el lecho y la ribera del río a lo largo de varios kilómetros no haya muerte ni afectación de vida acuática. (Del Valle, 2017)

A través de los años, el crecimiento poblacional, los avances tecnológicos, la industria, el mercado y la excesiva comodidad, han llevado a la industria generadora de energía eléctrica a mejorar sus procesos y aprovechar al máximo los recursos naturales con el fin de dar abasto a la demanda energética requerida en el planeta. Se han implementado alternativas que sean amables con el ambiente y permitan diversificar la matriz energética mundial. La energía eléctrica en Colombia depende en gran medida de la generación hidráulica con un porcentaje aproximado del 68 % que es un valor alto comparado con otras fuentes energéticas como la térmica 30.3 %, fotovoltaica 0.8 %, eólica 0.1 % y de cogeneración 1.1 %. Aumentar los porcentajes que están por debajo del 1 % contribuiría a la diversificación de la matriz energética sin embargo los altos costos para ensamblar e implementar dichos proyectos resultan poco favorables cuando se analizan y comparan los principales indicadores financieros de viabilidad puesto que la generación hidráulica tiene mejores resultados para los diferentes tamaños de plantas; en el afán de erradicar el uso de hidrocarburos en la mayor parte de procesos industriales debido a los altos niveles de contaminación, el mercado se ha enfocado en generar electricidad a partir del agua, puesto que resulta ser un proceso más limpio que la producción de energía a partir de carbón, Diesel o gas natural. (Ramírez, 2022)

En un país como Colombia, donde la historia social está llena de violencia y miedo, es difícil para la población mostrarse abierta a los cambios que implican dichos proyectos, por lo tanto, se realizan consultas populares con el fin de llegar a acuerdos justos para cada una de las partes, el problema radica en que muchas veces los inversionistas no tienen una comunicación abierta y honesta con la población que generan discusiones y se adoptan contraposiciones que muchas veces son solucionadas con violencia o incluso asesinatos. Una solución a este escenario es mostrar con evidencia científica la realidad de las hidroeléctricas, aceptar que inicialmente, afectan el ecosistema, pero son necesarias para suplir la demanda energética del país. La mayoría de inversionistas en este campo son extranjeros que buscan ganancias económicas a partir de los abundantes recursos naturales del territorio, sin darle un valor más amplio a dicho recurso y enfocando su importancia como materia prima generadora de dinero, sin embargo para evitar un uso inadecuado del agua y prevenir impactos ambientales irreversibles estas empresas deben contar con una licencia ambiental y seguir a término, leyes establecidas que tienen como único fin la preservación de la vida y la protección del territorio. (Muñoz Gaviria, 2018)



Se estima que más de 80 millones de colombianos han sido víctimas de desplazamiento forzado, en ocasiones por medio de violencia policial debido a la construcción de hidroeléctricas, muchas de estas personas no han sido reubicadas ni recompensadas económicamente, cuando resultaba necesario comprar predios para iniciar la construcción de algunas represas muchos campesinos vendieron sus propiedades 40 % menos que el valor comercial lo que provocó pérdidas económicas a la comunidad. Para mostrar otras afectaciones se presenta el caso del proyecto hidroeléctrico El Quimbo donde debido a su construcción se destruyeron por completo 78 áreas de interés arqueológico y se vieron afectadas edificaciones declaradas patrimonio cultural, en el año 2019 en el río Cauca se reportó la muerte de cerca de 12.300 muertes de peces a causa del cierre no previsto de una de las compuertas de Hidroituango (Morales, 2022). Este tipo de situaciones que afectan sectores del país surgen porque los responsables o encargados de estos proyectos desean generar la mayor cantidad de ingresos sin tener en cuenta muchos factores que dependen directamente del embalse y su funcionamiento, es por esta razón que se generan resistencias o contraconductas individuales y colectivas para garantizar derechos fundamentales, procedimientos, contratos y negociaciones. (Muñoz, 2019)

En Colombia los flujos de inversión extranjera abarca un gran porcentaje con respecto a la generación de energía eléctrica, por lo tanto es importante que los entes gubernamentales encargados de dar licencia ambiental y permisos de construcción a dichos proyectos realicen seguimiento periódicos para evitar la extinción de los recursos naturales usados, también es necesario seguir lineamientos socioeconómicos que ayuden a prevenir el abuso y violencia que muchas veces se genera antes y después de poner en funcionamiento las hidroeléctricas, realizar estudios analíticos con respecto a la oferta y demanda energética del país permite cuantificar qué tan viables son los nuevos proyectos de este tipo (Fernández, 2017). Realizar estudios de impacto ambiental, hidrológicos, geomórficos, cartográficos, socioeconómicos y topográficos antes de construir la hidroeléctrica evitará daños irreparables a futuro en cuanto a la población, la economía y el ecosistema. Diversificar la matriz energética en el país usando otros recursos naturales renovables como el viento y el sol contribuirían a la disminución de la huella de carbono y a tener un sistema energético menos propenso en términos de desabastecimiento eléctrico causado por factores climáticos como El Niño y La Niña.

## Referencias

- Andrade, G., Valderrama, E., Vanegas, H.A., Gonzáles, S. (2013). Regeneración del hábitat en áreas con presencia documentada de especies amenazadas. Una contribución a la conservación asociada a la operación del proyecto Central Hidroeléctrica Miel 1, cordillera Central De Colombia, departamento de Caldas. 32 registros. Versión 14.0. [http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=biota\\_v14\\_n2\\_12](http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=biota_v14_n2_12)
- Arango-Aramburo, S., Turner, S. W. D., Daenzer, K., Ríos-Ocampo, J. P., Hejazi, M. I., Kober, T., Álvarez-Espinosa, A. C., Romero-Otalora, G. D., & van der Zwaan, B. (2019). Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways. *Energy Policy*, 128, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.057>
- Arias-Gaviria, J., van der Zwaan, B., Kober, T., & Arango-Aramburo, S. (2017). The prospects for small hydropower in Colombia. *Renewable Energy*, 107, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.054>
- Ariza, J., Vargas-Prieto, A., & García-Estévez, J. (2020). The effects of the mining-energy boom on inclusive development in Colombia. *The Extractive Industries and Society*, 7(4), 1597–1606. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.10.002>
- Arregocés, H. A., Rojano, R., & Restrepo, G. (2021). Impact of lockdown on particulate matter

- concentrations in Colombia during the COVID-19 pandemic. *The Science of the Total Environment*, 764(142874), 142874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142874>
- Bacca-García, J. O., & Toro, J. (2021). Análisis de la vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia. *Gestión Y Ambiente*, 24(Supl2), 27-45. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.92923>
- Bolaños, F.A. (2014). Esquema socio-empresarial para la gestión de la pequeña central hidroeléctrica (PCH) en la comunidad de Camawari, del municipio de Ricaurte. <https://sired.udenar.edu.co/2090/1/90082.pdf>
- Boodoo, K. S., McClain, M. E., Vélez Upegui, J. J., & Ocampo López, O. L. (2014). Impacts of implementation of Colombian environmental flow methodologies on the flow regime and hydropower production of the Chinchiná River, Colombia. *International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(4), 267-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.07.001>
- Bulut, M., & Özcan, E. (2021). A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment. *Reliability Engineering & System Safety*, 205(107238), 107238. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107238>
- Del Valle, E. (2017). Reflexiones prácticas y jurídicas sobre la regulación ambiental aplicable a las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). En *Derecho de Aguas. Tomo VII* (pp. 149-186). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Duarte-Abadía, B., Boelens, R., & Roa-Avenidaño, T. (2015). Hydropower, encroachment and the re patterning of hydrosocial territory: The case of hidrosogamoso in Colombia. *Human organization*, 74(3), 243-254. <https://doi.org/10.17730/0018-7259-74.3.243>
- Duque, E. A., González, J. D., & Restrepo, J. C. (2016). Developing sustainable infrastructure for small hydro power plants through clean development mechanisms in Colombia. *Procedia Engineering*, 145, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.066>
- Espinel, A., Díaz, I., & Vega, A. (2021). Distributed electrical resources with micro hydroelectric power plants in Colombia – Study case. *Energy Reports*, 7, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.059>
- Fernández, S.R., Ochoa, K.A., Martínez, L.A. (2017). Efectos de la llegada de flujo de inversión extranjera en el sector hidroeléctrico colombiano. *Contabilidad y negocios* (12) 24, pp. 19-42 / ISSN 1992-1896 <https://doi.org/10.18800/contabilidad.201702.002>
- Fundación Aequae. (2021). Distribución del agua en la tierra - Fundación Aequae. <https://www.fundacionaqua.org/principales-datos-del-agua-en-el-mundo/>
- García, R. & Zerda, A. (2018) Caracterización de la función de valor empleada en las decisiones ambientales por las grandes organizaciones: estudio de los grandes proyectos hidroeléctricos en Colombia. En: *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*. rev.fac.cienc.econ, XXVI (1), <https://doi.org/10.18359/rfce.1884>
- Hernández Torres, C. A. (2011). Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando metodología multiobjetivo. Tesis de licenciatura en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería. Recuperado el 23 de noviembre de 2023 de, [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/600](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/600)

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2020). Proceso de inducción y entrenamiento en el puesto de trabajo. Recuperado el 22 de noviembre 2023 de, <http://sgi.ideam.gov.co/documents/41590/97150214/Presentaci%C3%B3n%20Inducci%C3%B3n%20y%20EPT%20actualizada%20a%20agosto%20de%202020.pdf/2f6234a0-2dd9-4ebd-899f-c0523ef1cc5c?version=1.0>
- Lemos Cano, S., & Botero, S. (2012). Optimización del portafolio de generación hidro-térmico en el mercado eléctrico colombiano, *dyna*, 79 (175), 62-71. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532012000500007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000500007)
- López Arenas, R (2021). La ejecución del proyecto Hidroituango y sus afectaciones al derecho [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, desde [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/25427/1/L%C3%B3pezRamiro\\_2021\\_HidroituangoAfectacionesTrabajo.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/25427/1/L%C3%B3pezRamiro_2021_HidroituangoAfectacionesTrabajo.pdf)
- López, A. (2012). Cosmovisión y pensamiento indígena. Universidad nacional autónoma de México.
- López-Casas, S., Jiménez-Segura, L. F., & Pérez-Gallego, C. M. (2014). Peces migratorios al interior de una central hidroeléctrica: caso Miel I, cuenca del río Magdalena (Caldas-Antioquia), Colombia. *Biota Colombiana*, 15(2), 26-39, desde <https://www.redalyc.org/pdf/491/49140782003.pdf>
- Martínez, V., & Castillo, O. L. (2016). The political ecology of hydropower: Social justice and conflict in Colombian hydroelectricity development. *Energy research & social science*, 22, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.023>
- Montes, C. (2018). La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165), 392. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.664>
- Montoya Ramírez, R. D., Cuervo, F. I., & Monsalve Rico, C. A. (2016). Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: a case study. *renewable energy*, 99, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.047>
- Morales, H.J. (2022). Análisis del impacto socioambiental de las hidroeléctricas El Quimbo e Hidroituango en Colombia [Trabajo de especialización, Fundación universidad de América]. Repositorio universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8954/1/555465-2022-1-GA.pdf>
- Morales, S. R., Corredor, L. M., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Stages in the development of a small hydropower project: context and implementation Basic criteria. *Dyna-colombia*, 81(184), 178. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.39757>
- Morales, S., Álvarez, C., Acevedo, C., Diaz, C., Rodriguez, M., & Pacheco, L. (2015). An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives. *renewable and sustainable energy reviews*, 50, 1650-1657. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.026>
- Moscoso Marín, L. B., & Montealegre Torres, J. L. (2013). Impactos en la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia. *Producción + Limpia*, 8(2), 85-93. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552013000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000200009)

- Muñoz Gaviria, G. A. (2019). El estudio de impacto ambiental como elemento de construcción de realidad. El caso de la central hidroeléctrica Porce III. *Territorios*, (41), 223-243. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.6535>
- Muñoz Gaviria, G. A. (2018). Formas de resistencia en la construcción de proyectos hidroeléctricos. *Hallazgos*, 14(28). <https://doi.org/10.15332/s1794-3841.2017.0028.02>
- Naranjo-Silva, S., Punina-Guerrero, D., Barros-Enriquez, J., Almeida-Dominguez, J., & Alvarez del Castillo, J. (2023). Hydropower development in three south American countries: Brazil, Colombia, and Ecuador. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 14(2), 102-110. <https://doi.org/10.5829/ijee.2023.14.02.02>
- Oviedo-Ocaña, E. R. (2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. *Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud*, 50(3), 191-192. <https://doi.org/10.18273/revsal.v50n3-2018003>
- Pless, J., & Fell, H. (2017). Bribes, bureaucracies, and blackouts: Towards understanding how corruption at the firm level impacts electricity reliability. *Resource and Energy Economics*, 47, 36-55.
- Pless, J., & Fell, H. (2017). Bribes, bureaucracies, and blackouts: Towards understanding how corruption at the firm level impacts electricity reliability. *Resource and Energy Economics*, 47, 36-55. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2016.11.001>
- Polanco, J.-A. (2018). Exploring governance for sustainability in contexts of violence: the case of the hydropower industry in Colombia. *Energy, sustainability and society*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0181-0>
- Ramírez, J.E. (2022). Comparación de las tecnologías fotovoltaica e hidroeléctrica en Colombia [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Tamayo Rincón, M. A. (2022). Panorama actual de la generación hidráulica en Colombia y Antioquia ante el crecimiento de la demanda de energía [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Temel, P., Kentel, E., & Alp, E. (2023). Development of a site selection methodology for run-of-river hydroelectric power plants within the water-energy-ecosystem nexus. *The Science of the Total Environment*, 856(159152), 159152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159152>
- Villa-Loaiza, C., Taype-Huaman, I., Benavides-Franco, J., Buenaventura-Vera, G., & Carabalí-Mosquera, J. (2023). Does climate impact the relationship between the energy price and the stock market? The Colombian case. *Applied Energy*, 336(120800), 120800. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120800>
- Villamarin, G., & Díaz-Piraquive, F. N. (2017). Methodological proposal for risk management in new small hydroelectric power plants SHPPs in Colombia. *Edu.co*. Recuperado el 24 de octubre de 2023 de, <https://centrodeconocimiento.ccb.org.co/buscador/Record/ir-10336-13812>

# **Planeación de pequeñas hidroeléctricas como eje de energía limpia y generación de crecimiento social y económico con compromiso ambiental**

Juan Esteban Holguin Valencia - Luis David Cárdenas Valbuena  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La inevitabilidad del paso del tiempo junto con el crecimiento vertiginoso de nuevas tecnologías en la actualidad impone un gran reto al sector eléctrico, que debe responder al crecimiento de la demanda energética derivada del de nuevos desarrollos tecnológicos y a los criterios de sustentabilidad que relacionan las dimensiones ambiental, social y económica de la generación de energía eléctrica. Cuando la revolución industrial comenzó la demanda de energía era principalmente calórica, la demanda eléctrica inició con el siglo XIX y las primeras plantas de generación hidroeléctrica estaban en las cataratas del Niágara (Belfield R., 1976). En esa época la población que gozaba del servicio eléctrico no imaginaba la importancia que tendría el recurso hídrico en el desarrollo económico y social en la época contemporánea. En la que el uso de aparatos eléctricos y electrónicos hace parte de la vida cotidiana y los sectores industrial, comercial, entre otros, dependen de su operación para ofrecer bienes servicios. En esa misma época la sustentabilidad de la energía eléctrica y la posterior producción producida no representaba un eje principal en la planeación ni la implementación de estas, puesto que los recursos naturales parecían inagotables y nadie quería ver reducido el factor económico de su trabajo, hasta que se entendió la finitud de los recursos naturales y el impacto que las malas prácticas pueden causar al ambiente. Proyectando la vida a un futuro próximo es notable que la demanda será creciente (Castillo, V. Z., 2022) y surge el reto para los ingenieros electricistas, que tendrán que lidiar con el problema para evitar un desabastecimiento y junto con las otras profesiones brindar nuevas posibilidades para la construcción de un futuro deseado.

GIPeM 11, diciembre (2023)  
pp. 85-92  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Sabiendo ya, cual es la importancia de la energía eléctrica, se discutirá el papel específico de las pequeñas centrales hidroeléctricas en la generación de energía en el futuro, riquezas hídricas como lo es Colombia. Definiendo estas

plantas de generación hidráulicas pequeñas o pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) descritas en el Plan Nacional de Desarrollo contenido en la ley 2294 de 2023 como toda aquella menor a 50MW (Congreso de la república de Colombia, 2023 ley 2294 de 2023, artículo 5 numeral 3.); se demostrará como estos tipos de centrales son la mejor opción para el desarrollo del sector energético en el país. Entonces, primero se hará la explicación del funcionamiento de una central hidroeléctrica, que tipos hay y que impactos ambientales conlleva cada una de ellas. Destacan dos tipos, las centrales de embalse y las centrales de pasada; mientras que en las de embalse se crea una presa para generar un cuerpo de agua de reserva y así controlar el cauce de un río que se vierte según la demanda de energía, aprovechando la energía potencial que guarda el agua debido a la gravedad, las centrales de pasada o filo de agua aprovechan la energía cinética del río mismo para mover una turbina que se conecta a un generador (Tkáč Š., 2018.).

Ahora, mirando ambos tipos de centrales hidroeléctricas, podemos ver que el impacto ambiental es imposible de anular, pero con una correcta planeación si puede ser reducido a su mínima expresión, como se hablará más adelante, y este a su vez es mucho menor que otros tipos de plantas generadoras como las termoeléctricas. Pero incluso la diferencia ambiental entre las plantas de generación hidroeléctrica con represas y las de pasada es muy grande entre sí, no solo porque el tamaño de ambas suele diferir debido a la cantidad de potencia que se requiera generar, sino porque realizar una planta de embalse tiene un impacto grande, no solo la construcción en sí misma, sino también que esta viene acompañada de una posible generación de gases de efecto invernadero por la gran cantidad de materia orgánica en descomposición en la parte que se inunda la presa; otro factor se da en zonas tropicales donde hay proliferación de vectores de enfermedades como los mosquitos con la malaria; el impacto en la conectividad del ecosistema; las nuevas rutas que deben tomarse tanto para las personas como para los animales; y el desplazamiento masivo de personas para su construcción (Von Sperling, E., 2012.).

El impacto de las centrales hidroeléctricas de pasada aunque menor que su contraparte, no es cero, como ya se dijo, y este tiene las siguientes consecuencias: la depleción del agua y alteración de régimen de flujo que ya que se desvía parte del caudal por la tubería, dejando tramos de río con flujo reducido entre la presa y punto de retorno; otra de las consecuencias es la mortalidad de algunas especies de peces debido a la maquinaria de la represa; además de impactos en la calidad del agua y un deterioro geomorfológico provocado por los sedimentos aguas arriba de la planta por retención de parte de la presa, causando aumento de erosión aguas arriba y sedimentación excesiva aguas abajo que afecta invertebrados y freza de peces, asimismo, la descomposición de materia orgánica sumergida puede disminuir oxígeno y liberar metano y CO<sub>2</sub>, contribuyendo al cambio climático (Kuriqi A., 2021); comparando estas consecuencias con las que conlleva la construcción de una hidroeléctrica de represa se concluye que la mayoría de estos no solo son menos dañinos para el medio ambiente, sino que pueden ser evitables en el momento de la planeación, consiguiendo que en la zona indicada y con la implementación correcta de los estudios de viabilidad se pueda lograr una forma de energía con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Almeida R. M., 2019).

Gracias a las nuevas tecnologías, y a la necesidad de ir un paso adelante de las consecuencias de las centrales hidroeléctricas como las mencionadas en el párrafo anterior, con el fin de reducirlas al mínimo, se ha implementado un desarrollo usando análisis computacional, que juega un papel notable en la planeación de estas, puesto que a diferencia de las evaluaciones de estudios anteriores, cuando salían a la luz las limitaciones tecnológicas, estos nuevos análisis permiten cuatro principales mejoras (Almeida R. M., 2022) (Abgottspon H., 2016), estas son: Una amplia gama de métricas, se sabe que una computadora es capaz de almacenar y trabajar con muchos más datos de forma simultánea que un humano por sí solo, manejando grandes conjuntos de información, incluyendo otras variables como la biodiversidad del ecosistema donde se planea la construcción. También incorporando modelos predictivos que mediante operaciones matemáticas pueden prever posibles impactos a largo plazo, evitando desde el inicio las consecuencias que estas generarían. Escalas espaciales ampliadas que permiten hacer análisis a gran escala abarcando cuencas fluviales completas con sus respectivas

regiones, entendiendo todos sus efectos ambientales y económicos, y haciendo un mapeo detallado a estas mismas áreas. Optimización de decisiones en donde mediante simulaciones se pueden probar distintos escenarios escogiendo el que maximice las ventajas y minimice los costos y un estudio de sensibilidad permitiendo dar más de un enfoque al análisis y mirándolo desde un punto multidimensional. Incorporación de la fluctuación del clima usando el análisis computacional que permite incorporar el cambio climático como otra dimensión para ver sus patrones, comportamientos y consecuencias debido a los proyectos de centrales que se tengan.

Después de confirmar que sí es posible prevenir los impactos de las hidroeléctricas a nivel ambiental, se plantea la cuestión de por qué no son seleccionadas las obras que más beneficios generan con la menor cantidad consecuencias negativas, esto puede ser explicado con la suposición de que socialmente se refuerza constantemente el ideal de progreso como la capacidad de construir deslumbrantes obras, lo que conlleva a pensar que los mega proyectos de centrales hidroeléctricas son el futuro de generación en la sociedad, y como se ha visto, estas no son la mejor opción, ya que aunque su costo por MW va a tender a ser más barato en términos económicos (Irena I., 2018.), sus impactos ambientales serán mucho mayores; además algo que no suele tenerse en cuenta es que los proyectos con grandes centrales hidroeléctricas sufren de un sistemático costo de retraso y de sobrecostos, como se muestra en un estudio de Oxford acerca del desarrollo de megaproyectos de centrales hidroeléctricas en tres de cada cuatro grandes presas, los costos reales resultaron en promedio un 96 % más altos que las estimaciones, con una mediana del 27 % y una dispersión considerable, indicando una subestimación sistemática de los costos. Además, al examinar la distribución de sobrecostos, se observa que para el 20 % de las presas, los costos reales duplicaron las estimaciones, mientras que para el 10 %, superaron el triple. También se encontró que las presas grandes tardan en promedio 8.6 años en completarse, y ocho de cada diez presas sufren retrasos en sus cronogramas de construcción, con una duración real que fue en promedio un 44 % más larga que la estimada, lo que representa aproximadamente 2.3 años adicionales. Estos resultados resaltan la tendencia persistente hacia la subestimación y los retrasos significativos en los proyectos de grandes presas (Ansar A., 2014) (Wild T. B., 2019).

Se sabe que una dimensión que no se puede dejar atrás en cualquier tipo de obra civil por más beneficios que le vaya a traer a la sociedad es el impacto social que provocará a la gente de la zona donde será construido, las personas y la forma que se tenga de conciliar con ellas determinará la efectividad del proyecto. Colombia se destaca por la falta de conciliación que tiene cuando busca entablar acuerdos para llevar a cabo un proyecto, puesto que en un lado solo ven los recursos naturales como números que subirán en una cuenta bancaria y los otros ven cualquier tipo de intervención tecnológica como pura perversión del ser humano con la naturaleza. Como consecuencia de lo anterior, los proyectos de generación hidráulica en el mundo suelen tener la constante de violencia hacia los líderes sociales que buscan la protección de las comunidades y su biodiversidad, y aunque muchas veces este miedo viene acompañado de un desconocimiento real de las consecuencias o una completa visión extremista hacia la conservación, no se puede ignorar que estas comunidades son una parte importante en el desarrollo de los proyectos, y el correcto acompañamiento y asesoramiento de estos haría avanzar los procesos de puesta en marcha mucho más rápido, por el contrario, lo que pasa es que la resistencia pacífica de estas comunidades es reprimida violentamente, en donde principalmente inversionistas a través de terceros amenazan y hasta acaban con la vida de estas personas con tal de imponer su visión y el proyecto por delante (Del Bene D., 2018).

A la hora de la construcción se muestra que es mucho más fácil partir de una negociación con las comunidades cuando la obra civil a construir es una central hidroeléctrica de pasada, a diferencia de su contraparte, las centrales de presa, puesto que sus consecuencias tienen afectaciones menos marcadas en la vida de las personas que allí habitan. Para lograr entonces la aprobación en los proyectos se puede evidenciar en diversos estudios como una consulta inicial puede ayudar a disminuir la resistencia inicial de las comunidades y poder dar de primera mano la explicación del funcionamiento y del proceso de construcción antes que se vuelva un tema tabú debido a la desinformación y luego nadie sea capaz de

sacar la idea implantada en la mente de estas personas (Wang, S., 2019), (Mbaka J. G., 2015). Así como las comunidades son una parte fundamental en la planeación y hay que darles voz para expresar sus inquietudes y servir de primera mano como herramienta pedagógica no podemos olvidarnos de los integrantes del ecosistema que no tienen voz para expresar sus inconformidades, como lo es la fauna nativa. De hecho, esta misma fauna es mucho mejor indicativo para detectar impactos de la construcción de la planta río abajo, puesto que las variables fisicoquímicas del agua no tienen una gran variación en las PCH mientras que la abundancia de macroinvertebrados si lo es (Lange K., 2018). Ahora, en el caso de los vertebrados sabemos gracias a un estudio que la construcción de centrales hidroeléctricas, sobre todo las de represa, tienen un gran impacto en la fauna del lugar, puesto que estas aíslan las poblaciones de peces acarreado consigo consecuencias genéticas negativas como la pérdida de genotipos localmente adaptados en las poblaciones de peces, la reducción de la diversidad genética, y el aumento de la consanguinidad, la depresión endogámica y la homocigosidad (Cunha, J., 2014).

Ahora bien, ya se ha hablado de los ejes ambientales y sociales enfocados en las PCH, pero no podemos olvidar que, sin una viabilidad económica para la construcción de estas, ningún inversionista estaría dispuesto en apostar en su desarrollo. Realizando una búsqueda acerca de la viabilidad económica de las PCH en otros países, como se evidencia en un estudio hecho en Portugal se concluye que el proyecto es viable solo si se aplica un esquema de tarifa regulada que respalde los precios del mercado en dicha zona; si se extrapola este modelo a Colombia se puede concluir que la vulnerabilidad en la inversión llega a ser similar, requiriendo también esta tarifa como parte del retorno de la inversión del proyecto, lo que nos lleva a preguntarnos si es rentable para el estado como ente regulador apoyar este tipo de proyectos, y se concluye que sí, puesto que las PCH pueden mejorar la confiabilidad del sistemas eléctrico ya que su funcionamiento no dependería de una presa sino directamente del caudal del río, minimizando el impacto que tiene el fenómeno de El Niño en el país (Borges C. L., 2008).

Ahora, se plantea que el lugar principal en donde estas plantas funcionarían y su rentabilidad tanto económica como ambiental aumentarían sería en las áreas que no están interconectadas en el país, en donde su principal fuente de generación de energía actual son los combustibles fósiles, que dan energía con un costo muy alto, y una transición a PCH sería ideal, aumentando así el porcentaje de energía eléctrica del país que se produce con energías renovables, abaratando costos de producción y disminuyendo la huella de carbono en el país (Liu H., 2013) (Jimenez Toro J. A., 2022). Hoy en día se manejan herramientas para acertar en la toma de decisiones para la construcción de estas plantas que incorpora incertidumbre en variables como hidrología, geología, demanda, precios y analiza riesgos con simulación de escenarios; tomando en cuenta términos como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN), la primera es la tasa de interés o rentabilidad que devuelve la inversión durante su vida útil y la segunda es el valor actual de los flujos de caja futuros que genera un proyecto, descontados a una tasa de interés determinada; para que un proyecto sea rentable el VPN debe ser mayor a 0 y el TIR mayor a la tasa de descuento (Gil Zapata M. M., 2004).

Después de tener la viabilidad económica como uno de los pilares en la planeación de las plantas hidroeléctricas se muestra como nuevas tecnologías entran al desarrollo para que sea más atractivo para los inversionistas y más útil para los clientes, un ejemplo de estas nuevas tecnologías será la electrónica de potencia, que jugará un papel importante en la planeación, implementación y en el desarrollo de estas nuevas generadoras planteadas, debido a que mejora y optimiza diversos aspectos así como controlar la velocidad variable de las turbinas, reemplazando los controles mecánicos por convertidores electrónicos, facilita la integración a la red eléctrica puesto que adaptan los parámetros de la turbina a los requeridos por esta, permiten arranques controlados mejorando los transitorios de las máquinas, reducen armónicos, otorga capacidades avanzadas de control que permiten optimizar la operación y participan en la regulación de frecuencia y voltaje de la red y posibilita el funcionamiento en modo islas de la central en caso de fallo de la red (Singh R. R., 2014). Pero no solo eso, esta misma tecnología podría cambiar el paradigma de la transmisión de la energía eléctrica implementando convertidores de potencia, que se usarían para aprovechar mejor el potencial hídrico de sitios que en el presente no



pueden ser rentables, eso sí, esperando una bajada de precios de estos dispositivos, puesto que en la actualidad no se consigue encajar en los presupuestos o no representan mejoras lo suficientemente grandes como para ser incluidos en la planeación y ejecución de estos proyectos (Hell J., 2017).

Una gran ventaja de no ser los pioneros en implementar ciertos tipos de tecnologías o proyectos como las PCH es que se puede analizar su impacto en otros lugares del mundo y poder comparar los parámetros extranjeros con los locales e intentar extrapolar sus consecuencias. En el caso de India, el gobierno tomó el porcentaje del potencial desarrollados de este tipo de plantas y según eso priorizó su aumento, sabiendo que aún faltaba mucho por explotar; pero no solo eso, en tanto a prevención de desastres naturales se relacionó la construcción de hidroeléctricas con la irrigación o riego, prevención de inundaciones y beneficios para la pesca si en su proyección se incluía un plan para evitar los riesgos mencionados anteriormente. Entre algunos otros beneficios se ve como Colombia a pesar de no ser un país tan similar a India ni en tamaño ni en geografía, puede extrapolar beneficios y aplicarlos en su planeación, para así tener unos referentes de investigación para la construcción de estas plantas e incentivos para el crecimiento del sector energético (Nautiyal H., 2011).

Colombia como un país con proyectos de transición a fuentes de energía renovable se dedicó a crear hace ya un tiempo la Ley 697-2001, en donde entre muchas otras cosas se crea un programa llamado *Proure*, el programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales, cuyo propósito es introducir paulatinamente programas y medidas para que toda la cadena energética, desde la producción hasta el consumo, cumpla de forma continua con niveles mínimos de eficiencia energética (Vargas F. E. S., 2011). Teniendo ya los lineamientos del gobierno para la planeación de los diferentes proyectos energéticos en el futuro, debemos visionar como será este, y si los recursos hídricos seguirán teniendo la importancia que ya tienen hoy en día. Los estudios dicen que para el año 2050 se estima un crecimiento en el sector de la energía hidráulica, en torno a 1500 - 2000 GW adicionales, donde más de 700GW se encuentran en América Central y Sudamérica, generando hasta el 25% de la energía global y reduciendo la emisión de hasta 560 GtCO<sub>2</sub> en el mundo (Wasti A., 2022). Todos estos beneficios para la humanidad, y en este caso específico para el territorio los separa de su realización la oposición pública y el miedo a la desinformación; con un correcto compromiso de difusión, mostrando la viabilidad de los proyectos se tendrá un futuro con energía limpia, recalcando que ningún tipo de sesgos harán que el costo ambiental se elimine, y cada caso debe ser estudiado por separado para llegar a una conclusión que no solo sea acertada bajo el beneficio humano, sino justa con el medio ambiente (Dovì V. G., 2009).

A pesar de todas las alternativas anteriormente planteadas, este tema no es solo de la población, ni siquiera de los expertos en el tema, es más bien una construcción conjunta que requiere de la participación de varios actores, sobre todo de la inversión del capital y un actuar del gobierno que vaya direccionado a lo que los expertos exponen, generando una estrategia conjunta, que permita un mejoramiento en las plantas actuales para obtener una constante en la calidad del servicio de energía eléctrica prestada (Pinilla H. P., 2015), una propuesta real de mercado de energía que permita obtener ganancias de la inversión en energía y si es posible, que se sea competitivo para exportarla (Rico P. F. R., 2020). Mejorar la calidad no solo de la generación de la energía eléctrica que se produce, sino también de la forma en que se le distribuye al usuario final, que la interacción entre las compañías prestadoras del servicio y el cliente de la energía permita el crecimiento y de confianza a ambas partes para seguir construyendo el sector energético en el país en conjunto con el objetivo de su mejoramiento, que lleva al desarrollo en la calidad de vida de todos nosotros (Paime F. L., 2019).

Después de presentar de lo que se considera es una amplia visión de los parámetros a evaluar al planear la construcción de una pequeña central hidroeléctrica y hacer de esta el eje de generación de energía renovable para el futuro de Colombia o de otros países con características geográficas y topológicas parecidas, se puede concluir entonces que a pesar de la llegada de nuevas formas de generar energía que pueden parecer más novedosas y que admitimos serán necesarias por las ventajas que traen a la diversificación de la energía, la generación de energía hidráulica no será reemplazada, puesto que

representa una forma de energía renovable y bajo parámetros establecidos por autoridades ambientales, también limpia. Esta forma de generación representará entonces una parte significativa en el crecimiento de la capacidad de generación de energía del país.

No se puede dejar atrás que es pertinente y estrictamente necesario una correcta planeación en donde se tomen en cuenta parámetros ambientales, que estos puedan ser reducidos a su mínima expresión mediante estrategias en el ámbito biológico de la fauna y flora nativa; y un correcto acompañamiento a las poblaciones aledañas a las construcciones, en donde se explique de primera mano la planeación, el desarrollo y las consecuencias, tanto positivas como negativas del proyecto, y que bajo ninguna circunstancia, como se ha demostrado que pasa en la mayoría de proyectos de generación de energía hidráulica, se vuelva una guerra entre los inversionistas y las poblaciones afectadas, que deja siempre una pérdida de líderes sociales a manos de grupos al margen de la ley representantes de la gente que tendría beneficio económico en el proyecto.

Colombia es un país con mucho margen para su desarrollo a futuro, es notable entonces que en los años venideros habrá un crecimiento en la demanda de energía, para poder responder a esta demanda debe planificar su matriz energética de modo que esta cumpla con la capacidad mínima para proveer energía, es ahí entonces donde debe aprovechar sus riquezas hídricas, construyendo cada vez más centrales hidroeléctricas menores a 50MW, ya que como se demostró en este documento, son una muy buena opción por las características y objetivos del país en temas de energía eléctrica, cuidando de su medio ambiente y su talento humano. Así podrá obtener beneficios para todos y proyectarse para solo depender de energías con combustibles fósiles como respaldo de su matriz energética, en caso de que su fuente principal, la energía hidráulica por fenómenos ajenos al control humano necesite un refuerzo, con el objetivo de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente y aprovechando sus reservas de combustibles fósiles en el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y no en el sector de la generación como tal, pues este sector puede ser alimentado por muchas otras diversas fuentes; así con planeación, trabajo conjunto y una visión del país con un enfoque ambientalmente sustentable construir una matriz energética sostenida por pequeñas plantas hidroeléctricas.

## Referencias

- Belfield, R. (1976). The Niagara system: The evolution of an electric power complex at Niagara falls, 1883-1896. *Proceedings of the IEEE*, 64(9), 1344-1350.
- Castillo, V. Z., De Boer, H. S., Muñoz, R. M., Gernaat, D. E., Benders, R., & van Vuuren, D. (2022). Future global electricity demand load curves. *Energy*, 258, 124741.
- Tkáč, Š. (2018). Hydro power plants, an overview of the current types and technology. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 13(s1), 115-126.
- Von Sperling, E. (2012). Hydropower in Brazil: overview of positive and negative environmental aspects. *Energy Procedia*, 18, 110-118.
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110833.
- Almeida, R. M., Shi, Q., Gomes-Selman, J. M., Wu, X., Xue, Y., Angarita, H., ... & Flecker, A. S. (2019). Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning. *Nature Communications*, 10(1), 4281.

- Almeida, R. M., Schmitt, R. J., Castelletti, A., Flecker, A. S., Harou, J. J., Heilpern, S. A., ... & McIntyre, P. B. (2022). Strategic planning of hydropower development: balancing benefits and socioenvironmental costs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 56, 101175.
- Abgottspon, H., & Andersson, G. (2016). Multi-horizon modeling in hydro power planning. *Energy Procedia*, 87, 2-10.
- Irena, I. (2018). Renewable power generation costs in 2017. Report. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. <https://www.irena.org/publications/2018/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2018>
- Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (2014). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. *Energy policy*, 69, 43-56.
- Wild, T. B., Reed, P. M., Loucks, D. P., Mallen-Cooper, M., & Jensen, E. D. (2019). Balancing hydropower development and ecological impacts in the Mekong: Tradeoffs for Sambor Mega Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(2), 05018019.
- Colombia. Congreso de la República. (2023). Ley 2294 de 2023, 19 de mayo. Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 "Colombia Potencia Mundial de la Vida", Artículo 5, Numeral 10.
- Del Bene, D., Scheidel, A., & Temper, L. (2018). More dams, more violence? A global analysis on resistances and repression around conflictive dams through co-produced knowledge. *Sustainability science*, 13, 617-633.
- Nandalal, H. K. (2007, October). Importance of public participation in project implementation: upper Kotmale hydropower project in Sri Lanka. In *International Conference on Small Hydropower-Hydro Sri Lanka* (Vol. 22, p. 24).
- Wang, S., Shen, W., Tang, W., Wang, Y., Duffield, C. F., & Hui, F. K. P. (2019). Understanding the social network of stakeholders in hydropower project development: An owners' view. *Renewable energy*, 132, 326-334.
- Mbaka, J. G., & Wanjiru Mwaniki, M. (2015). A global review of the downstream effects of small impoundments on stream habitat conditions and macroinvertebrates. *Environmental Reviews*, 23(3), 257-262.
- Lange, K., Meier, P., Trautwein, C., Schmid, M., Robinson, C. T., Weber, C., & Brodersen, J. (2018). Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(7), 397-404.
- Cunha, J., & Ferreira, P. V. (2014). A risk analysis of small-hydro power (SHP) plants investments. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 2, 47-62.
- Borges, C. L., & Pinto, R. J. (2008). Small hydro power plants energy availability modeling for generation reliability evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1125-1135.
- Liu, H., Esser, L., & Masera, D. (2013). World small hydropower development report. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/1120941>
- Jimenez Toro, J. A. (2022). Revisión de pequeñas centrales hidroeléctricas para electrificar zonas no interconectadas de Colombia (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

- Gil Zapata, M. M., Smith Quintero, R. A., & Angel Robledo, W. (2004). Análisis de inversión en pequeñas centrales hidroeléctricas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7931>
- Singh, R. R., Chelliah, T. R., & Agarwal, P. (2014). Power electronics in hydro electric energy systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 944-959.
- Hell, J. (2017). Application of power electronics on hydropower generation. *Journal of Physics: Conference Series*, 813(1), 012003.
- Nautiyal, H., Singal, S. K., & Sharma, A. (2011). Small hydropower for sustainable energy development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2021-2027.
- Vargas, F. E. S., Alarcón, A. F. S., & Fajardo, C. A. G. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico*, 75.
- Wasti, A., Ray, P., Wi, S., Folch, C., Ubierna, M., & Karki, P. (2022). Climate change and the hydropower sector: A global review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(2), e757.
- Dovì, V. G., Friedler, F., Huisingh, D., & Klemeš, J. J. (2009). Cleaner energy for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 889-895.
- Pinilla, H. P. (2015). Posibilidades de innovación en el sector energético en Colombia. *Revista Clepsidra*, 6(11), 21-32.
- Rico, P. F. R. (2020). Análisis al sector energético colombiano, 2010-2019. Una visión para el desarrollo de energías sostenibles. *Documentos De Trabajo ECACEN*, (1).
- Paime, F. L. (2019). Desafíos contemporáneos en el desarrollo del sector eléctrico colombiano. *Revista En-contexto*, 7(11), 87-111.

## Geotermia en Colombia

Julián Andrés Grisales Parra

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La geotermia es el campo de la ciencia dedicado al estudio del calor existente debajo de la superficie de la tierra, puntalmente más conocido como, calor interno de la tierra, como el nombre lo dice, es una cantidad significativa de calor almacenado en el interior de esta, resultado de la formación del planeta y la descomposición de materiales radiactivos en su núcleo, este calor se transfiere gradualmente hacia la superficie terrestre. Este concepto también va acompañado del gradiente Geotérmico, se puede entender que a medida que nos alejamos de la superficie terrestre hacia el interior de la tierra, la temperatura aumenta constantemente, este gradiente geotérmico es fundamental para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Eadic, 2022). La energía geotérmica se fundamenta en la captación del calor almacenado en el interior de la Tierra, proveniente de procesos geológicos naturales. También se conoce con el mismo nombre al proceso por el cual se extrae la energía geotérmica para su posterior uso como energía eléctrica, principalmente (IngeoExpert, 2023). Este recurso, en constante renovación, ofrece la posibilidad de generar electricidad y proveer calefacción de manera continua y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Estos estudios y generación de energía eléctrica a través de la geotermia se vienen aprovechando desde hace más de un siglo, dando inicio en Italia, donde algunos experimentos iniciaron en el año 1904 y 1905. Estos experimentos dieron el paso a la primera planta geotérmica del mundo, que se construyó y se puso en marcha en el año 1913, con una capacidad de apenas 250 kW, pero para el año 1950 se alcanzaron los 300 MW en Italia. De aquí en adelante se empezó a desarrollar la generación de energía en otros países, impulsando a Nueva Zelanda a iniciar su producción de energía geotérmica en el año 1958, luego ya se empezó a desplegar esta tecnología a través del mundo (Instituto Geológico y Minero de España, 2022). En la actualidad la energía geotérmica se genera en más de 20 países, siendo Estados Unidos el mayor productor mundial, seguido por Indonesia y Filipinas (statista,2023)

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 93-99  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Existen diferentes tipos de energía geotérmica dependiendo del tipo de recurso natural del que se extraiga (de agua caliente, pozos secos, géiseres, vapor seco), la profundidad de perforación (superficial, desde algunos metros hasta grandes profundidades por encima de 10 km) o la temperatura del agua (de alta, media, baja y muy baja temperatura), entre otros (Iberdrola, 2023). Conociendo los principios básicos mencionados anteriormente, también tenemos tipos de Energías Geotérmicas, se pueden definir por temperatura, profundidad y/o tipos de recursos naturales de extracción. De acuerdo con lo mencionado anteriormente y puntualizando los conceptos, la energía geotérmica de alta temperatura, va de la mano con la energía geotérmica de grandes profundidades, donde la temperatura es lo suficientemente elevada como para generar vapor y producir electricidad. Estos sistemas son la base de las plantas geotérmicas para la generación de energía eléctrica (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008), Para emplear esta fuente de energía renovable es necesario profundizar en la perforación hasta los 4 o 6 km. Aquí es donde se consiguen las temperaturas más altas que pueden variar entre los 150 °C hasta valores de 400 °C. La energía geotérmica a grandes profundidades permite la producción de electricidad a mayor escala. en este caso la infraestructura de la planta eléctrica es mucho más compleja y se emplean técnicas muy similares a las que podemos ver durante la extracción de petróleo. También debemos mencionar la posibilidad de extracción de energía geotérmica en rocas calientes que pueden encontrarse en yacimientos secos de entre 5 y 8 kilómetros de profundidad hacia el interior de la tierra (Endesa, 2023). Energía geotérmica de temperatura media, va unida a la energía geotérmica de profundidad media, en este caso el nivel de perforación alcanza entre 1 y 4 km de profundidad, en esas profundidades se consiguen temperaturas entre 100 a 150 °C, En este caso ya se puede emplear la energía geotérmica para la producción de electricidad mediante el uso de turbinas de vapor (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008), y cuando se habla de la energía geotérmica de baja y muy baja temperatura, es inevitable no mencionar la energía geotérmica superficial, donde la encontramos a escasos metros de la corteza terrestre, con una perforación de apenas 150 o 200 metros, alcanzando temperaturas menores a los 100 °C, este es el tipo de energía ideal para aplicaciones de calefacción directa, como la climatización de edificios y la agricultura. De acuerdo con los diferentes tipos de energía geotérmica, también existen los tipos de procesos de explotación, los procesos más conocidos son los de extracción de vapor o agua caliente, en los sistemas de alta temperatura, se perforan pozos para extraer vapor o agua caliente desde el subsuelo. El vapor o el agua caliente extraídos son utilizados para hacer girar turbinas que, a su vez, accionan generadores eléctricos, produciendo energía eléctrica limpia y sostenible (Olade, 1980). En este contexto existen muchas formas de aprovechar el calor de la Tierra, pero la gran mayoría de la generación de electricidad con energía geotérmica se obtiene a través del aprovechamiento de sistemas hidrotermales (González, 2023).

Este recurso energético está presente en cualquier geografía, pero solo se puede aprovechar en localizaciones con unas condiciones físicas concretas. En las ubicaciones más favorables se manifiesta de forma natural mediante fuentes termales, géiseres o volcanes (Repsol Global, 2023). En el caso específico de Colombia, un país caracterizado por su riqueza geológica y diversidad climática, la exploración de la energía geotérmica se presenta como una estrategia clave para avanzar hacia un modelo energético más sostenible y resiliente, lo que añadiría una diversidad a la matriz energética del país, disminuyendo su dependencia a la energía hidráulica, pero la más importante, es disminuyendo la utilización de gases fósiles para la producción de energía. Entre las fuentes renovables, además de las de origen hidráulico, la geotérmica es la que con mayor grado de seguridad ha demostrado su factibilidad técnica y económica. Los recursos geotérmicos constituyen la energía derivada del calor que se extrae a través de los fluidos geotérmicos que surgen de procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo (Naciones Unidas, 1998).

Bruni Sandro afirma que “No solo se trata de una tecnología limpia, renovable y de bajo impacto ambiental cuando se habla de Geotermia, sino también de una alternativa viable que favorece la diversificación de la matriz energética con una producción de energía constante e independiente de las fluctuaciones de los costos de los combustibles y de las variaciones meteorológicas (IDB, 2010). Hace tiempo la humanidad está buscando alternativas más sostenibles a las energías fósiles, mediante otras

renovables (Geotérmica, Solar y Eólica) que aprovechen los recursos que nos ofrece la naturaleza, sin perjudicarla en el proceso. Entre ellas, la geotermia destaca por ser de carácter continuo, disponible permanentemente con independencia de las condiciones meteorológicas, lo que junto a sus altas capacidades y sus múltiples localizaciones la convierten en una firme apuesta de futuro (MAPFRE, 2023). La energía geotérmica, al depender de recursos naturalmente renovables y continuos, presenta un carácter inagotable a largo plazo y/o posiblemente es un recurso completamente inagotable. Su implementación no solo contribuye a diversificar la matriz energética, sino que también reduce la dependencia de fuentes no renovables, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentando un desarrollo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente (Unidad de Recursos Naturales & División Medio Ambiente y Desarrollo de la CEPAL, 1995).

Retomando el título de este documento, ya conocemos la energía geotérmica de manera general, destacando su historia, principios básicos, tipos de geotermia y posibles formas de extracción, para así introducirnos en temas más específicos como lo es la geotermia en Colombia. Para introducirnos con claridad en ese tema, se tiene que revisar los informes de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), donde especifican con claridad cuáles son las fuentes de energía de toda la matriz energética Colombiana e informa cuales son las fuentes de energía convencionales y no convencionales, también cuales son energías renovables y cuáles no. Según la UPME, aproximadamente el 70 % de la energía eléctrica en Colombia proviene de centrales hidroeléctricas, el 29 % de combustibles fósiles (carbón, diésel, gasolina y centrales a gas) y el 1 % de otras fuentes (biomasa, eólica y solar) (UPME, 2015); estos datos ilustran la gran dependencia de Colombia de las centrales hidroeléctricas, cuyas condiciones y generación de electricidad están regidas por el clima y cuyos impactos ambientales son ampliamente cuestionados (Moreno Rendon, Lopez Sanchez, & Blessent, 2020). Un alto porcentaje de la energía eléctrica en Colombia sigue siendo generada por combustibles fósiles, y casi ninguna de la energía eléctrica proviene de energías renovables, pero según ACOLGEN, “la matriz de generación eléctrica colombiana es la sexta matriz más limpia del mundo, el 68% de la capacidad instalada es de fuentes renovables de energía eléctrica. Las empresas Asociadas a ACOLGEN, representan el 70% de la capacidad instalada del país, de la cual el 85 % son plantas de fuentes renovables”. Teniendo en cuenta esta discusión y analizando que la matriz energética colombiana es predominantemente hidráulica, lo cual se introduce en fuentes de “Energía Limpia” pero algunos ambientalistas no están de acuerdo con ese concepto por los impactos ambientales y sociales que esta tecnología produce. De acuerdo con la IHA (*International Hydropower Association*) “existen nueve aspectos clave que hay que tener en cuenta para mantener el potencial hidroeléctrico con un desarrollo sostenible en materia medioambiental, calidad del agua, erosión y transporte de sedimentos, hidrología y flujos medioambientales del río, especies endémicas y en peligro de extinción, paso de especies, plagas animales y vegetales en los embalses, aspectos sanitarios, actividades de construcción y sistemas de gestión ambiental”. Estos son los nueve aspectos que cumplir para que la energía hidroeléctrica pueda ser caracterizada completamente como una energía limpia. Mencionando todo lo que debe de cumplir la energía hidroeléctrica, da la gran oportunidad y mucha más fuerza a la geotermia definida por la UPME en la resolución 468 del 2022 como, Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares (UPME, 2022). Sabiendo esto, el protagonismo ha venido creciendo de manera exponencial, por las condiciones geográficas que Colombia les aporta a estas tecnologías (*Universidad Externado de Colombia*, 2023), Resaltando la geotermia ante las otras FNCERs por la capacidad que tiene de producir energía 24 horas al día y 7 días a la semana. Este recurso se genera y se almacena en la Tierra, proviniendo en un 20 % de la formación original del planeta y en un 80 % de la desintegración radiactiva de algunos minerales en su interior (González, 2023).

La actividad volcánica de Colombia se genera por la subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la placa Sudamericana. Este fenómeno genera energía geotérmica, que se manifiesta en la elevada actividad

volcánica e hidrotermal en las cordilleras centrales y occidentales del país. Las regiones geotérmicas más estudiadas en Colombia han sido las áreas geotérmicas de Paipa, el sistema volcánico Chiles-Cerro Negro y el Sistema Volcánico del Nevado del Ruiz (Lund, 2015). Visualizando el panorama colombiano a nivel nacional con respecto al aprovechamiento de las energías de tipo geotérmicas, vemos que no hay ningún tipo de aprovechamiento de esta, sin embargo, no significa que no se hayan realizado estudios científicos y económicos con respecto a esa tecnología de energía renovable (Salazar Blanco, 2016). Las primeras investigaciones se remontan al año de 1968, cuando la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) por medio el Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL) realizó una evaluación para el desarrollo geotérmico en el complejo volcánico del Nevado del Ruiz, tal estudio se realizó en un área de 1500 km<sup>2</sup>, en donde se observaron zonas con potencial geotérmico y se recomendó continuar con la investigación (Bona & Coviello, 2016). El lento crecimiento para el desarrollo de estas tecnologías en el país se debe a diferentes causas las cuales están comprendidas por, el costo de la investigación, exploración in situ y los recursos especializados que se requieren para la implementación de tales tecnologías, la inversión en tal investigación es considerada de alto riesgo, lo cual genera incertidumbre en los posibles desarrolladores de esta tecnología y el mercado como tal. las áreas con potencial geotérmico se encuentran ubicadas en zonas volcánicas, en su mayoría las mismas son parques naturales con protección ambiental en el país, lo cual implica varios desafíos técnicos, ambientales e infraestructurales (Servicio Geológico Colombiano, 2019). la conexión de la generación geotérmica a la red interconectada nacional es compleja debido a la ubicación de las zonas con potencial geotérmico, lo cual puede implicar un uso acotado a las zonas donde se encuentre tal potencial. culturalmente se debe capacitar a la comunidad debido al desconocimiento sobre el uso, ventajas y adversidades de tal tecnología, y, por último, no se ha realizado aprovechamiento de tal recurso en el país lo que implica incertidumbre en los resultados que se puedan obtener, por ende, se requiere un asesoramiento externo; tomando como referencia los resultados obtenidos en otros países (Marzolf, 2013). Conociendo mucho más esta tecnología, los proyectos geotérmicos a gran escala tienen altos niveles de riesgo, principalmente antes de realizar la etapa de perforación exploratoria profunda. Esto se debe a que no se puede garantizar la existencia del recurso hidrotermal hasta que: no se perfora el reservorio, luego se obtenga fluido caliente y finalmente se hagan pruebas para determinar la viabilidad de su uso para generación de electricidad (González, 2023).

Teniendo en cuenta esto, Colombia es un país con un potencial muy elevado para la explotación y aprovechamiento de esta tecnología, por lo tanto, estas son sus zonas con mayor potencial de exploración y explotación de este recurso “inagotable”. Proyecto Binacional Tufiño-Chile-Cerro Negro, Arias y Acevedo (2017) según ellos, Empresas nacionales como ISAGEN y EPM han realizado en el último tiempo grandes esfuerzos que puedan reactivar la exploración de zonas con potencial geotérmico como en la zona del Nevado del Ruiz y el proyecto binacional de Colombia y Ecuador Tufiño Chile-Cerro Negro, la cual fue descubierta por instituto ecuatoriano de electrificación (INECEL) en 1978, durante reconocimientos geotérmico. Por parte del proyecto binacional Tufiño-Chile-Cerro Negro inicia su investigación en el año 2010 con la firma de los Gobiernos de Colombia y Ecuador para la exploración de la zonas fronterizas, tal proyecto se encuentra en una etapa de estudio de pre factibilidad que permita realizar una cuantificación de los recursos existentes en la zona y definir los pozos a explorar, su inversión se presupuesta en 6.860.000 US a cargo de ISAGEN por Colombia y CELEP EP por Ecuador, el cual tiene una oposición social en el territorio Colombiano, generado por la poca divulgación a las comunidades de influencia referente a los beneficios y riesgos del proyecto (Arias Marín & Acevedo Sánchez, 2017). Volcán Azufral, esta área con potencial geotérmico se encuentra ubicada en la cordillera occidental del suroeste de Colombia, en el departamento de Nariño, cuenta en la cercanía de la ladera del volcán con la ciudad de Tuquerres y una carretera la cual hace que el área sea atractiva en términos logísticos y acceso, además se tiene el beneficio de la cercanía de una de las líneas de interconexión eléctrica de Colombia y Ecuador (Servicio Geológico Colombiano, 2022). En 1982 el área se clasificó como una zona de alta prioridad para el reconocimiento de potencial geotérmico; sin embargo, los estudios e investigaciones reales iniciaron a finales de la década del noventa bajo la dirección de INGEOMINAS (Hoy el Servicio Geológico Colombiano) bajo mandato del gobierno nacional de la época.



Luego tal proyecto tuvo el apoyo del BID, con financiamiento del Fondo Fiduciario del Japón, el cual se encargó de realizar un estudio de pre-factibilidad asignando tal estudio en abril del 2001, mediante una licitación internacional, a la firmas consultoras *West Japan Engineering Consultants* y *Geohazards Consultants International*; el cual se canceló sin dar inicio al proceso en el año 2002, debido a problemas de seguridad en la zona y falta de apoyo de autoridades locales, por tanto INGEOMINAS siguió la investigación en el área, completando la cartografía en 2003 y realizando la exploración geotérmica en 2006 (Marzolf, 2013) y (Bona & Coviello, 2016). *Nevado del Ruiz*, tal proyecto se encuentra ubicado en la cordillera occidental de Colombia, en el cual se encuentra además del Nevado del Ruiz, otros centros volcánicos importantes como 20 Cerro Bravo, Santo Domingo, Santa Rosa de Cabal, El bosque, Nevado del Tolima, Cerro Machín el cual componen unas 100 manifestaciones termales, las cuales componen un tercio de toda Colombia. Estas manifestaciones en el Nevado del Ruiz se dividen en tres diferentes grupos denominadas por: Sector Nororiente, Sector Suroccidental y Sector Occidental en donde en esta última se encuentran fuentes termales con aguas cloruradas de alta temperatura (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020).

Según las contribuciones del SGC en la RENAG 2017, los campos de estudio en los que ya se ha trabajado para el Nevado del Ruiz son la geología y la geoquímica del agua. Además, se ha avanzado en gravimetría, magnetometría, modelado magnetotérmico 2D, modelado geotérmico 2D, modelado conceptual y el mapeo del área geotérmica (RENAG, 2017). Por último, el SGC menciona que aún quedan pendientes estudios más específicos relativos a geología estructural, sondeos de temperatura, modelos magnetotérmicos 3D, gases difusos y geoquímica de gases (Radón). La cantidad y diversidad de estudios que se han realizado desde 1968 para estudiar el potencial y aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el Nevado del Ruiz hacen de esta área la zona geotérmica más investigada en Colombia hasta el día de hoy. Uno de los mayores hitos de este proyecto fue la perforación del pozo exploratorio Nereidas 1 en 1997. Este pozo tiene una profundidad vertical de 1363 metros y una temperatura en fondo de 197 °C aproximadamente. Sin embargo, con este pozo no se llegó al reservorio geotérmico, por lo que se encuentra seco y despresurizado (errez, 2021). Los estudios más recientes acerca del potencial geotérmico de la zona fueron realizados en 2016. Los resultados que se destacan de este trabajo son: 5 nuevos blancos para perforación exploratoria profunda, una temperatura estimada de reservorio que oscila entre 240 y 260 °C y un 90% de probabilidad de que el yacimiento pueda alimentar una planta de 65 MW eléctricos, esto a partir de la aplicación del modelo volumétrico islandés (González, 2023). De acuerdo con las características de este proyecto, se propuso dos diferentes ciclos de aprovechamiento de la fuente de energía, el primer ciclo que fue usado en los cálculos es el Flash Simple con turbina de condensación. Este sistema se usa cuando se puede extraer vapor del fluido del pozo a través de un separador, conservando una alta temperatura que permita una expansión considerable en la turbina. El otro ciclo que se seleccionó fue el Binario de alta entalpía. Este ciclo está ganando terreno en la industria siendo relativamente nuevo. Empresas como *Turboden* y *Ormat* lo han venido implementando con éxito, sustituyendo en algunos casos el uso de sistemas Flash Simple, siendo este último el tipo de planta con mayor capacidad instalada a nivel mundial (Cappetti, 2019). Adicional a esto, el fluido de trabajo que se usó fue isopentano. Este entra a la turbina a una presión de 2500 kPa como vapor saturado y sale a una presión de 100 kPa para entrar al condensador. Cabe resaltar que se tuvo especial cuidado con la selección del fluido de trabajo, ya que este afecta directamente la eficiencia del ciclo (González, 2023). Para elegir la mejor opción, se deben tener en cuenta principalmente las condiciones de caudal y temperatura del fluido geotérmico y el tipo de ciclo binario que se quiere aplicar. Otros parámetros que entran en juego son: restricciones operativas o de diseño impuestas en la planta, inflamabilidad del fluido, toxicidad, agresividad química, los peligros potenciales para el medio ambiente y el costo (DiPippo, 2016).

En este proyecto se desarrolló la iniciativa que permitiría generar entre 50 y 100 MW de energía renovable a través del aprovechamiento del potencial geotérmico en el Nevado del Ruiz, donde empresas como lo son, *Ecopetrol S.A.*, *Baker Hughes* y la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), firmaron un memorando de entendimiento para estructurar estudios de factibilidad del proyecto

geotérmico anteriormente mencionado, con su ubicación exacta en el Valle de Nereidas. Dicho acuerdo se llevará a cabo durante 12 meses, tiempo donde se realizarán estudios de todo tipo, para así realizar una propuesta de generación de energía renovable que su plan piloto inicial será en el departamento de Caldas, muy cerca de su capital como lo es Manizales la ciudad de las puertas abiertas. “La geotermia juega un papel elemental para lograr una mezcla de energía sostenible y reducir emisiones. Me complace ser parte de un proyecto geotérmico en una de las cuencas más relevantes de Colombia junto con nuestro socio y cliente Ecopetrol, así como con CHEC. Estamos seguros de que nuestra experiencia y tecnología en geotermia pueden ayudar a Ecopetrol a alcanzar su objetivo de proporcionar 900 MW de energías renovables para 2025”, dijo el presidente y director ejecutivo de Baker Hughes, Lorenzo Simonelli (Ecopetrol, 2023). Sumando al análisis de alianza entre estas tres empresas, podemos concluir que tenemos una alianza en la cual no solo se tratan de inversionistas en temas económicos, empezando con la empresa Ecopetrol, es una empresa experta en perforaciones de todo tipo, temas y experiencia fundamental para llevar a cabo este proyecto; tenemos también a la empresa CHEC con sus años de recorrido en la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, y por ultimo y no menos importante Baker Hughes, empresa enfocada en la tecnología energética, ya sean servicios y equipos petroleros y/o tecnología industrial y energética (Baker Hughes, 2023).

Finalmente, a lo largo de todo este documento se pudo analizar que la generación de energía eléctrica abarca temas de gran importancia, como lo son, las energías renovables y las no renovables, destacando la energía geotérmica en Colombia como una energía renovable, limpia y posiblemente inagotable como lo es la energía geotérmica, la cual no ha sido explotada adecuadamente, también es una energía con muy bajos índices de Gases de Efecto Invernadero, lo cual cada vez más la hace más atractiva. La exploración de la energía geotérmica en Colombia se erige como una estrategia prometedora para impulsar la sostenibilidad y la diversificación de la matriz energética del país. También, se ha examinado en detalle la definición y principios fundamentales de la energía geotérmica, así como su potencial, beneficios y desafíos en el contexto colombiano. Colombia ha demostrado un compromiso activo con el desarrollo de la energía geotérmica, con proyectos piloto, estudios de evaluación a nivel nacional y colaboraciones internacionales. La participación del sector privado y la creación de un marco normativo sólido son pasos cruciales para el éxito a largo plazo de estas iniciativas. Sin olvidar y mirar mas detenidamente la sociedad o acuerdo que se tiene entre Ecopetrol y CHEC, Ecopetrol es una empresa que no puede estar en todos los negocios relacionados con la energía eléctrica, en palabras mas concretas, Ecopetrol no puede estar linealmente en todos los campos de la energía (integración vertical), puntualmente no puede estar en el negocio de la generación de energía, porque ya se encuentra en el negocio de trasmisión, así como lo prohíbe la ley 143 de 1994, en cambio CHEC y todo el grupo EPM son la excepción a dicha ley.

## Referencias

acolgen. (2023). acolgen. Obtenido de <https://acolgen.org.co/>

Arias Marín, G., & Acevedo Sánchez, A. (2017). *Estado Actual de la Produccion de Energía Geotérmica en Colombia*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13221/1087995573.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Baker Hughes. (2023). *Baker Hughes*. Obtenido de <https://www.bakerhughes.com/company/about-us>

Bona, P., & Coviello, M. (2016). *Valoracion y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del sur*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/24c78dcd-fad9-4f29-b628-833ff762c82e/content>

- Cappetti, G. (17 de Julio de 2019). *Cerro Pabellón geothermal plant: a success story*. Obtenido de [newenergyevents.com/geolac/wp-content/uploads/sites/7/2019/07/Guido-Cappetti-Cerro-Pabellon.pdf](https://newenergyevents.com/geolac/wp-content/uploads/sites/7/2019/07/Guido-Cappetti-Cerro-Pabellon.pdf)
- DiPippo, R. (03 de 06 de 2016). *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081003374000012#preview-section-cited-by>
- Eadic. (2022). *Eadic*. Obtenido de <https://eadic.com/blog/entrada/principios-basicos-de-la-energia-geotermica/#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20utiliza%20el%20calor%20de%20la%20tierra%20para,tierra%20aumenta%20con%20la%20profundidad.>
- Ecopetrol. (08 de 03 de 2023). *Ecopetrol*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/alianza-entre-ecopetrol-baker-hughes-y-chec-para-impulsar-la-energia-geotermica-en-colombia>
- Endesa. (2023). *Endesa*. Obtenido de Endesa: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-geotermica>
- errez, J. R.-G. (08 de 06 de 2021). *Approach to the geothermal potential of Colombia*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650521001292>
- González, J. A. (01 de 06 de 2023). *Revista UIS Ingenierías*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/13672/12984>

## **Calibración de piranómetros como base para la complementariedad energética de Colombia**

Sergio Holguín Cardona

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

La medición precisa de la irradiancia solar es esencial en sus diferentes aplicaciones, desde la meteorología y agricultura hasta la generación de energía eléctrica. La irradiancia solar desempeña un papel fundamental en la meteorología, ya que proporciona información básica para determinar la temperatura y clima en una ubicación (Portillo, 2023). Además, esta irradiancia es usada en la agricultura para captar energía, la cual se emplea posteriormente en el proceso de fotosíntesis. A través de este proceso, los cultivos crecen y generan materia vegetal estableciendo así una conexión directa entre la cantidad de radiación solar absorbida por el cultivo y la eventual cosecha a obtener (Hernández, Escobar, & Castilla, 2001). Por otra parte, la irradiancia solar desempeña un papel crucial en la generación de energía eléctrica a través de los sistemas solares fotovoltaicos. En este proceso, los fotones recorren un camino hasta llegar al panel solar, compuesto por celdas solares fabricadas con materiales semiconductores. Cuando estos materiales se excitan por la interacción con los fotones, comienza a fluir una corriente eléctrica (CELSIA, 2018). Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, es necesario conocer el valor real en el lugar y momento específico donde la irradiancia solar incidente va a ser aprovechada para algún de los casos enunciados o para otro diferente. De este modo, la calibración de los elementos radiométricos, como lo son los piranómetros y pirheliómetros, van a ser el punto de partida en la complementariedad energética de Colombia; principalmente cuando la irradiancia solar está siendo considerada como una fuente energética para apoyar y complementar una red eléctrica hídricamente dependiente entre el 70 % y 80 % como lo es el sistema interconectado nacional de Colombia (Colombia Risk Analysis, 2021).

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 100-107  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

El Sistema Interconectado Nacional de Colombia es una infraestructura de redes y dispositivos asociados a la electricidad conectados entre sí formando un sistema de potencia que se extiende alrededor del 48 % del territorio

colombiano (PARDO, 2022), esta red se compone por las plantas generadores de energía eléctrica, las redes de interconexión regionales o interregionales para la transmisión de electricidad y los usuarios conectados al sistema que están representados como cargas eléctricas (Congreso de Colombia, 1994, pág. Artículo 11). Para el año 2022, el Sistema Interconectado Nacional dependía alrededor de un 70 % de las centrales hidroeléctricas para suministrar el fluido eléctrico requerido por las cargas conectadas al sistema (International Hydropower Association, 2022). Gracias a esto la generación de electricidad en Colombia se ve afectada en periodos del año donde los fenómenos climatológicos, como es el fenómeno del Niño, influyen en los niveles de los embalses de dichas centrales. Por este motivo, la complementariedad energética es una forma de solución a la dependencia de las hidroeléctricas, donde agregando distintas formas de generación a la matriz eléctrica la confiabilidad de esta red será mayor. Comprender la disponibilidad, la calidad y las capacidades de los recursos renovables *in-situ* para la generación de electricidad es crucial para desarrollar un catálogo de oportunidades para una nación (Paredes & Ramírez C., 2017). De esta manera, la calibración de los elementos de medida de los recursos renovables, como la irradiancia solar, es el primer paso para la recolección de datos fidedignos para los futuros estudios de investigación que dan paso a la creación de proyectos de generación.

Para conocer el valor de las distintas componentes de irradiancia solar anteriormente mencionados los elementos utilizados para estas medidas son los piranómetros y los pirheliómetros. Estos equipos comúnmente implementan un sensor fotoeléctrico o termoelectrónico, las dos tecnologías proporcionan una salida en  $\mu\text{V}$  que corresponde a un valor de irradiancia solar. El primero está compuesto por una célula de semiconductores, el cual al estar en presencia de fotones se excitan los electrones ubicados en la banda de Valencia del material provocando un salto de los electrones a la banda de conducción, formando los pares electro-huecos (Juntura P. N., 2017). Este tipo de tecnología es de bajo costo a comparación de los sensores termoelectrónicos, pero la precisión de estos es menor, esto se debe a que tiene un espectro visible de longitud de onda entre 400 nm a 1.100 nm. El segundo tipo de transductores utiliza la temperatura en sus mediciones, esta conformado por una termopila de color negro para absorber la radiación solar. La termopila al elevar su temperatura conduce el calor a una resistencia térmica que traducirá la diferencia de temperaturas en una tensión (Benito, 2018). Esta tecnología es de mayor precisión porque abarca todas las longitudes de onda de la radiación solar desde 300 nm a 3.000 nm (Tom Stoffel, 2010).

El dispositivo de medida más utilizado es el piranómetro, esto se debe a la versatilidad en sus medidas, la facilidad en la instalación y la diferencia precios respecto al pirheliómetro. Estos dispositivos son utilizados en la medición de la irradiancia solar global, para esta medición es necesario posicionar el instrumento en una superficie horizontal fija. También, puede ser utilizado para medir la irradiancia solar difusa, en esta medida es necesario instalar el equipo en estructura que bloquee la componente de directa, existen diferentes plataformas, pero los más utilizados son las bandas de sombra y los discos de sombra, estos suelen estar pintados de negro para evitar la reflexión y afectar las medidas por el sensor (Tom Stoffel, 2010) (M.C. Kotti, 2014). Además, este mismo instrumento puede ser usado para medir la irradiancia solar reflejada o de albedo posicionándolo de forma invertida y horizontal, de acuerdo con las recomendaciones por el *World Meteorological Organization* (WMO) este dispositivo debe estar ubicado a una altura entre uno y dos metros del suelo (Kipp&Zonen, 2010). Por otro lado, el pirheliómetro es únicamente usado para determinar la irradiancia solar directa en un punto en específico, este elemento debe estar instalado en un seguidor solar automático, esto es de carácter obligatorio porque el sensor necesita mantener una alineación directa con el sol para iluminar la cavidad de medida del dispositivo desde el amanecer hasta la puesta del sol (Tom Stoffel, 2010). De igual manera, la componente directa de la irradiancia solar puede ser calculada con el resultado de la diferencia entre la irradiancia solar global y la irradiancia solar difusa sobre el seno del ángulo de altura solar, estos valores deben ser tomados en la misma ubicación y al mismo tiempo para disminuir el margen de error (M.C. Kotti, 2014) (P. BAJONS, U. WERNHART and H. ZEILER, 1998).

Esto muestra un panorama donde el piranómetro es el radiómetro más usado gracias a su polivalencia para medir distintos componentes de la irradiancia solar. En el caso de Colombia, para la creación del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia en el año 2.017 se tuvieron en cuenta 96 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) con piranómetros del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 34 piranómetros del Centro de investigación de la caña de azúcar (Cenicaña), 15 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), 10 del El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) y 28 de La Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) (IDEAM, UPME, 2017). Expresando que la calibración de los 183 piranómetros era imperativa antes de la ejecución de este proyecto, ya que los datos recopilados serían fundamentales para la elaboración de un informe que documentaría el comportamiento de la radiación solar en todo el territorio colombiano, dejando ver cuales son los lugares con mayor potencial energético de este recurso y de esta manera el gobierno impulsaría las iniciativas que deseen aprovechar las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en la producción de energía eléctrica, como se establece en la Ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014, art. 5). En el documento se menciona que se realizó una segunda jornada de calibración en agosto del 2013 en la ciudad de Cartagena, donde se calibraron los piranómetros patrones secundarios para posteriormente calibrar los piranómetros de campo. También, se hace referencia que la información utilizada en el estudio fue de años pasados hasta el año de 2016 (IDEAM, UPME, 2017). Se puede interpretar que los equipos radiométricos de este estudio fueron usados por periodos donde la sensibilidad de estos mismos no fue recalculada, como lo recomienda la *International Organization for Standardization* (ISO) que este tipo de equipos radiométricos deben tener una calibración de su sensibilidad cada 2 años, esto es necesario para evitar sesgos en las medidas y proporcionar información precisa con una incertidumbre mínima (International standartd (ISO: 9060), 2023) (International standartd (ISO:9847), 2018). Suponiendo que exista una falta de calibración de los elementos de medida la información proporcionada en el documento, y precisamente en los mapas de irradiancia solar en la superficie nacional y en los análisis del potencial energético puede estar erróneos provocando subestimaciones del recurso o sobrestimaciones. Cuando en una ubicación se lleva a cabo un proyecto de generación a gran escala donde el recurso energético fue subestimado el impacto puede ser beneficioso para la planta porque el sistema de generación podrá generar mayor electricidad de lo planeado. El problema es cuando el recurso es sobrestimado y la planta de generación no alcanza a producir la potencia nominal esperada, comenzando a producir pérdidas económicas para la empresa. Es por este motivo, que la calibración de los elementos de medición puede impedir el peor escenario para un proyecto de esta índole.

La calibración de un piranómetro constituye un proceso fundamental en el cual se determina la sensibilidad, una magnitud que actúa como el factor de conversión. Esta sensibilidad desempeña un papel esencial en la transición de la señal de salida del piranómetro, generalmente expresada en tensiones pequeñas, a la medida precisa de irradiancia solar. El *datalogger* es el componente que recibe la señal de voltaje, la almacena y es el encargado de llevar a cabo esta conversión, asegurando así la fiabilidad de los datos recopilados. En el contexto colombiano, la calibración de piranómetros carece de un formato estandarizado, lo que subraya la importancia de recurrir a normas internacionales reconocidas. Este vacío en la estandarización ha llevado a la adopción de normativas internacionalmente aceptadas, reguladas por organizaciones especializadas, como la *International Organization for Standardization* (ISO). La implementación de estas normas proporciona un marco sólido y confiable para la calibración de piranómetros en Colombia, garantizando la consistencia y precisión de las mediciones realizadas (IDEAM, 2017). Según estos estándares existen diferentes formas de calibración de los elementos radiométricos, como del piranómetro y del pirheliómetro, pero se basan en la comparación de las medidas entre dos equipos radiométricos. Uno de estos es el dispositivo para calibrar y el otro es el equipo de referencia el cual debe tener una calibración no mayor a 2 años, debe ser clasificado como patrón secundario cómo lo especifica la norma ISO 9060 (International standartd

(ISO:9060), 2018) y la sensibilidad debe contar con la trazabilidad de estar calibrado con el *World Radiometric Reference* (WRR). El WRR es un centro de investigación y meteorología ubicado en Davos del país Suiza nombrado por *World Meteorological Organization* (WMO) como referencia mundial de radiométrica en 1979 (C Fröhlich, 1991).

En el proceso de calibración de piranómetros, se pueden emplear dos enfoques distintos. La primera modalidad implica la comparación con otro piranómetro considerado como referencia. Este tipo de calibración se divide en dos métodos: puede llevarse a cabo en un entorno controlado, con condiciones de iluminación y temperatura rigurosamente gestionadas, o al aire libre, donde se replican las mismas condiciones en las que el piranómetro de campo realiza sus mediciones regulares (International standard (ISO:9847), 2023). La segunda metodología para calibrar un piranómetro consiste en compararlo con un pirheliómetro. En este caso, las mediciones se llevan a cabo al aire libre, requiriendo tanto un pirheliómetro como un piranómetro de referencia que mida la irradiancia solar difusa. Para calcular la irradiancia solar global a partir de la irradiancia solar directa y la difusa, se multiplica el valor de la irradiancia solar directa por el seno del ángulo de altura solar, y después sumándole el valor de la irradiancia solar difusa (International standard (ISO:9846), 1993). Es importante destacar que la calibración de un pirheliómetro solo puede realizarse mediante la comparación con otro pirheliómetro. Este enfoque de calibración garantiza mediciones precisas y confiables en situaciones que involucran la irradiancia solar.

Cuando un piranómetro es calibrado correctamente y cuenta con un certificado de calibración con trazabilidad, se documenta la sensibilidad específica calculada durante el proceso de calibración. Además de esto, se debe prestar atención al equipo electrónico encargado de recibir la señal del piranómetro y llevar a cabo la conversión correspondiente. Entre estos dispositivos, los *dataloggers* destacan por su especialización en la recopilación de información sobre diversas variables, tales como las temperaturas de los sistemas fotovoltaicos, la irradiancia solar, las diferencias de potencial y las corrientes eléctricas (M. Fuentes, M. Vivar, J. M. Burgos, J. Aguilera y J. A. Vacas, 2014). Por ende, estos elementos también requieren una calibración en los canales de entrada, donde se reciben las lecturas de los transductores encargados de medir las variables previamente mencionadas (Creus, 2009). En este contexto, el proceso de adecuación de los elementos destinados a proyectos de captura de información de variables se extiende, pero su realización es imperativa. La ausencia de bases sólidas en el desarrollo de estas iniciativas podría acarrear consecuencias inesperadas en el futuro. La meticulosidad en la calibración y preparación de estos elementos es esencial para garantizar mediciones precisas y fidedignas.

En la ejecución del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia en el año 2017, aunque no se dispone de información detallada sobre la meticulosidad con la que se llevó a cabo el proceso de preparación previamente mencionado, el documento puede considerarse como un punto de partida para comprender el comportamiento de la irradiancia solar en el país. No obstante, este Atlas podría ser considerado como un punto de partida para comprender el comportamiento de la irradiancia solar en Colombia. A raíz de esto, las empresas interesadas podrían iniciar el desarrollo de propuestas destinadas a aprovechar este recurso en la generación de electricidad, lo cual se vuelve crucial dada la importancia de diversificar la matriz energética del país. Es importante abordar este tema en el contexto colombiano, ya que la energía eléctrica en el país es vulnerable a las fluctuaciones climáticas, como se mencionó anteriormente. En épocas de escasa lluvia y elevadas temperaturas, los costos de electricidad se incrementan notablemente. Por esta razón, el gobierno, a través de la ley 1715 de 2014, regula la integración de energías renovables no convencionales en el sistema interconectado nacional, reconociendo la necesidad de buscar una diversificación del sistema energético para garantizar una mayor estabilidad y sostenibilidad en el suministro eléctrico del país (Congreso de Colombia, 2014) (Hurtado, 2022).

El gobierno nacional tiene como objetivo, en el mejor escenario, alcanzar una participación de 239 MW de energías renovables no convencionales, específicamente en energía solar, para el año 2028 (UPME, 2015). Para lograr este objetivo, es imperativo aprovechar de manera óptima la irradiancia solar en el territorio colombiano. Las formas predominantes de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía solar incluyen los sistemas de energía solar por concentración y los sistemas fotovoltaicos. Los sistemas de energía solar por concentración se basan en la utilización exclusiva de la irradiancia solar directa. Estos sistemas, que emplean tecnologías como colectores parabólicos o torres centrales, dirigen los rayos solares hacia un punto específico a través de heliostatos. Este enfoque permite calentar un fluido que, de manera directa o indirecta, impulsa una turbina conectada a un generador. Aunque esta modalidad de generación es más costosa en comparación con los sistemas fotovoltaicos, presenta la ventaja de poder utilizar mecanismos de almacenamiento de temperatura, lo que garantiza la producción de energía eléctrica en momentos de ausencia de sol; sin embargo, según los mapas satelitales de irradiancia solar global en Colombia, la irradiancia solar directa es relativamente baja, aproximadamente 1000 kWh/m<sup>2</sup> menos en comparación con otros países de América Latina, como Chile y Bolivia (World Bank Group, ESMAP and Solargis, 2023) (IEA, ISA, 2019). Por esta razón, los proyectos de sistemas por concentración no resultan viables en Colombia. En contraste, los sistemas fotovoltaicos son altamente aplicables en el contexto colombiano, ya que aprovechan tanto la irradiancia solar directa como la irradiancia solar difusa. Por estas razones, todos los generadores de electricidad con energía solar en Colombia emplean esta tecnología.

Los precios de los componentes de los sistemas solares fotovoltaicos han experimentado una reducción significativa en los últimos años, lo que facilita la adquisición de estos equipos. La versatilidad de estos sistemas constituye una ventaja destacada, ya que tienen la capacidad de conectarse a la red eléctrica para inyectar energía o pueden operar de manera independiente, suministrando electricidad a cargas específicas para las cuales fueron diseñados. Adicionalmente, los sistemas fotovoltaicos se adaptan a las necesidades individuales, ya que pueden ser diseñados para generar potencias mínimas, desde 100 vatios, hasta sistemas capaces de generar grandes potencias en Megavatios. La fuente de energía de estos sistemas son los fotones de energía solar, que transportan energía en forma de campo electromagnético. La generación de corriente eléctrica en las celdas solares de los paneles sigue el mismo fenómeno físico que ocurre en los piranómetros con sensores fotoeléctricos mencionados anteriormente, mediante el fenómeno de pares electro-huecos (Juntura P. N., 2017). En el ámbito colombiano, se han establecido regulaciones específicas para respaldar la creación de proyectos de energía basados en fuentes no convencionales (IEA, ISA, 2019) (Congreso de Colombia, 2014).

El gobierno colombiano es el ente encargado de crear las regulaciones que apoyan este tipo de proyectos, estas van a impactar de manera positiva al desarrollo de proyectos vinculados a fuentes no convencionales de energía, generando estímulos que abarcan desde apoyo financiero hasta incentivos fiscales. Dentro de los incentivos fiscales establecidos, destaca la significativa reducción del impuesto de renta, que puede llegar hasta el 50 % de la inversión y aplicarse durante un período de 5 años a partir del inicio de la obra (Congreso de Colombia, 2014). Adicionalmente, se ha establecido la exención del pago de impuestos para los dispositivos y servicios indispensables para la ejecución de la actividad, siempre y cuando estén avalados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Este beneficio busca aliviar la carga tributaria asociada a los elementos necesarios para llevar a cabo proyectos de energía no convencional en el país. Otro incentivo importante dentro de este marco legal determina que los equipos, herramientas, maquinarias e insumos que no sean de producción nacional y resulten esenciales, requiriendo su importación para la ejecución de proyectos con fuentes no convencionales de energía, estarán exentos del pago de aranceles a la entrada del país (UPME, 2015). Esta medida busca promover la adquisición de tecnología y componentes internacionales para fortalecer la capacidad de implementación de proyectos de energías renovables en Colombia.



Según las últimas versiones del plan indicativo de expansión de la generación, se prevé que los sistemas fotovoltaicos realizarán un importante aporte de energía eléctrica al sistema interconectado nacional mediante la instalación de 16 plantas solares. Este aporte se distribuirá entre 13 plantas de generación que entrarán en funcionamiento en 2023 y 3 plantas adicionales programadas para los primeros meses de 2024. Esta iniciativa tiene como resultado una contribución significativa de 1.606 MW de energía eléctrica proveniente de fuentes no convencionales, específicamente del recurso solar (UPME, 2023). En paralelo, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ha consolidado un portafolio de proyectos con aprobación de conexión al sistema en las fases 2 y 3. La cantidad total de energía esperada de este portafolio asciende a 8.267 MW (UPME, 2023). Esta proyección indica que, para el final del primer trimestre de 2024, aproximadamente el 19,42 % de este portafolio estará en funcionamiento, contribuyendo de manera significativa a la diversificación de la matriz eléctrica del país. Este avance hacia la diversificación de fuentes energéticas no solo impulsa la expansión de la capacidad de generación, sino que también fortalece la confiabilidad del sistema eléctrico nacional, por disminuir la dependencia del recurso hídrico, proporcionando una mayor estabilidad y seguridad en el suministro de energía para el crecimiento sostenible del país.

Por todo lo expuesto en este ensayo, la búsqueda de la complementariedad energética en Colombia a través de fuentes no convencionales, como la energía solar, se presenta como un respaldo crucial para la transición energética propuesta por el actual gobierno. En este contexto, los proyectos que se enfocan en aprovechar el recurso solar en Colombia requieren contar con información precisa y segura. Esta necesidad se basa en la importancia de llevar a cabo diseños precisos de los sistemas solares fotovoltaicos. La calibración de los elementos radiométricos, como el piranómetro, antes de la toma de lecturas emerge como un aspecto de vital importancia en este proceso. La adecuada calibración sirve como una salvaguarda contra sesgos en las mediciones, lo que a su vez evita errores en el cálculo del potencial del recurso solar para la producción de energía eléctrica. En el peor de los escenarios, la sobrestimación de este recurso podría desencadenar pérdidas económicas para la empresa generadora de electricidad. Es crucial destacar que la existencia de riesgos de este tipo en la elaboración de propuestas puede llevar a que las empresas se abstengan de participar en subastas de generadores. Esta reticencia podría resultar en una desaceleración, e incluso un retraso, en la implementación de la complementariedad y la transición energéticas del país. Dichos retrasos podrían afectar negativamente los planes establecidos por la Unidad de Planeación Minero Energética, generando un impacto significativo en el cronograma previsto para estas iniciativas.

## Referencias

- Adler F., B. M. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Universidad Nacional de Mar de Plata.
- Benito, J. L. (21 de Marzo de 2018). *Energy News*. Obtenido de Fotovoltaica: <https://www.energynews.es/que-son-y-para-que-sirven-los-piranometros/>
- C Fröhlich. (1991). History of solar radiometry and the world radiometric reference. 28, 111. Obtenido de [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/28/3/001/meta?casa\\_token=2OiqGzeeoWYAAAAA:GJYv3FqHRNKIBHWte9Dc81-IByuO9brle53GbbTQavT2DFzExAltyEXudSAXEIuw47d-5cwKZFQQ55sdu0hLQfQs-sy7](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/28/3/001/meta?casa_token=2OiqGzeeoWYAAAAA:GJYv3FqHRNKIBHWte9Dc81-IByuO9brle53GbbTQavT2DFzExAltyEXudSAXEIuw47d-5cwKZFQQ55sdu0hLQfQs-sy7)
- CELSIA. (05 de 05 de 2018). *CELSIA*. Obtenido de Paneles solares ¿Cómo funcionan y qué son?: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>
- Colombia Risk Analysis. (2021). *Sector risk monthly renewable energy*. ISSUE #012. Colombia Risk Analysis. Obtenido de [https://mcusercontent.com/ec9dfc3030795aea9dd7ee1b6/files/eb39a235-86c5-89fa-1e76-8d5cf508bb64/Renewable\\_Energy\\_012\\_Risk\\_Monthly\\_November\\_2021.pdf](https://mcusercontent.com/ec9dfc3030795aea9dd7ee1b6/files/eb39a235-86c5-89fa-1e76-8d5cf508bb64/Renewable_Energy_012_Risk_Monthly_November_2021.pdf)

- Congreso de Colombia. (1994). *LEY 143 DE 1994*. por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia de energética. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1650315>
- Congreso de Colombia. (2014). *LEY 1715 DE 2014*. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Creus, A. (2009). *Instrumentos industriales, su ajuste y calibracion* (Tercera ed.). Barcelona: Marcombo S.A. Obtenido de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LSiU0piawq0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=calibraci%C3%B3n+de+instrumentos+medici%C3%B3n&ots=i\\_GiKEGnjD&sig=xVLT6dNtp6j64UPSve5DY5Uyfow#v=onepage&q=calibraci%C3%B3n%20de%20instrumentos%20medici%C3%B3n&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LSiU0piawq0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=calibraci%C3%B3n+de+instrumentos+medici%C3%B3n&ots=i_GiKEGnjD&sig=xVLT6dNtp6j64UPSve5DY5Uyfow#v=onepage&q=calibraci%C3%B3n%20de%20instrumentos%20medici%C3%B3n&f=false)
- Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). *La Radiación Solar en Invernaderos Mediterráneos*. España. 18-26 p.: Revista *Horticultura* 157. Obtenido de [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_Hort/Hort\\_2001\\_157\\_18\\_27.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_2001_157_18_27.pdf)
- Hurtado, O. L. (2022). *Energías Renovables Como Estrategia Para La Diversificación De La Matriz Energética De Colombia*. UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA. BARRANCABERMEJA: UNAD. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/344716317.pdf>
- IDEAM. (2017). *NORMALIZACIÓN Y CALIBRACIÓN DE SENSORES DE RADIACIÓN*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/normalizacion-y-calibracion-de-sensores-de-radiacion>
- IDEAM, UPME. (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Bogota: Imprenta nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf>
- IEA, ISA. (2019). *Solar Energy Mapping the road ahead*. IEA. Obtenido de [https://iea.blob.core.windows.net/assets/7de8652c-47b0-474e-8642-cbf20245b1f6/Solar\\_Energy\\_Mapping\\_the\\_road\\_ahead.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7de8652c-47b0-474e-8642-cbf20245b1f6/Solar_Energy_Mapping_the_road_ahead.pdf)
- International Hydropower Association. (2022). *Hydropower Status Report Sector trends and insights*. IHA Central Office. Obtenido de <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>
- International standard (ISO:9060). (2018). *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. ISO: 9060.
- International standard (ISO:9846). (1993). *Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrliometer*. ISO:9846.
- International standard (ISO:9847). (2023). *Solar energy - Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer*. ISO: 9847.
- J.L. Balenzategui(1), J. De Lucas(2), M. Molero(1), J. Cuenca(1), F. Fabero(1), A. González-Leiton(1), J.P. Silva(1), E. Mejuto(1). (2022). *Caracterización de Radiómetros de Cavidad para la Medida de Irradiancia Solar con Trazabilidad al WRR/SI. Ponencia nº S1-2-R12-OP*. Congreso español de meteorología.

- Juntura P. N. (2017). SEMICONDUCTORES:. Escuela de Educación Técnico Profesional N° 460 Guillermo Lehmann.
- Kipp&Zonen. (2010). *Manual de Usuario CMP series*. Delftechpark: Kipp & Zonen B.V.
- M.C. Kotti, A. A. (2014). Estimation of direct normal irradiance from measured global and. *Energy*, 382-392.
- M.Fuentesa, M.Vivar, J.M.Burgos, J.Aguileraa, J.A.Vacase. (2014). Designofanaccurate, low-costautonomousdataloggerforPVsystem monitoringusingArduino™thatcomplieswithIECstandards. *SolarEnergyMaterials&SolarCells*, 529-543.
- Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. (s.f.). LA RADIACIÓN SOLAR. Agencia Estatal de Meteorología. Obtenido de [https://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion\\_Solar.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf)
- P. BAJONS, U. WERNHART and H. ZEILER. (1998). A SENSOR ELEMENT FOR DIRECT RADIATION MEASUREMENT. *Solar Energy*, vol. 63, 125-134.
- PARDO, H. J. (2022). ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DE LAS HIDROELECTRICAS EL QUIMBO E HIDROITUANGO EN COLOMBIA. 24-26. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8954>
- Paredes, J. R., & Ramírez C., J. J. (2017). *Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: Complementariedad en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Energ%C3%ADas-renovables-variables-y-su-contribuci%C3%B3n-a-la-seguridad-energ%C3%A9tica-Complementariedad-en-Colombia.pdf>
- Portillo, G. (2023). *Metereología en Red*. Obtenido de Irradiancia: <https://www.meteorologiaenred.com/irradiancia.html>
- Rodriguez Murcia, H. (2009). *Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf>
- Tom Stoffel, D. R. (2010). *CONCENTRATING SOLAR POWER*. National Renewable Energy Laboratoy. Recuperado el 16 de 11 de 2023
- UPME. (2015). *PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050*. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA , Bogota. Obtenido de [chrome-extension://ehttps://www1.upme.gov.co/Documents/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](chrome-extension://ehttps://www1.upme.gov.co/Documents/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf)
- UPME. (2016). *Informe de gestión UPME 2016*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2023). *Plan Indicativo de Expansión de la Generación 2023-2037*. Bogotá D.C.: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía.
- World Bank Group, ESMAP and Solargis. (2023). *ENERGYDATA:INFO*. Obtenido de Global solar atlas: <http://globalsolaratlas.info>.

## **Tesoros ocultos**

# **Energías renovables provenientes del océano: potencial energético, sostenibilidad, impactos ambientales y aporte a la transición energética**

Liceth Pahola Figueroa Ipial

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

El uso de la energía eléctrica ha sido de gran importancia para el desarrollo de las civilizaciones, causando un impacto positivo en la calidad de vida que tenemos actualmente, aunque la mayoría de energía eléctrica producida a nivel mundial viene de los combustibles fósiles altamente contaminantes, como el carbón, el petróleo y el gas, que contribuyen de manera notable a las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). No obstante, a partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), en París, realizada el 12 de diciembre de 2015, se obtuvo como resultado el histórico Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015), en el cual se buscan alternativas para combatir el cambio climático, un problema que exige soluciones coordinadas en todos los niveles y cooperación internacional, generó interés e importancia en abordar los desafíos ambientales y energéticos que existen actualmente. Una alternativa que ha ido tomando fuerza alrededor del mundo es la diversificación de la matriz energética con el uso de energías limpias para un desarrollo sostenible, que busca satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras, creando complementos y alternativas para enriquecer dicha matriz, ayudando con la mitigación del riesgo ambiental inminente, al disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y tratar de encaminar a la sociedad a un futuro sostenible, previniendo potenciales necesidades de las generaciones venideras.

En este ensayo se aborda la importancia de tener en cuenta las energías renovables, haciendo énfasis en la preocupante situación ambiental, en parte, por el uso de energías convencionales. Principalmente se van a destacar las energías marinas o energías provenientes del océano pertenecientes al grupo de energías renovables no convencionales.

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 108-116  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de  
Colombia

Adicionalmente, se explicarán los tipos de energías marinas existentes, sus tecnologías en desarrollo, su potencial energético, sostenibilidad y especialmente sus impactos ambientales, se cuestiona que tan limpias pueden ser las energías renovables como esta y qué dificultades hay en su regulación (Posadillo, s.f.). De igual manera, comprender en qué estado se encuentra Colombia y otros países frente a esta implementación de energías renovables, paso fundamental para una transición energética exitosa, con el gran objetivo de tener alternativas energéticas complementarias y ayudar en la disminución de la huella de carbono, por ende, aportar en la des carbonización gradual y consciente.

En un mundo en constante transformación, la búsqueda de soluciones sostenibles para las necesidades energéticas se ha vuelto una prioridad que no da espera y evidencia que la energía es el corazón del desarrollo de los países, pero no todo es bueno, ya que, según el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) «El sector energía es el que contribuye en mayor medida a la emisión de GEI, siendo el responsable de aproximadamente el 35 % del total de emisiones indirectas de CO<sub>2</sub>» (IPCC, 2014, pág. 48). En este contexto de la crisis climática y necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las energías renovables son una opción que aportaría positivamente para dar solución a dicha necesidad. Si bien existen varios tipos de energías renovables el ensayo se va a centrar en las energías renovables provenientes del océano, con el objetivo de dar visibilidad al potencial que estas tienen y lograr su futura implementación en países suramericanos que tienen acceso a las dos costas, ya que, aún no existe el suficiente apoyo e interés en hacer de estas grandes masas de agua una oportunidad para avanzar, innovar y fomentar un cambio positivo.

Generalmente no se integran consideraciones ambientales para prevenir o mitigar impactos negativos del uso de ciertas formas de energía; para nadie es un secreto que los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas, hacen parte de las energías no renovables, uno de sus mayores defectos es el tiempo que tardan en volver a formarse, y su funcionamiento (los combustibles fósiles producen la energía al quemarse) que genera consecuencias al convertirse en energía, como las emisiones de carbono, significativamente negativas para el medio ambiente (Rodas Monsalve Julio César, 2019). Por el contrario, las energías renovables son un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a restaurarse más rápido de lo que pueden consumirse, por ejemplo, la luz solar, debido a que estas fuentes se renuevan continuamente. Al mismo tiempo, la generación con energías renovables produce menos emisiones que la quema de combustibles fósiles, una razón de peso para implementarlas. Existen también energías renovables no convencionales como la biomasa, la eólica, la geotérmica, entre otras, en esta ocasión se destacan las energías renovables no convencionales provenientes del océano, o energías marinas. Se inicia reconociendo que los mares y océanos son los pulmones del planeta, ya que, absorben gran parte del CO<sub>2</sub> producido, son esenciales para la vida en el planeta tierra, aunque, gran parte de lo que hay en él sigue siendo un misterio, pues el hombre solo ha explorado una pequeña parte de la totalidad de la superficie marina (M Castelos, 2013). Lo que abre una ventana a un gran potencial energético, con posibilidades de ser convertido en electricidad, a su vez, existen varias alternativas y tecnologías para el aprovechamiento de dicho potencial energético, las cuales se dan por las mareas, corrientes marinas, gradiente térmico, gradiente salino y oleaje como veremos a continuación: *mareas*, corresponde a la energía mareomotriz, que aprovecha el ascenso y descenso en el nivel del mar, que se presenta por el efecto que tienen la gravedad del sol y la de la luna en la tierra, básicamente la gravedad es aprovechada para generar electricidad. Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales, como el costo económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso, hacen disminuir el avance de energías provenientes de las mareas (Villate, 2010, págs. 5-6); *corrientes marinas*, se hace uso de la energía cinética que poseen las corrientes marinas mediante la instalación submarina. También se deben tener en cuenta factores como conexión entre mares u océanos, salinidad, entre otros. Aun así, las ubicaciones en las que este tipo de aprovechamiento es rentable son muy escasas, ya que deben enlazar una velocidad de la corriente importante con una buena accesibilidad (Villate, 2010, págs. 7-8); *gradiente térmico*, la energía mareo-térmica, que emplea la variación entre la temperatura de la superficie y la temperatura de aguas profundas, requiriéndose un gradiente

térmico de al menos 20 °C, para este caso se hace un aprovechamiento tecnológico de la industria petrolífera, por la misma razón tiene un costo de producción de energía eléctrica, se necesitan grandes profundidades, con diferencias de temperatura de 20 °C como mínimo, que solo se dan en zonas tropicales, la distancia a la costa puede ser demasiado grande, lo que hace que la generación sea más compleja y costosa (Villate, 2010, págs. 9-10); *gradiente salino*, Se usa la diferencia en la salinidad entre el agua de los océanos y el agua de los ríos. Colocando una membrana semipermeable en la desembocadura de un río, así puede obtenerse energía gracias a las diferencias de presión osmótica. Algo para resaltar es que es continua, (no cíclica) en comparación con otras fuentes de energía del mar, lo que nos brinda una mejor predicción. En cuanto a los inconvenientes, el tipo de tecnología es muy poco desarrollada, lo que nos predice un alto costo, y el impacto medioambiental que va a generar debido a que estas membranas se ubicarían en las desembocaduras de los ríos (Villate, 2010, págs. 11-12); *oleaje*, la energía undimotriz o energía a partir del movimiento de las olas, que utiliza la fuerza con la que se desplaza determinada masa de agua a causa del rozamiento con las corrientes de aire, es decir, las olas son producidas por la acción del viento sobre la superficie del mar y posteriormente se trasladan recorriendo muchos kilómetros ( Kafil, 2018). Los métodos para transformar la energía mecánica de los movimientos de las partículas de agua en energía eléctrica, necesitan de una tecnología que aún está en fase de desarrollo, y se debe hacer énfasis en los detalles de la zona debido a la complejidad de la energía empleada (irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas), una de las grandes ventajas es el poco impacto medioambiental, pero el coste de la instalación y de mantenimiento es alto y requiere de un mayor desarrollo tecnológico. Otras fuentes renovables en el medio marino son: Geotérmica submarina, Biomasa Marina, Eólica marina (Villate, 2010, págs. 13-14).

Si se analiza cada tipo de energía marina y tecnología, en medio de las ventajas e inconvenientes, resalta que indiscutiblemente las energías marinas muestran un potencial muy alto existente en todo el mundo. Los proyectos relacionados a las corrientes de la marea y el oleaje que se están desarrollando actualmente, si se llegaran a materializar, se afirma que podrían aportar casi 3 GW de capacidad adicional en todo el mundo. La mayor parte de esta capacidad se encuentra en Europa (55 %), seguido de Asia y el Pacífico (28 %) y Oriente Medio y África (13 %) la parte restante se distribuye entre América del Norte (2 %) y América Central y del Sur (2 %) (IRENA B. d., 2020). Por consiguiente, se reafirma que las energías renovables han surgido como una opción vital para abordar la crisis energética y los desafíos medioambientales. No obstante, un enfoque sostenible requiere políticas, por lo tanto el mundo actual enfrenta un doble desafío, satisfacer la creciente demanda energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética. Las energías renovables, a su vez, son una forma eficaz de afrontar este dilema, utilizando la energía de la manera más eficiente posible y así reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, también desempeña un papel importante a la hora de garantizar la seguridad energética, mejorar la protección del medio ambiente y aumentar el empleo en varios países (Lin Lin et al. 2022). Así mismo, muchos países consideran las energías renovables como el punto estratégico de una nueva generación de tecnología energética fijando objetivos para hacer de la energía renovable parte de sus políticas, ya que, con el desarrollo de políticas nacionales y tecnologías para generación con energías renovables no convencionales se abren muchas plazas para el progreso de un país y diversidad en sus fuentes y medios de generación.

Ahora, si se traslada la idea de energías renovables provenientes del océano a Colombia, es inevitable no pensar en el Pacífico colombiano y la energía mareomotriz, se tiene la opción de generadores de corriente de marea que están teniendo gran relevancia en Europa, en contraste, siguen existiendo problemas por su ubicación lejana a la costa, es decir están muy alejados de las ciudades para interconectarlos al sistema eléctrico (Moreno García, 2016). Por ende ahí surge el reto de estudiar si estas tecnologías se pueden instalar en la costa Pacífica Colombiana, ya que se tienen las condiciones óptimas para su funcionamiento, pero lamentablemente son tecnologías que están en desarrollo y por ende presentan altos costos que hacen que un proyecto de este tipo en Colombia se vea bastante lejano, otra opción son las presas de marea, pero estas no son amigables para la zona Pacífica del país, porque tienen un impacto ambiental negativo debido a que su construcción causa desplazamiento de la fauna

marina y contaminación de las aguas, también tendrían problemas en su funcionamiento, debido a las desembocaduras de algunos ríos los cuales traen sedimento, algo sumamente dañino para las turbinas que causaría problemas en su funcionamiento (Tambutti et al. 2022).

Se menciona que las energías renovables son “energías limpias”, afirmación que no es verídica o totalmente real; en el anterior párrafo se menciona el impacto ambiental que puede existir al implementar ese tipo de energía en la costa Pacífica colombiana, lo que da paso a tratar el tema de impactos ambientales de las energías marinas, por ejemplo, la energía mareomotriz es apreciada por su aporte a la disminución de la huella ecológica, sin embargo, hay varios aspectos que se han estudiado para comprender el impacto en el ambiente que pueden generar, cabe resaltar la necesidad de analizar los inconvenientes ambientales en particular, porque la determinación de los efectos negativos se ve empeorada por el hecho de que cada una de las tecnologías empleadas para aprovechar la energía renovable marina puede tener efectos perjudiciales específicos que exigen una valoración individualizada, de hecho, aún se desconoce si dichas consecuencias son simplemente proporcionales al número de dispositivos que se utilizan o si intervienen otros factores que suman complejidad a tener en cuenta en la evaluación de los posibles impactos ambientales. (Cortés et al. 2017)

Estudios realizados evidencian daños ambientales como la reducción del área intermareal, degradación de la calidad del agua del mar y destrucción de la vida marina consecuencia de la construcción de una planta de energía mareomotriz, por tanto, debe tomarse en consideración no solo los efectos que puedan causar la presencia física de estructuras a corto, medio y largo plazo, sino las actividades y las consecuencias relacionadas con la construcción, los dispositivos e instalaciones para el aprovechamiento de las fuentes de energía (Bald et al. 2013). Por otra parte, los efectos ambientales más conocidos respecto a las tecnologías de las energías renovables no convencionales marinas, se destacan la alteración de los hábitats marinos y el transporte de sedimentos generados por la construcción y presencia de los dispositivos y estructuras; lamentablemente genera la muerte de peces y mamíferos, e incomodidad por la contaminación auditiva; la dificultad en el desplazamiento, rutas migratorias de peces y alimentación; puede existir también la liberación de productos químicos tóxicos y fugas accidentales, durante la construcción, y después por las condiciones de su funcionamiento y los materiales de construcción de las mismas. Es de interés general prestar atención a las medidas para prevenir dichos problemas, comenzando por medidas de planificación del espacio marino, con el objetivo de cuidar las zonas protegidas, los hábitats vulnerables, las rutas migratorias, desove, sus crías, etc., finalmente se reitera el énfasis en la necesidad de estudiar qué tipo de medidas específicas se deben realizar, dependiendo siempre de la clase de dispositivos seleccionados, estructuras o emplazamientos a instalar (Castelos, 2013).

Cuando se habla de impactos ambientales generados por los medios de generación de energías provenientes del océano, se debe reconocer que actualmente no existen suficientes estudios que indiquen cuáles son los verdaderos potenciales energéticos que se puede aprovechar en el mar y cómo mitigar sus impactos ambientales (López Amable et al. 2014). Adicionalmente, si se traslada este tema a un país como Ecuador se tiene que aún no se ha aplicado a gran escala la generación de electricidad a través de este tipo de energía, debido a la falta de interés de las entidades públicas, ya que, para poder generar energía eléctrica a través del movimiento de las olas, se deben realizar estudios sobre los oleajes en las costas ecuatorianas, algo que requiere de presupuesto tiempo e interés. Con respecto a los estudios realizados, se conoce que el oleaje que arriba a las costas del Ecuador tiene un promedio de olas de 2 m, en profundidades de hasta 20 m y de 2,5 m en profundidades superiores, sin embargo, estos valores son solo referenciales, pueden existir cambios de acuerdo con los fenómenos climáticos existentes en el país (Rodríguez Santos et al. 2017). Asimismo, las olas en los mares y océanos están vinculadas a la energía solar debido a que la radiación solar incide en la superficie terrestre, generando un calentamiento desigual que crea zonas de diferente presión en la atmósfera. Este fenómeno provoca el desplazamiento de aire de una región a otra, dando origen a los vientos que al desplazarse sobre la superficie del mar provocan el roce de las moléculas de aire con el agua, transfiriendo parte de su energía

a esta última y generando así las olas que actúan como almacenadoras y transportadoras de energía, con mínimas pérdidas en el trayecto, lo que conduce a que la energía de las olas, generada en cualquier punto del océano alcance las costas, por ende, aproximadamente el 0,3 % de la energía solar que llega a la superficie terrestre se convierte en energía undimotriz (Rodríguez Santos et al. 2017).

Por otro lado, si llevamos el mismo caso a Venezuela debido a sus características costeras, las energías alternativas con potencial de desarrollo son principalmente la proveniente del oleaje, y las que son producto del gradiente térmico, debido a diferencias de temperaturas de las masas oceánicas a profundidades mayores a los 1000 m (Tambutti & Gómez, 2022). Se reconoce que al igual que en otros países es necesario realizar estudios y mediciones detalladas de los procesos litorales y oceánicos a lo largo de la costa, y que las tecnologías a aplicar deben estar diseñadas según estos procesos litorales y oceánicos, para una mayor eficiencia y beneficio ambiental. Es de resaltar que, en el mar Caribe, Venezuela ejerce soberanía en aproximadamente 500.000 km<sup>2</sup> de aguas marinas y submarinas, la costa venezolana sobre el océano Atlántico, desde Punta La Peña hasta Punta Playa, tiene una extensión de 1008 km. Esta gran extensión de zona marítima da derecho al aprovechamiento de recursos naturales, tanto pesqueros como, paisajísticos, minerales y energéticos (Herrera et al. 2017).

En Venezuela fue presentada una iniciativa de aprovechamiento de la energía del oleaje por parte de la empresa *Nova Oceanic Energy Systems*, la cual desarrolló un prototipo de convertidor de olas con una capacidad instalada de 10 kW en el año 2009 se realizaron pruebas en playa La Punta, El Playón, Ocumare de la Costa, sobre un área marina de 225 m<sup>2</sup>. Este dispositivo presenta la ventaja de que al liberar la ola parte de su energía en el dispositivo, disminuye los procesos erosivos sobre el litoral, cumpliendo una función de rompeolas (NOVA, 2009). Sin embargo, para la utilización de fuentes energéticas alternativas en Venezuela, es necesario realizar un análisis comparativo del potencial energético alternativo en cuanto a la tecnología existente para su aprovechamiento, las distintas fuentes de energía marina disponibles, y los estudios y mediciones de los procesos litorales y oceánicos a lo largo de la costa. Por ello, existe el propósito de analizar los tipos de energías de origen marino que puedan ser empleadas en Venezuela.

Ahora bien, teniendo en cuenta los casos mencionados anteriormente en países de Suramérica, antes de adentrar en el tema del aporte que se le puede brindar a la transición energética y que tan sostenible llega a ser la generación de energía eléctrica por medio de estas energías provenientes del océano, se entiende que la matriz energética hace referencia a la composición de fuentes de energía primaria y secundaria utilizadas para generar electricidad en un espacio geográfico determinado, es decir, que expresa de forma cualitativa (tipo de generación eléctrica) y cuantitativa (en qué cantidad y proporción) el conjunto de recursos naturales y modificados afectados de forma directa en la obtención de la energía eléctrica, independientemente del origen (nacional o importado) de esos bienes y del destino del uso y consumo de la electricidad generada. La definición de la matriz energética está atravesada por la relación entre el uso real y el uso potencial de las fuentes de energía. Ello la convierte en una plataforma informativa y eficaz de valoración de las acciones y resultados del manejo integral de la energía, dado que permite identificar e inferir mediante el contraste entre lo existente y lo utilizado (y sus modos diferenciales de aprovechamiento) diversas situaciones de desarrollo, dependencia o autonomía, atraso o avance tecnológico, entre otras formas de polarización ( Furlán, 2017). Desde su nacimiento en la década de 1880 y conforme crecen las grandes redes de transmisión y distribución de la energía para masificar la cobertura de un servicio de alta calidad y abastecer las demandas expansivas que el avance de la vida moderna impulsa desde la primera mitad del siglo XX, las matrices se han ido cambiando, debido a que constituye un factor indispensable para el funcionamiento de la totalidad del sistema técnico, los cambios son efectuados en relación con el régimen energético de la época que se esté manejando en cada país.



En cuanto a la transición energética mundial en el Diálogo de Berlín sobre la Transición Energética a principios de este año, se aclara que es necesario reducir para 2030 el 45 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 2010, lamentablemente las tendencias recientes muestran que la brecha entre donde estamos y donde deberíamos estar es cada vez mayor. «Estamos en el camino equivocado y tenemos que cambiar el rumbo ahora. Las decisiones que tomemos en los próximos años tendrán un impacto de gran alcance» (IRENA, 2021, pág. 4). Se podría encaminar hacia los objetivos propuestos en 2015 cuando se adoptó los acuerdos internacionales de gran trascendencia sobre el desarrollo sostenible y el cambio climático, por ende si se toma la dirección contraria, a un mayor calentamiento, conllevará consecuencias económicas y humanitarias profundas e irreversibles (IRENA, 2021). Por su parte, un ejemplo de ello en América del Sur fueron los impactos de la crisis económica desde 2014, con la reversión del súper-ciclo de “*commodities*” que impulsó la expansión económica de la primera década del siglo XXI, tuvieron un efecto desigual en América del Sur. El sector minero-agrario-exportador mantuvo la primacía en la base económica de las naciones sudamericanas, que en algunos casos sufrieron un revés en su estructura industrial. Las consecuencias de este proceso están también presentes en la forma y la velocidad de la transición energética en el continente sudamericano, donde se presentan diferentes opciones con respecto a la sustitución de derivados del petróleo por fuentes alternativas de energías limpias, especialmente biocombustibles, energía eólica y solar (Egler, 2020).

Una transición energética puede definirse como un cambio significativo en el sistema energético de un determinado país, de una región, o incluso, a nivel global. En contraste, este cambio puede estar ligado a la estructura del sistema, es decir, un suministro centralizado o descentralizado, a las fuentes de energía que lo alimentan, a sus costes, tanto económicos como de otro tipo, o incluso al régimen político-económico en el que tiene lugar el suministro y consumo de energía (Linares, 2018). Es indiscutible que la transición energética es el puente hacia un futuro sostenible, el agotamiento de los recursos fósiles y el crecimiento acelerado de la demanda energética trae consigo un desafío: la transición hacia fuentes de energía renovable. Las respuestas de los gobiernos frente a la problemática señalada se orientan a promover una transición energética orientada en dos frentes: usar menos energía, e incrementar el uso de energías no fósiles. Las acciones para la reducción en el uso de energía se pueden agrupar en dos categorías: Conservación de la energía: para reducir el uso innecesario de esta, promoviendo cambios de comportamiento en los usuarios mediante sensibilización, educación e instrumentos económicos y eficiencia energética: implica hacer más con menos energía, orientada a soluciones tecnológicas, que si se recuerda aún están en investigación y desarrollo (Bermejo, 2021). Uno de los principales retos que enfrenta el proceso de transición energética es lograr diversificar la matriz energética, y al mismo tiempo garantizar la confiabilidad y el abastecimiento de los servicios públicos de electricidad y gas natural. En Colombia, la matriz energética se compone en un 67 % por fuentes hidráulicas, produciendo una dependencia hídrica. Esta situación, en un contexto como el fenómeno de El Niño, que cada vez deja sentir más su fuerza y capacidad de cambios en el clima (Bald et al. 2013), causa preocupación porque el sistema eléctrico se muestra vulnerable, a esto se le suma que actualmente hay escasez de gas, dejando así una sensación de intranquilidad, y un dilema presente en las decisiones que se deben tomar para mitigar este riesgo latente

Con el fin de disminuir la vulnerabilidad, es necesario diversificar la matriz energética, así se reduciría la dependencia del sistema eléctrico nacional a los cambios climáticos, ayudando en la descarbonización, es relevante que esta descarbonización sea consiente, no se puede lograr un 100 % de energías renovables, si bien estas no se agotan, son impredecibles. No está en juego la seguridad energética, se debe actuar garantizando que la demanda este regida por parámetros como la sostenibilidad, confiabilidad y adecuadas condiciones de seguridad, para ello existe una implicación, mantener vigentes y operando a las energías no renovables, esto se refiere a contar con el respaldo de la “generación controlable” (generación con fuentes no renovables), ya que, la diversificación energética como respuesta a la descarbonización, no necesariamente indica que toda la generación sea a partir de energías limpias, esto es claramente muy complejo de lograr por efectos adversos que no se pueden controlar, se

refiere más específicamente a ser un complemento, ampliar, enriquecer, alternar, etc. Las fuentes de energía limpia para la generación de electricidad dan lugar a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, la disminución de la huella de carbono y como se planteaba en un inicio, reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico.

En conclusión, de todo lo expuesto se puede deducir que cada vez es más necesaria la implementación de las energías renovables no convencionales, por sus innegables ventajas ambientales, siendo una de ellas contribuir significativamente al cumplimiento de los diferentes compromisos internacionales, como los referentes al cambio climático como el marco del Acuerdo de París, además una política en energías alternativas se convierte en una necesidad inminente, ya que la explotación energética de los recursos no renovables llegará a su fin en algún momento, siendo más que urgente y razonable preparar una respuesta para estos escenarios. Finalizando, hay que tener en cuenta que implementar y adoptar las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), requiere de una regulación legal, realizada por personas conocedoras del tema, difundir de manera pedagógica en qué consisten dichas energías, cuáles son, cómo funcionan, etc. La finalidad de esto es crear una nueva consciencia en la sociedad, de un uso racional de la energía, como también que las fuentes alternativas no son tecnologías desconocidas, por ejemplo, la energía oceánica o energía marina se obtiene a partir del movimiento y las características naturales del océano, entre ellas tenemos el oleaje (energía undimotriz), las mareas (energía mareomotriz) entre otras, dichas energías son las más destacadas en la generación de energía eléctrica por fuentes de energía provenientes del océano (Quintero et al. 2016). En resumen, el objetivo central es entender que se le debe brindar mayor visibilidad a la generación por medio de energías provenientes del océano, como otras energías renovables no convencionales, solo basta con fijarse en el océano, tiene una extensión enorme, de ahí que, su potencial energético es invaluable, sin embargo, para su desarrollo se requiere de grandes inversiones en tecnología e investigación (Alsina et al. 2011). Pese a esto, su aprovechamiento se está considerando en la mayoría de países con potencial en energías provenientes del océano, cabe aclarar que para llegar a conocer el potencial de cada zona hay que realizar estudios investigativos, lo que apunta a una mayor inversión en esta área, porque a futuro esto será el seguro de vida en una posible crisis energética.

## Referencias

- Alsina, S., & Castells, X. (2011). *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*. Diaz de Santos.
- Bald, J., Fontán, A., Franco, J., Garmendia, J. M., & González, m. (2013). *ITSASNET*. (C.-O. LÍDER, Ed.) Obtenido de GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS DE ENERGÍAS RENOVABLES MARINAS: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001747.pdf>
- Bermejo, R. (2021). Ciudades postcarbono y transición energética. *Revista De Economía Crítica*, 2(16), 215-243.
- Castelos, M. A. (2013). Capítulo III Los beneficios y los inconvenientes derivados del recurso a las energías renovables marinas. En M. A. Castelos, *Las energías renovables marinas y la riqueza potencial de los océanos : ¿un mar de dudas o un mar de oportunidades?* (pág. 28). Barcelona: BOSCH EDITOR.
- Cortés, S., Londoño, A., & Adriana. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38), 375-390. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=151354939007>
- Egler, C. (2020). *HAL Open Scienc*e. Obtenido de Crisis y transición energética en América del Sur: <https://hal.science/hal-03114080/>

- Furlán, A. (Junio de 2017). Scielo. Obtenido de La transición energética en la matriz eléctrica argentina (1950-2014). Cambio técnico y configuración espacial: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-42652017000100006&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-42652017000100006&script=sci_arttext&tlng=en)
- Güiza-Suárez, L., Rodas Monsalve, J., Cifuentes-Guerrero, J., & González, J. (2019). En *Energías renovables no convencionales y cambio climático: un análisis para Colombia* (págs. 63-86).
- Herrera, A. (2012). Universidad Marítima Del Caribe. Obtenido de UTLIZACIÓN DE LAS ENERGÍAS ALTERNATIVAS DE ORIGEN MARINO: BENEFICIOS HACIA EL AMBIENTE: [https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Herrera-Nicolas/publication/299606174\\_Utilizacion\\_de\\_las\\_Energia\\_Alternativas\\_de\\_Origen\\_Marino\\_Beneficios\\_hacia\\_el\\_Ambiente/links/5702b90608ae646a9da878e0/Utilizacion-de-las-Energia-Alternativas-de-Origen-Marin](https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Herrera-Nicolas/publication/299606174_Utilizacion_de_las_Energia_Alternativas_de_Origen_Marino_Beneficios_hacia_el_Ambiente/links/5702b90608ae646a9da878e0/Utilizacion-de-las-Energia-Alternativas-de-Origen-Marin)
- Herrera, A., & Quintero, A. (2017). Redalyc. Obtenido de LA ENERGÍA DE ORIGEN MARINO Y SU USO POTENCIAL EN VENEZUELA: <https://www.redalyc.org/journal/339/33951621010/movil/>
- IPCC. (2014). CAMBIO CLIMÁTICO 2014. IPCC. Ginebra: IPCC. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- IRENA. (2021). IRENA. Obtenido de PERSPECTIVAS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_WETO\\_Summary\\_2021\\_ES.pdf?rev=beaa790b637d47ed878e25378899d227](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_WETO_Summary_2021_ES.pdf?rev=beaa790b637d47ed878e25378899d227)
- IRENA, B. d. ((s/f) de (s/f) de 2020). *Las energías renovables marinas impulsan la economía azul*. Obtenido de IRENA : [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Offshore\\_Renewables\\_2020\\_ES.pdf?la=en&hash=22E6CC605C56350E77258008CCA4CC95ABC9F64F](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Offshore_Renewables_2020_ES.pdf?la=en&hash=22E6CC605C56350E77258008CCA4CC95ABC9F64F)
- Kapil, N. (2018). *Renewable energy from oceans* (Vol. 18).
- Leary, D., & Esteban Miguel. (2009). Climate change and renewable energy from the ocean and tides: Calming the sea of regulatory uncertainty. *International Journal of Marine and Coastal Law*, 24(4).
- Lin, Jian Lin, & Nianyuan Wu. (Abril de 2022). Revisión y perspectivas del desarrollo internacional de las energías renovables. *Energía y entorno construido*, 3(2), 139-157. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320301148?pes=vor>
- Linares, P. (Diciembre de 2018). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI*. Obtenido de La transición energética: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/35780/IIT-18-155A.pdf?sequence=1>
- López Amable, & Somolinos, J. (2014). Modelado energético de convertidores primarios para el aprovechamiento de las energías renovables marinas. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(2).
- M Castelos. (2013). Los tipos de energías renovables marinas. En C. M, *Las energías renovables marinas y la riqueza potencial de los océanos: ¿Un mar de dudas o un mar de oportunidades?* (pág. 250). JYB.
- Moreno García, H. (2016). *Estudio de pre-factibilidad para generación de energía mareomotriz en la Costa Pacífica Colombiana*. Cundinamarca. Bogotá: Universidad de La Salle. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/61/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/61/)

- Naciones Unidas. (2015). Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21). *Acuerdo de París* (págs. 1-29). París: NACIONES UNIDAS. Obtenido de [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)
- Neill, S., & M. Reza, H. (2018). *Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea*.
- NOVA. (2009). *Instalacion y prueba de un prototipo a escala reducida de convertidor de energia oceanica con una capacidad instalada de 10 kw en playa La Punta, El Playon, Municipio Ocumare de la Costa de Oro, Estado Aragua*. Venezuela: Nova Oceanic Energy Systems.
- Posadillo, R. (s.f.). INETemas. Obtenido de Energías Renovables:¿Potencia para un futuro sostenible?: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/7766/posadillo1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quintero, J., & Quintero, L. (2016). SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 18(1).
- Rodas Monsalve Julio César, H. M. (2019). Capítulo 4 Energías renovables no convencionales y cambio climático: un análisis para Colombia. En R. M.-G. Güiza-Suárez Leonardo, *Las energías renovables no convencionales y sus desafíos regulatorios en Colombia* (págs. 63-86). Bogotá: Universidad del Rosario.
- Rodríguez Santos, R., & Chimbo Campuzano, M. (2017). APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ EN EL ECUADOR. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 34. Recuperado el <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554801003>
- Rueda, J. (2021). *AVANCES DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y EÓLICA MARINA EN COLOMBIA*.
- Tambutti, M., & Gómez, J. (2022). *Mendeley*. (CEPAL, Ed.) Obtenido de Panorama de los océanos, los mares y los recursos marinos en América Latina y el Caribe: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Manejo-de-los-recursos-costeros-y-marinos-en-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Villate, J. L. (8 de Julio de 2010). *situación actual de las energías marinas y perspectivas de futuro Situación actual de las energías marinas y perspectivas de futuro*. Bilbao, España. Obtenido de [https://www.saaei.org/edicion10/Datos/SAAEI10\\_JLVillate.pdf](https://www.saaei.org/edicion10/Datos/SAAEI10_JLVillate.pdf)

# La energía undimotriz como fuente de sostenibilidad energética en Colombia

Ezequiel David Fernández Conradoa  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La energía undimotriz, también conocida como energía del oleaje, es una alternativa prometedora para la sostenibilidad energética en Colombia. Esta energía renovable derivada del movimiento de las olas tiene la capacidad de ampliar la gama de fuentes de energía del país, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir los efectos ambientales derivados de la generación de energía con fuentes convencionales. En el contexto colombiano, la dependencia histórica de los combustibles fósiles ha generado una serie de desafíos en términos de sostenibilidad energética. La producción y consumo de petróleo y sus derivados han llevado a un alto nivel de importaciones, lo que plantea preocupaciones sobre la seguridad energética y la vulnerabilidad a los cambios en los precios internacionales del petróleo. Además, la disminución de las reservas probadas de hidrocarburos (Vargas Gómez, 2007) ha generado la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía para satisfacer la demanda nacional. El potencial de la energía undimotriz como fuente de sostenibilidad energética en Colombia es un tema de creciente interés en el contexto de la búsqueda de fuentes de energía renovable. Según el informe de (Demirbilek, 2013), Colombia cuenta con un potencial estimado de 17 GW de energía undimotriz, lo que representa una oportunidad significativa para la generación de electricidad a partir de este recurso renovable. La energía undimotriz ofrece ventajas significativas en comparación con otras fuentes de energía renovables, por ser constante y predecible; ya que no requiere grandes extensiones de

GIPEM 05, diciembre (2023)  
pp. 117-124  
[www.gipem.co/revista-gipem](http://www.gipem.co/revista-gipem)  
[gipem\\_fiarman@unal.edu.co](mailto:gipem_fiarman@unal.edu.co)  
©Derechos patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia

tierra, lo que la hace especialmente relevante en un país con limitaciones en la disponibilidad de terrenos para proyectos de energía renovables a gran escala, a diferencia de la energía solar o eólica.

Un análisis de la energía de las olas en Colombia revela varias ventajas. En primer lugar, ésta es una fuente de energía limpia y renovable que no emite gases de efecto invernadero ni contribuye a la contaminación atmosférica (López-González, Hiriart-Le Bert, & Silva-Casarín, 2010) . Esto concuerda con el compromiso de Colombia de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 60 % para 2050 (Angélica Rojas Góngora, 2015) y hacer la transición hacia un futuro energético más sostenible. En segundo lugar, la energía undimotriz es abundante y predecible, ya que las olas son un fenómeno natural impulsado por los patrones del viento y las corrientes oceánicas, esta previsibilidad permite una planificación y una integración más precisas en la red nacional. En la actualidad, Colombia se encuentra en una etapa inicial en cuanto a la implementación de la energía undimotriz (Polo, Rodríguez & Sarmiento, 2008) . Sin embargo, se han dado pasos significativos en la exploración de esta fuente renovable. Según datos del Ministerio de Minas y Energía, Colombia cuenta con un gran potencial para la generación de energía undimotriz, especialmente en la región del Pacífico, donde se estima que se podrían generar alrededor de 5.6 GW de energía a partir de las olas del mar (Ormaza, 2012). La incorporación de la energía undimotriz en la matriz energética colombiana implicará un cambio en la estructura y arquitectura del mercado energético, lo que influirá en los incentivos económicos para su producción o generación (Vargas, 2009) . Este cambio se relaciona con la necesidad de replantear las estrategias enfocadas en la centralización y verticalidad en la toma de decisiones, abriendo paso a la descentralización y democratización en la planificación, ejecución y administración de los recursos energéticos. A pesar de la falta de enfoque en la energía undimotriz, Colombia ha promulgado leyes para promover la eficiencia energética y fuentes de energía alternativas, como la Ley 1751/2014 (A.F.Osorio, 2016) , que busca integrar la energía no convencional en el sistema eléctrico nacional.

Según (Bayne, 2020) Colombia ha experimentado un rápido crecimiento en el uso de energías renovables, con un aumento del 1% al 1.5% en el portafolio de energía renovable en tan solo un año; por su parte, (Christian M. Appendini a, 2015) revelan que la energía undimotriz en el Mar Caribe está estrechamente relacionada con el Jet de Niveles Bajos del Caribe (CCLJ por sus siglas en inglés), con un viento zonal oriental que alcanza los 13 m/s. Esta relación entre el viento y las olas demuestra la influencia directa del CCLJ en la climatología de las olas en el Mar Caribe. Además, el estudio confirma que la región del CCLJ es adecuada para la extracción de energía undimotriz, con tasas de producción de energía que oscilan entre 8 y 14 kW/m (Christian M. Appendini a, 2015). Estos datos numéricos proporcionan una comprensión profunda del potencial energético de las olas en el Mar Caribe. Asimismo, el estudio destaca la importancia de considerar las variaciones espaciales en el potencial de energía undimotriz en el Mar Caribe. Se identifica que la región del CCLJ presenta gradientes espaciales significativos que deben ser tenidos en cuenta al instalar dispositivos de energía undimotriz. Para evaluar el potencial de esta energía en la región se necesita hacer el análisis de las aceleraciones transitorias recurrentes con periodos semidiurnos y diurnos, así como la validación de los periodos naturales de las olas transitorias en el Caribe colombiano (Juan Gabriel Rueda-Bayona, 2023) .Estos hallazgos proporcionan una comprensión más profunda de las causas subyacentes y los efectos asociados con la energía undimotriz, lo que es crucial para evaluar su viabilidad como fuente de sostenibilidad energética en Colombia. Además, la detección de las aceleraciones transitorias en la columna de agua y su relación con los cambios en los vientos superficiales ofrece información valiosa para el diseño y la implementación de tecnologías de generación de energía por medio de las olas en la región.

En términos de viabilidad, se estima que, bajo un escenario conservador, la energía undimotriz podría generar aproximadamente 187,5 MW, equivalente al 3,125 % de la demanda total de potencia del sistema eléctrico colombiano (Jaramillo-Osorio & Garcés-Ruiz, 2015) , lo que representa una contribución significativa a la capacidad energética del país. Esta cifra demuestra el potencial de esta energía para satisfacer las necesidades energéticas de dos ciudades enteras, del tamaño de Pereira

(Risaralda), con aproximadamente 450.000 habitantes, lo que resalta su capacidad para abordar la demanda energética a gran escala. En la evaluación de sitios con capacidad para la generación eficiente de electricidad a partir de fuentes no convencionales en Colombia, se encontró que la península de la Guajira, bañada por el Mar Caribe, presenta un flujo promedio de energía de 11.67 KWm, mientras que en Bocas de Ceniza Barranquilla se registró un flujo promedio de energía de 16.11 KWm (Rafael Ricardo Torres Parra, 2006) , superando los niveles mínimos para la generación económica de electricidad. El potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba ha sido objeto de estudio a través de un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore. Los resultados obtenidos muestran que la potencia máxima producida por el dispositivo fue de 5.16 W con una altura de 0.3 metros y un periodo de 3.5 segundos (González Doria, 2019) . Además, se demostró que teóricamente existen 1058.4 W/m de potencial energético undimotriz aprovechables en Córdoba, de los cuales con el dispositivo diseñado se podrían obtener cerca de 7.2 W. En cuanto al pacífico los datos del Boletín Meteomarino Mensual del Pacífico Colombiano, nos indica que esta zona presenta un oleaje constante y con una gran cantidad de energía debido a que proviene del mar abierto, sin presentar pérdidas por fricción con el fondo marino al llegar a la costa (Aris José Perdomo Idárraga, 2018) . Estos datos demuestran la capacidad real y concreta que posee Colombia para aprovechar la energía undimotriz. A pesar de las ventajas evidentes, la viabilidad de esta fuente de energía en el país presenta desafíos importantes. Uno de los principales obstáculos es la necesidad de desarrollar tecnologías y sistemas de conversión eficientes y adaptados a las condiciones específicas del litoral colombiano. Además, se requiere una inversión considerable en infraestructura y desarrollo tecnológico para aprovechar plenamente el potencial de la energía undimotriz en el país.

A nivel mundial, la energía undimotriz ha demostrado ser una fuente confiable y predecible de energía renovable. Por ejemplo, en países como Portugal, se ha logrado una penetración significativa de esta fuente de energía en la matriz energética, lo que demuestra su viabilidad a gran escala (Cadena, Botero, Táutiva, Betancur & Vesga, 2008) . Este éxito internacional es un indicador alentador para la viabilidad de la energía undimotriz en Colombia, especialmente considerando el potencial del país en términos de costa marítima. Estos hallazgos subrayan la importancia de promover la inversión en tecnologías undimotrices en Colombia. A pesar de los desafíos actuales, como la percepción de que la normatividad vigente no favorece el desarrollo de proyectos de generación con fuentes alternas de energía, existen oportunidades para impulsar la adopción de la energía undimotriz. La implementación de esquemas de financiación adecuados, respaldados por políticas de fomento a las energías renovables, puede ser clave para superar las barreras económicas y tecnológicas que actualmente limitan su penetración en el mercado energético colombiano.

El artículo de Rodríguez-Santos & Chimbo-Campuzano (2016) destaca que la viabilidad de la energía undimotriz en Ecuador está estrechamente ligada a la necesidad de tecnologías sofisticadas para su aprovechamiento. De manera similar, en el caso de Colombia, la implementación exitosa de esta forma de energía requeriría la adopción de tecnologías avanzadas que puedan resistir las condiciones marinas cambiantes y aprovechar de manera eficiente el movimiento de las olas (Narváz Rincón, 2010) . Además, el potencial de energía undimotriz en el litoral marítimo ecuatoriano es de aproximadamente 20 KW por cada metro de ola (Rodríguez-Santos & Chimbo-Campuzano, 2016), lo que proporciona una idea del potencial energético que se podría encontrar en las costas colombianas. En Colombia, según datos estadísticos recientes, el potencial total de energía undimotriz se estima en unos 11.400 MW (Herrera & Quintero, 2017) . La clasificación de las tecnologías de generadores utilizadas en otros países revela una variedad de enfoques para el aprovechamiento de esta fuente de energía, desde dispositivos flotantes hasta sistemas anclados en el lecho marino. Esta diversidad de tecnologías ofrece a Colombia la oportunidad de evaluar diferentes enfoques y seleccionar aquellos que mejor se adapten a sus condiciones geográficas y ambientales específicas, pero es importante y necesaria la colaboración entre el mundo académico, las instituciones de investigación y los agentes de la industria para impulsar la innovación en el sector. La caracterización de las olas en las costas del Atlántico ha permitido identificar que el comportamiento del oleaje varía de acuerdo con la época del año, lo que influye directamente en

el potencial energético. El Mar Caribe experimenta una importante actividad de las olas, especialmente en la cuenca colombiana. De acuerdo con el estudio « Interannual variability of wave climate in the Caribbean Sea» de (Otero, 2020), existen variaciones notables en la climatología del mar a lo largo del año. El Niño Oscilación del Sur (ENOS), una oscilación climática de baja frecuencia que afecta la altura y el período de las olas, influye en estas oscilaciones. Como se evidencia en el estudio, la presencia del ENOS tiene un impacto significativo en la energía de las olas en el mar Caribe. La altura y la energía de las olas aumentan durante la fase cálida del ENOS (El Niño), especialmente durante el primer semestre (junio-noviembre). En cambio, durante la etapa fría del ENOS (La Niña), la altura y la fuerza de las olas disminuyen, siendo el segundo semestre (diciembre-mayo) cuando se registran las mayores disminuciones. Estos hallazgos destacan la estrecha conexión entre el ENOS y la variabilidad de la energía de las olas en el Mar Caribe. En contraste, la zona insular del Caribe colombiano ha mostrado variaciones en el Flujo de Energía de las Olas (WEF, por sus siglas en inglés), con disminuciones entre 7 % y 8 % en San Andrés, y entre 1 % y 3 % en los Cayos del Norte (Andres F. Orejarena-Rondon, 2022) . Estas variaciones pueden atribuirse a factores climáticos y oceanográficos específicos de cada región, lo que resalta la importancia de un análisis detallado y localizado al considerar proyectos de energía undimotriz en el Caribe colombiano. El Mar Caribe, con su fuerte campo de remolinos de meso escala y sus enérgicos remolinos, ofrece un gran potencial para la extracción de energía de las olas. La variabilidad de meso escala del Mar Caribe está impulsada por diversas fuentes de energía. Las fuentes de energía incluyen las corrientes medias, la Corriente Ecuatorial del Norte (CNE), la Circulación Meridional de Vuelco (CMD), los anillos de la Corriente del Norte de Brasil (CNB) y la interacción con el Giro Subtropical (Julien Jouanno, 2009) .Según (Pérez-Zapata, 2017) , el historial de datos recopilados desde enero de 2014 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) muestra una poca variabilidad de un año a otro en el comportamiento de las olas en la zona de estudio. Esto proporciona confiabilidad a los cálculos realizados para la determinación del potencial de energía undimotriz. El CIOH cuenta con cuatro boyas oceanográficas ubicadas en el mar Caribe, las cuales han proporcionado información detallada sobre las características del oleaje en diferentes zonas de la costa del departamento del Atlántico. Estos datos han sido fundamentales para el análisis del potencial energético de la energía undimotriz en la región. Además, se ha avanzado en el diseño de un sistema near-shore para la verificación del potencial energético, lo que demuestra un compromiso con la investigación y desarrollo de tecnologías para aprovechar esta fuente de energía.

Un análisis del artículo sobre “Dispositivo de prueba para péndulos paramétricos con vistas a la captación de energía de las olas”; revela valiosos conocimientos sobre la dinámica de los sistemas pendulares y su potencial para la extracción de energía de las olas (Virla, 2022) . El estudio se centra en el diseño de un dispositivo de prueba para el estudio de la dinámica de los péndulos, concretamente de los péndulos paramétricos. Un péndulo paramétrico es un sistema pendular que puede verse influido por un forzamiento externo, como el movimiento de las olas del océano. La amplitud y la frecuencia del forzamiento externo son parámetros cruciales que determinan la respuesta rotacional del péndulo. Ajustando estos parámetros, es posible conseguir un movimiento de rotación óptimo y maximizar la extracción de energía de las olas. Sin embargo, la complejidad de utilizar sistemas pendulares para la captación de energía reside en su naturaleza no lineal, con respuestas de rotación que coexisten con el reposo, las oscilaciones y las soluciones caóticas. La naturaleza estocástica de las olas oceánicas y los extensos estados transitorios ponen aún más de relieve la necesidad de sistemas de control en la utilización de dispositivos pendulares para la generación de energía.

La tecnología de oscilación de las olas de Arquímedes (AWS), estudiada en el artículo de (Jaramillo-Osorio & Garcés-Ruiz, 2015), ofrece una visión preliminar de la integración de la energía de las olas con el sistema eléctrico y explora el impacto en las oscilaciones de frecuencia. El sistema AWS, consistente en una cámara cilíndrica hueca fija sumergida en el medio marino y un dispositivo flotante en la parte superior, que aprovecha el movimiento vertical de las olas para generar electricidad. Aunque existen retos relacionados con las oscilaciones de baja frecuencia y la posibilidad de resonancias sub-síncronas, se han realizado estudios y simulaciones minuciosos utilizando el sistema de 9 nodos IEEE para



comprender y abordar mejor estas cuestiones (Jaramillo-Osorio & Garcés-Ruiz, 2015) . A pesar de sus beneficios, la integración de la generación undimotriz plantea desafíos, como la necesidad de un riguroso estudio para garantizar la seguridad de la red a la que se conectará esta tecnología. Sin embargo, con un correcto planeamiento y conocimiento del sistema eléctrico, la generación undimotriz puede integrarse de manera exitosa. Es crucial destacar que entre más robusto sea el sistema, mejores condiciones presenta para la integración de esta tecnología.

Las microrredes eléctricas buscan integrar de manera eficiente los recursos energéticos distribuidos, incluyendo la energía undimotriz, con el objetivo de suplir un requerimiento energético específico. En el caso de Colombia, un país con extensas costas tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico, la energía undimotriz representa una oportunidad significativa para diversificar su matriz energética y reducir su dependencia de los combustibles fósiles. las microrredes eléctricas pueden operar de forma independiente y aislada de la red eléctrica convencional, lo que las hace ideales para zonas costeras o islas que no están completamente interconectadas con el sistema principal. La implementación de la energía undimotriz en microrredes eléctricas podría tener un impacto significativo en la sostenibilidad energética de Colombia. Según (Díaz A., 2019) , la operación independiente de la red convencional mediante el uso eficiente de fuentes de energía renovables puede reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y garantizar la confiabilidad del suministro energético para los requerimientos locales.

A pesar de que la producción actual de energía undimotriz en Colombia es limitada, el potencial de esta fuente renovable es significativo. Mediante un estudio computacional, se ha demostrado que un convertidor pendular puede generar alrededor de 20 W de potencia (Rojas, 2022) , lo que resulta razonable considerando la baja densidad energética del oleaje en los estuarios. El prediseño de un prototipo convertidor undimotriz pendular a pequeña escala, formulado por el Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP) de la Universidad Tecnológica Nacional, representa un paso inicial hacia la implementación de esta tecnología en el Estuario de Bahía Blanca. Este enfoque estratégico busca establecer una configuración óptima en términos de generación de energía cinética, considerando múltiples configuraciones geométricas y constructivas, así como criterios basados en la dinámica no lineal del péndulo paramétrico. La definición de un convertidor undimotriz pendular implica considerar tanto aspectos geométricos como dinámicos del péndulo paramétrico. Esto permite clasificar los distintos parámetros de diseño en función de su influencia en la generación de energía cinética. Por ejemplo, la longitud del eje central y el radio de la rueda portante se clasifican como variables que afectan la inercia del sistema, mientras que el espesor de la rueda se considera como una variable ajustable para sintonizar la respuesta del péndulo.

La investigación y desarrollo de dispositivos WEC y sistemas de conversión de energía (PTO) para la generación de energía con base en el recurso disponible en el país es fundamental para su viabilidad a largo plazo. En este sentido, se han identificado varios tipos de dispositivos WEC, como el Alettone, Wave Clapper, absorbedor puntual, Pelamis, Archimedes Wave Swing, y Oyster, entre otros, que han demostrado ser eficaces en la conversión del movimiento de las olas en electricidad (Juan Pablo Castaño-Serna 1a, 2023) . Además, se han discutido diferentes sistemas PTO, como el mecánico y el hidráulico, analizando sus ventajas y desventajas en el contexto de la energía undimotriz en Colombia. La selección de un convertidor de energía de las olas de tipo oscilante y un sistema de toma de fuerza para el aprovechamiento de la energía undimotriz en Colombia requiere un análisis detallado de los criterios de selección, así como de los aspectos ambientales y financieros asociados. En este sentido, se propone un diseño de concepto para un dispositivo WEC tipo péndulo en una estructura fija a la costa con un sistema PTO de toma mecánica directa, lo que representa una opción viable para la generación de energía a partir del recurso disponible en las costas colombianas.

En el Pacífico colombiano, donde la falta de suministro eléctrico confiable es una preocupación arraigada. Según el estudio realizado por (Fredys Romero Menco, 2020) , se ha desarrollado un sistema de generación de energía a partir de las olas, compuesto por una boya, dispositivos mecánicos y un generador lineal, que ha demostrado ser capaz de generar 1.17 kW bajo condiciones de oleaje regulares y 0.5 kW bajo condiciones de oleaje irregulares. Este sistema se presenta como una opción interesante para las poblaciones que viven cerca de las líneas de costa alejadas de las redes eléctricas existentes. En términos de costos, se ha estimado que la construcción de proyectos de energía undimotriz en los sitios identificados conlleva cierta inversión inicial. Sin embargo, es importante considerar que, a largo plazo, el costo medio de energía podría resultar competitivo en comparación con otras fuentes de energía, la inversión para la construcción de estos proyectos, se estima que varía entre 40.692.500 y 639.375.000 dólares estadounidenses, dependiendo del sitio específico (Quintero González & Quintero González, 2015) . Esta información es relevante para comprender la viabilidad económica de la implementación de la energía undimotriz en Colombia.

La exploración de la energía undimotriz representa una perspectiva prometedora para que Colombia diversifique su matriz energética, disminuya la dependencia de los combustibles fósiles y promueva la sostenibilidad energética. No obstante, diversos desafíos deben abordarse, tales como el desarrollo tecnológico y la integración en la infraestructura eléctrica existente. A pesar de estas dificultades, los beneficios potenciales indican que superar estos obstáculos es viable. El contexto colombiano actual se ve marcado por la necesidad de una transición energética hacia fuentes más sostenibles. En este sentido, la energía undimotriz ofrece una alternativa viable, pero su implementación conlleva retos técnicos y logísticos. El desarrollo tecnológico preciso se presenta como un requisito esencial para aprovechar eficazmente la energía generada por las olas del mar. La integración de la energía undimotriz en la red eléctrica existente es un aspecto crítico que requiere atención meticulosa. La adaptación de la infraestructura eléctrica tradicional para incorporar fuentes de energía fluctuantes, como las generadas por las olas, demanda estrategias ingenieriles específicas. Esto implica no solo el desarrollo de tecnologías undimotrices avanzadas, sino también la revisión y mejora de los sistemas de gestión de la red eléctrica. Para avanzar de manera efectiva en esta dirección, es crucial establecer colaboraciones sólidas entre el ámbito académico, las instituciones de investigación y los actores de la industria. La sinergia entre estas entidades facilitará la investigación y el desarrollo de tecnologías undimotrices, así como la aplicación práctica de soluciones innovadoras en el terreno. Las inversiones estratégicas y las políticas adecuadas desempeñan un papel fundamental en el éxito de la adopción de la energía undimotriz en Colombia. Estas inversiones deben dirigirse hacia la investigación y el desarrollo tecnológico, fomentando la innovación y reduciendo las barreras económicas y burocráticas que puedan obstaculizar la implementación de esta fuente energética.

## Referencias

- A.F.Osorio, S. O.-A. (2016). Assessment of the marine power potential in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(53), 966-977. Recuperado el 2023, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.057>
- Andres F. Orejarena-Rondon, J. C.-M. (2022). Wave energy flux in the Caribbean Sea: Trends and variability. *Renewable Energy*(181), 616-629. Recuperado el 2023, de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.081>
- Angélica Rojas Góngora, Y. D. (2015). Escenarios energéticos a 2050 con integración de fuentes de energía. *Revista Tecnura*, 19, 83-89. Recuperado el 2023, de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/650>

- Aris José Perdomo Idárraga, D. H. (2018). Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del pacífico colombiano. *AVANCES:INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15(1), 286-301. Recuperado el 2023, de <https://doi.org/10.18041/avances.v15i1>
- Bayne, L. A. (2020). Analysis of Offshore Wind Energy in Colombia: Current Status and Future Opportunities. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(11), 2278-0181. Recuperado el 2023, de <http://www.ijert.org>
- Cadena, Á. I., Botero, S., Táutiva, C., Betancur, L., & Vesga, D. (2008). Regulación para incentivar las energías alternativas y la generación distribuida en Colombia. *Revista de Ingeniería*(28), 90-98. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015051012>
- Christian M. Appendini a, C. P.-L.-P.-F. (2015). Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information. *Applied Energy*(137), 375-384. Recuperado el 2023, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.038>
- Demirbilek, Z. (2013). Sea level rise and impact on engineering practice. *Ocean Engineering*, 71, 39180-6199. Recuperado el 2023, de [www.elsevier.com/locate/oceaneng](http://www.elsevier.com/locate/oceaneng)
- Díaz A., N. L. (2019). El Rol de las Energías Renovables en las Microrredes. *Ingeniería*, 24(1), 4-5. Recuperado el 2023, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498864120001>
- Fredys Romero Menco, A. R.-C. (2020). Design of a wave energy converter system for the Colombian Pacific Ocean. *Revista Facultad de*(94), 8-23. Recuperado el 2023, de <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20190406>
- González Doria, H. M. (2019). Estudio del potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba a través de un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore. *INGE CUC*, 16(1), 141-155. Recuperado el 2023, de <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.010>
- Herrera, A., & Quintero, A. (2017). LA ENERGÍA DE ORIGEN MARINO Y SU USO POTENCIAL EN VENEZUELA. *Interciencia*, 42(6), 393-399. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33951621010>
- Jaramillo-Osorio, R., & Garcés-Ruiz, A. (2015). Generación Undimotriz: Integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona. *Energética*(45), 49-59. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147040741005>
- Javier Aparisi Torrijoa, B. P.-B. (2021). Análisis bibliométrico del campo de la energía undimotriz. *INNODOCT*, 8. Recuperado el 2023, de <http://dx.doi.org/10.4995/INN2021.2021.133034>
- Juan Gabriel Rueda-Bayona, J. J.-L. (2023). Hydrokinetic Energy and Transient Accelerations of Marine Currents in Colombian Nearshore Waters. *Water*(15), 2725. Recuperado el 2023, de <https://doi.org/10.3390/w15152725>
- Juan Pablo Castaño-Serna 1a, E. C.-A. (2023). Selección de un convertidor de energía de las olas de tipo oscilante y un sistema de toma de fuerza para el aprovechamiento de la energía undimotriz de Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 141-166. Recuperado el 2023, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias>
- Julien Jouanno, J. S.-M. (2009). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part II: Energy sources. *Ocean Modelling*, 26, 226-239. Recuperado el 2023, de [doi:10.1016/j.ocemod.2008.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.10.006)

- López-González, J., Hiriart-Le Bert, G., & Silva-Casarín, R. (2010). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 11(02), 233-245. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40412515009>
- Narváez Rincón, P. C. (2010). Fuentes convencionales y no convencionales de energía: estado actual y perspectivas. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 165-173. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64316140016>
- Ormaza, A. (2012). La energía renovable procedente de las olas. *e-Revista de Didáctica*, 8, 14. Recuperado el 2023, de [http://www.ehu.es/ikastorratza/8\\_alea/energia/energia.pdf](http://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energia/energia.pdf) (ISSN: 1988-5911)
- Otero, M. J.-S. (2020). Interannual variability of wave climate in the Caribbean Sea. *Ocean Dynamics*, 70, 965-976. Recuperado el 2023, de <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01377-1>
- Pérez-Zapata, J. (2017). IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 7(2), 93-102. Recuperado el 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096077>
- Polo, J. M., Rodríguez, J., & Sarmiento, A. (2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes. *Revista de Ingeniería*(28), 99-105. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015051013>
- Quintero González, J. R., & Quintero González, L. E. (2015). Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente. *Gestión y Ambiente*, 18(2), 121-134. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169443282007>
- Rafael Ricardo Torres Parra, C. A. (2006). Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. *Boletín Científico CIOH*(24), 11-25. Recuperado el 2023, de <https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/article/view/145>
- Rodríguez-Santos., R., & Chimbo-Campuzano, M. (2016). APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL ECUADOR. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*(17), 13. Recuperado el 2023, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554801003>
- Rojas, L. M. (2022). Prediseño de un Convertidor Pendular de Energía Undimotriz a Pequeña Escala. *Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de*, 15, 6. Recuperado el 2023, de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1116>
- Vargas Gómez, C. A. (2007). Energía y medioambiente. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 73-82. Recuperado el 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169419821006>
- Vargas, L. (2009). Producir más energía: cómo, cuándo y cuánto. *Revista de Ciencias Ambientales*, 37(1), 13-22. Recuperado el 2023, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070693002>
- Virla, J. N. (2022). Dispositivo de ensayo para péndulos paramétricos con vistas a la extracción de energía undimotriz. *Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de*(15), 5. Recuperado el 2023, de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1031>



SANTIAGO ERAZO

Fotografía tomada por Santiago Erazo a Guayacan , Ancuya - Nariño



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA