



UNA PERSPECTIVA DEL DESARROLLO HIDROELÉCTRICO EN ECUADOR: PASADO, PRESENTE Y FUTURO

A HYDROPOWER DEVELOPMENT PERSPECTIVE IN ECUADOR: PAST, PRESENT, AND FUTURE

Sebastian Naranjo-Silva 

Departamento de Gestión de Carreteras; Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

*Autor para correspondencia: hector.sebastian.naranjo@upc.edu.ec

Manuscrito recibido el 03 de noviembre de 2021. Aceptado, tras revisión, el 27 de octubre de 2023.

Resumen

Ecuador es un pequeño país andino ubicado en el hemisferio occidental de América del Sur. El país cuenta con 361.747 km^3 anuales de recursos hídricos superficiales. Como resultado, Ecuador, en los últimos quince años (2005 a 2020), ha estado desarrollando proyectos hidroeléctricos para triplicar la producción en esta fuente renovable. Hubo ocho nuevas centrales hidroeléctricas construidas en Ecuador entre 2007 y 2015, en donde se invirtieron cerca de USD 6 mil millones en los proyectos, lo que incrementó la respuesta energética con renovables; por ejemplo, en 1985 el país produjo 4 TWh, en 2005 registró 7 TWh y hasta 2020, 24 TWh. Según la Corporación de Electricidad del Ecuador en 2020 informó que generó alrededor del 80 % de toda la electricidad a través de hidroelectricidad. Así, el artículo tiene como objetivo analizar críticamente el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Ecuador en los últimos años y establecer proyecciones energéticas generales al 2030 para ampliar los campos de conocimiento y perspectivas. La metodología del trabajo es cuantitativa, de acuerdo con fuentes editoriales científicas, artículos, documentos de investigación, y recolecta datos de agencias gubernamentales que regulan el desarrollo energético en Ecuador. Se concluye que, mediante un cálculo de proyecciones, Ecuador necesitará para el año 2030 alrededor de 43 TWh, 47 TWh o 52 TWh para abastecer la red energética, según los escenarios propuestos (bajo, medio, alto). Si bien la energía hidroeléctrica será fundamental para contribuir a este requerimiento, el país tiene una barrera porque la energía hidroeléctrica es muy sensible a factores externos de diversa índole, generando un futuro incierto directamente asociado a los efectos climáticos.

Palabras clave: Ecuador, energías renovables, desarrollo hidroeléctrico, perspectiva, proyecciones.

Abstract

Ecuador is a small Andean country located in the western hemisphere of South America. The country has 361,747hm³ annual superficial water resources; As a result, Ecuador, in the last fifteen years (2005 to 2020), has been rapidly developing hydropower projects to triple the production in this renewable source. There were eight new hydroelectric plants constructed in Ecuador among 2007 and 2015 invested close to USD 6 billion the projects. Increased the energy response with renewables; for example, in 1985, the country produced 4 TWh, in 2005-registered 7 TWh, and to 2020, 24 TWh. According to the Electricity Corporation of Ecuador in 2020 reported that generated around 80 % of all electricity through hydropower; thus, the article aims to critically analyze the development of hydropower in Ecuador in recent years and establish general energy projections to 2030 to expand the fields of knowledge and perspectives. The paper methodology is quantitative, according to scientific editorial sources, articles, investigative documents, and collects data from government agencies that regulate energy development in Ecuador. It is conclusive between a projection's calculation, Ecuador will need for the year 2030 around 43 TWh, 47 TWh, or 52 TWh to supply the energy grid, according to the scenarios proposed (low, medium, high). Although hydropower will be essential to contribute to this requirement, the country has a barrier because hydropower is very sensitive to external factors of diverse nature, generating an uncertainly future directly associated with climatic effects.

Keywords: Ecuador, renewable energies, hydropower development, perspective, projections.

Forma sugerida de citar: Naranjo-Silva, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. [Acceso Temprano] <http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04>.

IDs Orcid:

Sebastian Naranjo-Silva: <https://orcid.org/0000-0002-1430-8140>

1 Introducción

Ecuador es un pequeño país andino ubicado en el hemisferio occidental, al noroeste de Sudamérica, y está compuesto por tres regiones principales: Costa, Sierra y Amazonía (Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición ecológica, 2019). Ecuador se caracteriza por poseer una topografía única, una diversidad de zonas climáticas y una población prolífica de especies animales. Según el Ministerio de Ambiente y Agua de Ecuador (MAATE), la riqueza biológica se refleja en una amplia gama de organismos, y el 10% de las especies de proyectos vasculares en la biosfera se encuentran en una zona que apenas representa el 2% de la superficie global (Guilcatoma-Aimacaña, 2010; Mena-Vasconez, 2018). El país cuenta con 376 018 Hm^3 de recursos hídricos anuales, de los cuales 361,747 hm^3 son superficiales mientras que el resto son subterráneos (Hasan y Wyseure, 2018). Además, el volumen promedio anual para las regiones del país, Costa, Sierra y Amazonía es de 70,046 hm^3 , 59,725 hm^3 , y 246,246 hm^3 , respectivamente (CISPDR y SENAGUA, 2016).

Por otra parte, con la disponibilidad de recursos hídricos superficiales, el Ecuador ha venido desarrollando proyectos hidroeléctricos para triplicar la producción en los últimos quince años (2005 a 2020), como se indica en la Figura 5. En 1985 el país produjo 4 TWh, en el 2005 registró 7 TWh, y en el 2020 24 TWh de energía hidroeléctrica. La Corporación de Electricidad del Ecuador (CELEC) informó en el 2020 que el país generaba alrededor del 80% de toda la energía a través de la energía hidroeléctrica, por lo que la energía hidroeléctrica es una fuente crucial para satisfacer la demanda nacional (CELEC, 2020). Por otro lado, se construyeron ocho centrales hidroeléctricas nuevas en Ecuador entre 2007 y 2015, en donde se invirtieron cerca de USD 6 mil millones, duplicando su capacidad (Vaca-Jiménez, Gerbens y Nonhebel, 2020). En 2017 se inauguró el Coca Codo Sinclair, conocido como el mayor proyecto con 1 500 MW de capacidad, que suministra el 30% de la energía hoy en día en el país con todas las turbinas generadoras (Álvarez-Chiriboga, 2020).

Sin embargo, Ecuador es muy sensible a factores externos de diversa naturaleza como inundaciones,

tsunamis, terremotos y lluvias extremas debido a componentes atmosféricos, la ubicación geográfica, la orografía accidentada y las características meteorológicas prevalecientes que pueden causar graves impactos en la economía (Naranjo Silva, Punina y Morales, 2021; Purcell y Martínez, 2018). Sin embargo, ante fenómenos naturales impredecibles, el cambio climático intensifica la variabilidad meteorológica natural, afectando las instalaciones hidroeléctricas (Álvarez-Chiriboga, 2020; Hidalgo y col., 2024). A finales de los años 80 se empezó a discutir sobre el medio ambiente y se amplió el interés en políticas de crecimiento basadas en la calidad y la gestión de las fuentes renovables (Tang, Li y Tu, 2018). Sin embargo, los efectos de estas fuentes renovables son lentos, cuantificados y verificados, generando un nuevo problema a analizar (Jin, Andersson y Zhang, 2016).

En este contexto, este artículo tiene como objetivo analizar el desarrollo hidroeléctrico en Ecuador en los últimos años y establecer las proyecciones generales de energía hasta el año 2030 para ampliar los campos del conocimiento y discernir la perspectiva de esta fuente renovable llevada a cabo rápidamente en un país en vías de desarrollo.

2 Energía hidroeléctrica en el mundo

Según la Asociación Internacional de Hidroenergía (IHA por sus siglas en inglés), la capacidad hidroeléctrica mundial en el 2020 era de 1.330 GW (International Hydropower Association, 2021). Además, esta fuente renovable en el 2020 reportó alrededor de 14.000 proyectos activos en 180 países (ICOLD, 2019; Llamosas y Sovacool, 2021). Además, el informe de la IHA menciona que en el 2020 hubo un aumento de 21 GW en la capacidad total instalada de energía hidroeléctrica, lo que supone un aumento del 1,6% en comparación con 2019 (International Hydropower Association, 2021). De acuerdo con Killingtveit (2018), se espera que el desarrollo hidroeléctrico aumente. En la Figura 1 se puede observar la tendencia de crecimiento porcentual promedio en alrededor del 3% entre 2007 y 2016.

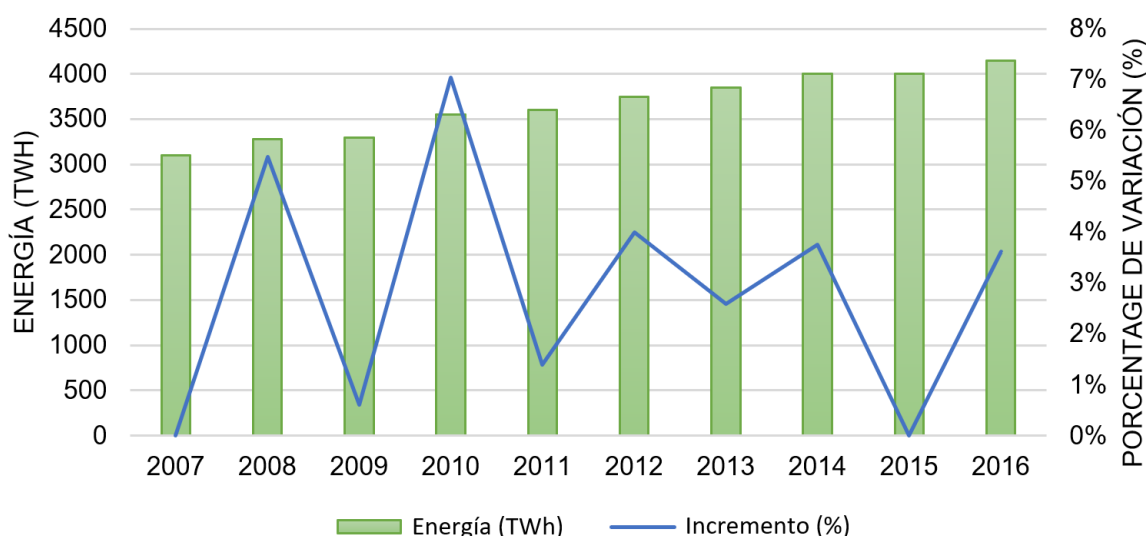


Figura 1. Crecimiento hidroeeléctrico mundial TWh período 2007 - 2016.
Fuente: International Renewable Energy Agency (2020) y Killingtonveit (2018).

De igual forma, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) determina que la evolución media de la capacidad instalada en los cinco años comprendidos entre 2016 y 2020 fue del 1,8% (IRENA, 2020). Sin embargo, a nivel mundial, un cálculo realizado en el 2017 estimó que solo el 22% del potencial hidroeeléctrico y el 4,2% de las energías renovables restantes se utilizan actualmente (Turner, Kim y Edmonds, 2017). Además, el potencial de producción de energía hidroeeléctrica amplificada es suficiente para cumplir un despliegue real a largo plazo que se calcula en más de 8.000 TWh para 2050 (Schaeffli, 2015).

La hidroenergía se define como una tecnología madura y la más utilizada entre las renovables, aunque la proporción ha disminuido lentamente a nivel mundial (Naranjo Silva y Álvarez, 2021). La cuota global de energía hidroeeléctrica cayó del 72% en 2010 (881 GW) al 41% en 2020 (1.153 GW), excluyendo la energía hidroeeléctrica de tipo bombeado a pesar del aumento de la capacidad instalada (IRENA, 2021). Actualmente, la energía hidroeeléctrica es número uno en la mayoría de los países de América Latina, Asia y Europa, pero existen riesgos significativos debido a la disponibilidad de agua (Lu y col., 2020; Teräsväinen, 2019).

3 Metodología

A nivel mundial existe mucha literatura que abarca protocolos, manuales y proyecciones que lideran o mitigan los impactos hidroeeléctricos, por lo que, en un mundo de tecnología y cambios constantes, existen diversas reflexiones y enfoques sobre el tema. Por tanto, la metodología propuesta es cuantitativa, evaluando el desarrollo de proyectos hidroeeléctricos instalados en Ecuador en los últimos años. En la parte cuantitativa, existen simulaciones y proyecciones según fuentes editoriales científicas, artículos y documentos de investigación definidos que abordan temas y aspectos como el desarrollo hidroeeléctrico del Ecuador y las políticas energéticas. Así, se enumeran los valiosos documentos en función de los temas que contribuyen a este trabajo; las bases de datos analizadas se detallan en la Tabla 1.

Se seleccionaron tres repositorios digitales (Science Direct, Springer y Taylor Francis) por tener más información asociada a la energía hidroeeléctrica como tema principal del presente manuscrito, y adicionalmente los datos cubrieron un periodo de tiempo específico (2016-2020). Después de la primera selección de datos científicos, se encontraron 76 publicaciones, incluyendo artículos de revistas, documentos de conferencias, libros e informes en lí-

nea. Debido a la falta de contribuciones cuantitativas, un gran número de documentos terminaron siendo omitidos de la primera búsqueda. Como criterio final se utilizaron artículos con simulaciones futuras, proyecciones con indicadores relevantes y recomendaciones de políticas. Además, la metodología de búsqueda utiliza frases clave como “desarrollo hidroeléctrico en Ecuador”; “proyecciones hidroeléctricas en Ecuador”; y “políticas energéticas ecuatorianas”.

Tabla 1. Editorial científica analizadas.

Período	Repositorios digitales	Artículos seleccionados
2016-2020	Science Direct	11
2016-2020	Springer	9
2016-2020	Taylor & Francis	8
Total		28

A lo largo de estos documentos, se resumen 28 trabajos seleccionados que abarcan diferentes áreas de aplicación en el desarrollo hidroeléctrico ecuatoriano. Adicionalmente, para conocer de fuentes directas los datos de los principales proyectos hidroeléctricos en Ecuador, se consultó a los siguientes organismos gubernamentales.

- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables del Ecuador (MERN)
- Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC)

Los datos fueron analizados con artículos científicos e información de organismos gubernamentales que regulan el desarrollo energético en Ecuador, generando indicadores como consumo de energía anual, ratio de consumo per cápita y crecimiento hidroeléctrico. Por un lado, para la proyección energética del Ecuador, tomamos el caso base del año 2020, y según el registro histórico del Ministerio de Energía y Recursos No Renovables crece a una tasa porcentual de 4,9%, y se incrementó un punto porcentual cuantitativo a la tendencia global a la expansión hidroeléctrica.

4 Resultados

Para abordar el tema, dividimos el artículo en dos temas significativos: el desarrollo hidroeléctrico

ecuatoriano de los últimos años y las proyecciones de los países.

4.1 Desarrollo hidroeléctrico ecuatoriano en los últimos años

Entre 2007 y 2015, Ecuador invirtió USD 6.000 millones en ocho hidroeléctricas, más del doble de su capacidad (Vaca-Jiménez, Gerbens y Nonhebel, 2020); una de ellas fue Coca Codo Sinclair. Hoy en día este proyecto es el principal en Ecuador, con 1 500 MW de capacidad que suministra el 30% de la energía actual en el país desde 2017 y que genera todas las turbinas (Álvarez-Chiriboga, 2020). Para ilustrar el desarrollo hidroeléctrico en Ecuador, la Figura 2 muestra principales cuencas y proyectos.

Asimismo, la IHA ubicó a Ecuador en el tercer lugar entre los países del mundo con nueva capacidad en 2016 (International Hydropower Association, 2018b). Además, la Corporación eléctrica de Ecuador informó en el 2020 que el 80% de toda la energía es a través de la energía hidroeléctrica, como se muestra la Figura 3 con la tendencia de la red energética del país desde 2010 (CELEC, 2020).

En la Figura 3 se puede observar que hubo un aumento de más del doble de la producción de energía hidroeléctrica en los últimos diez años. Por ejemplo, en el 2010 Ecuador aportó alrededor de 8 000 GWh; en el 2020 se suministraron 24 000 GWh, lo que representó un aumento en el período de aproximadamente 300%. Además de este aumento de la energía hidroeléctrica, la producción termoeléctrica se redujo en más del triple en el 2010, 9 000 GWh en comparación al 2020 con 2 000 GWh (CELEC, 2020; MERNNR, 2018).

Además, los datos de las estadísticas anuales de la British Petroleum Company en un análisis global del consumo de energía per cápita para el año 2019 establece que se requieren alrededor de 20 884 kWh per cápita a nivel mundial. Por el contrario, en Ecuador se necesitan 11 884 kWh per cápita; aproximadamente el 67% representa la energía hidroeléctrica con 7 904 kWh per cápita, como indica la Figura 4 (BP p.l.c., 2020).

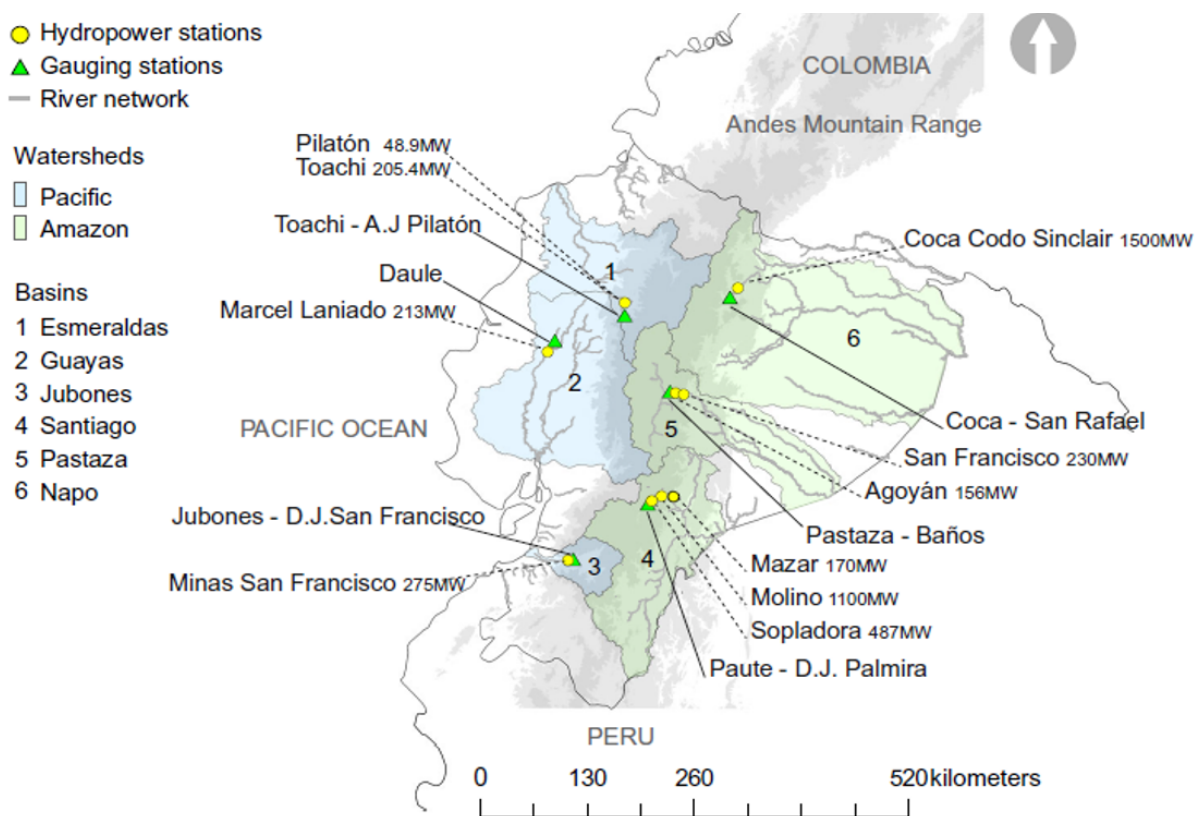


Figura 2. Principales cuencas y proyectos hidroeléctricos en Ecuador.

Fuente: Carvajal y col. (2017).

A continuación, se detalla la producción desde 1985 en Ecuador a manera de comparación entre energías renovables; en la Figura 5 se muestra una gran diferencia acumulada en el despliegue de la hidroenergía, lo que confirma un crecimiento lento y regular hasta el año 2000. El desarrollo comenzó a aumentar, luego en el 2008 se incorporaron gradualmente nuevos proyectos, y finalmente en el 2017 hubo alrededor de 20 TWh de producción de energía hidroeléctrica en comparación con 4 TWh en 1985 (MERNNR, 2018; Ritchie y Roser, 2020).

La Figura 5 muestra que la oferta hidroeléctrica en Ecuador aumentó de 4 TWh a 24 TWh en 35 años (1985 a 2020); también indica que otras energías renovables como la eólica y la solar han reducido el crecimiento, con casi ninguna relevancia de contribución a la red energética. Por lo tanto, este desarrollo hidroeléctrico representativo del Ecuador resulta pertinente para analizar los efectos y parámetros externos como el cambio climático. El país

depende actualmente de muchos proyectos hidroeléctricos, y esta fuente es sensible a las variaciones climáticas (Zhong y col., 2019).

De acuerdo con la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Ecuador (PI-NDC) del Ministerio de Ambiente y Agua en el 2019, un análisis histórico de precipitación y temperatura promedio para el período 1960-2015 determinó variaciones esenciales; las lluvias aumentaron en la Costa en 33%; en la Sierra en 13%, y en la Amazonía se redujo 1% de la precipitación. Además, hay un aumento de temperatura promedio de 0,8° (Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición ecológica, 2019). En consecuencia, la hidroelectricidad depende de la disponibilidad de recursos naturales como la precipitación, que desempeña un papel fundamental en la escorrentía del flujo y el ciclo natural del agua (Bakken, Killingtveit y Alfredsen, 2017; Van Vliet y col., 2016).

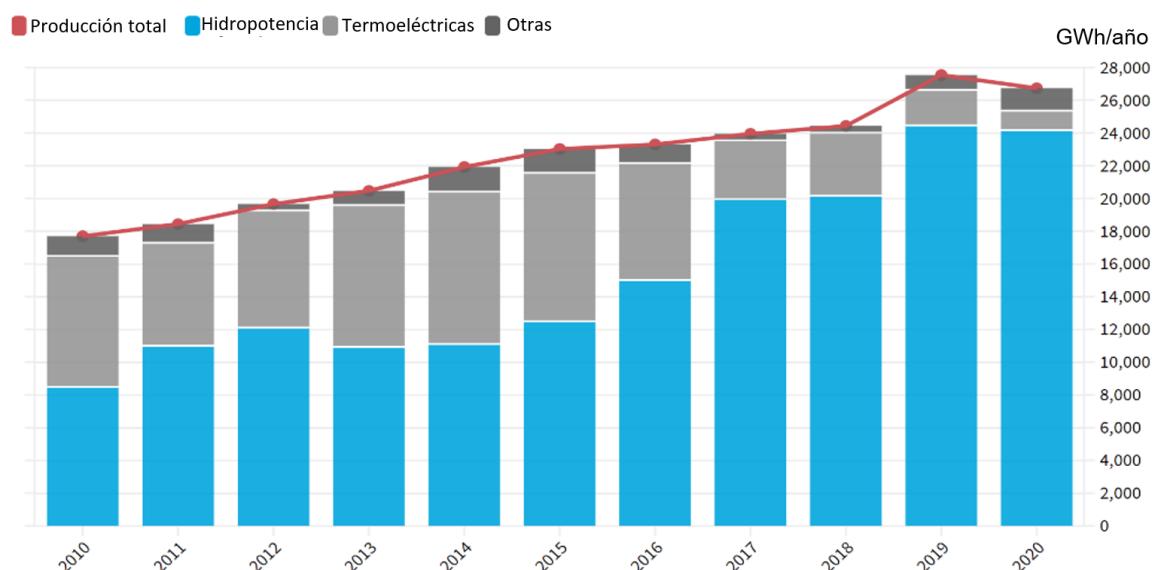


Figura 3. Producción energética Ecuador GWh / año.

Fuente: CELEC (2020).

De igual forma, resulta necesario mencionar que en Ecuador, al encontrarse en la mitad de la línea ecuatorial, existen diferencias en la precipitación entre el norte y sur, donde se registran sequías y subproducción hidroeléctrica, respectivamente, lo que ocasiona problemas a la hora de analizar su tendencia y proyección climática (Ponce-Jara y col., 2018).

Finalmente, antes de hablar de las proyecciones hidroeléctricas en Ecuador, es importante mencionar que para el año 2021 se habían instalado 5 107 MW de energía hidroeléctrica, también según la Comisión Regional de Integración Energética de Sudamérica, Ecuador tiene una capacidad hidroeléctrica factible de 23 120 MW, lo que representa una instalación del 22% hasta el momento de esta renovable (Regional Energy Integration Commission of South America, 2021).

4.2 Proyecciones hidroeléctricas en Ecuador

Según el MERN de Ecuador en el Plan Maestro de Electricidad proyectado hasta 2027 se incorporarían 645 MW con 14 proyectos que proporcionarán una energía promedio anual de 3 491 GWh. De los 14 proyectos en construcción, 11 corresponden a pro-

yectos hidroeléctricos con 407,5 MW, es decir, el 63% de la planificación, dos proyectos termoelectricos con una capacidad de 187 MW, y un proyecto eólico con una potencia de 50 MW, como se indica en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se puede observar que en Ecuador el desarrollo de la energía hidroeléctrica seguirá siendo primordial. Además de los proyectos hidroeléctricos pequeños y medianos, los datos muestran una inversión pública y privada del 88% y 12%, respectivamente. Sin embargo, dos grandes proyectos hidroeléctricos buscan continuar con la estrategia de expansión hidráulica por su capacidad, estos son Santiago y Cardenillo, como se muestra en la Tabla 3.

Sin embargo, estas dos hidroeléctricas no resultan de interés debido a las cantidades representativas necesarias de inversión y su grado de avance solo en estudios; por lo que no constituyen plantas con la certeza de ejecución para incluirlas en la actual expansión energética. Sin embargo, con proyecciones a corto plazo, el MERN de Ecuador debe definir estos proyectos como prioritarios y el Estado debe licitar para atraer fondos internacionales, que pueden estar parcialmente constituidos por créditos de carbono, ya que son proyectos de fuentes renovables, que generalmente tienen 50 años de vida.

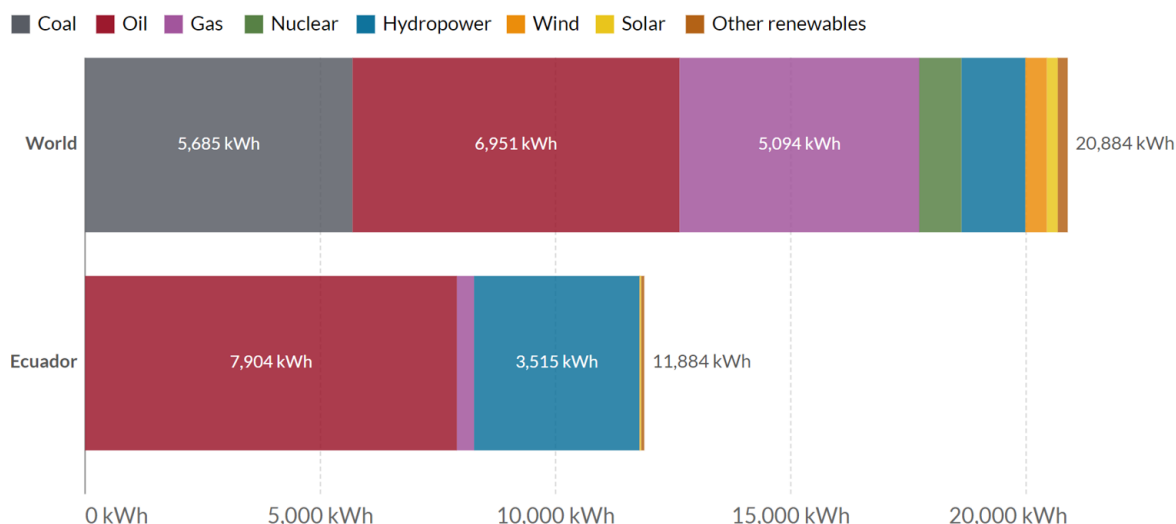


Figura 4. Consumo de energía primaria per cápita según fuente de 2019.

Fuente: (BP p.l.c., 2020).

Nota: En la figura, el término “oil” representa combustibles fósiles destinados a producir termoelectricidad.

Las proyecciones, el crecimiento de la población y el consumo requieren constantemente generación adicional de electricidad a pesar de las instalaciones hidroeléctricas actuales; los datos del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables establecen la tendencia de crecimiento histórico anual del consumo de energía de Ecuador en 4,89%. Por lo tanto, es necesario pensar en el corto y mediano plazo en continuar implementando proyectos renovables, no solo hidroeléctricos.

En este contexto, a criterio del investigador, se proyectan tres tendencias de crecimiento hasta el 2030 basadas en el consumo real de Ecuador en el 2020, y tomando como base el incremento histórico anual del 4,9% del MERN. Además, el investigador aumentó un punto porcentual para las siguientes dos tendencias, en el caso medio 5,9%, y escenario alto 6,9% como tendencia conservadora de las necesidades energéticas para el país. Como se muestra en la Tabla 4, Ecuador necesitará para el año 2030 alrededor de 43 TWh, 47 TWh, o 52 TWh de energía, según los escenarios propuestos (bajo, medio, alto) respectivamente, lo que requerirá un amplio desarrollo renovable y no renovable. Como referencia, si se implementan más proyectos hidroeléctricos, se deben utilizar instrumentos como el Hydropower Sustainability Assessment Protocol (HSAP) que contiene conceptos y sugerencias para que los países que construyen estos proyectos a nivel mundial

gestionen criterios de sostenibilidad (International Hydropower Association, 2018a).

Por otro lado, comparando las tendencias, según una investigación del papel a largo plazo de los sistemas hidroeléctricos hacia el cumplimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional del Ecuador, la hidroenergía genera impactos mediante el uso de condiciones ambientales, relacionando los efectos debidos a la acumulación de agua como cambio en la calidad del agua, deforestación y variaciones subclimáticas. Bajo este análisis, Ecuador demuestra incertidumbre pues la investigación muestra que la energía suministrada por la hidroelectricidad variaría significativamente entre 53% a 81% para el año 2050, lo que produce que la meta ecuatoriana de la NDC se lograría sin la distribución de una estructura hidroeléctrica de tamaño importante. Además, las proyecciones del estudio muestran que de existir una disminución del 25% en la disponibilidad de energía hidroeléctrica se acumularán las emisiones de CO_2 por el uso de combustibles fósiles y se duplicarán (Carvajal y col., 2019). Asimismo, a largo plazo, las simulaciones determinan que los impactos cuantificados para 2071-2100 tienen una amplia gama de diferencia anual; la producción hidroeléctrica en Ecuador varía entre -55% y + 39% del promedio histórico (Carvajal y col., 2017).

Tabla 2. Proyectos energéticos en construcción o proyectados en Ecuador.
Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, 2019).

Proyecto	Tipo de inversión	Origen	Capacidad [MW]	Energía media [GWh/año]	Patrimonio
Toachi Pilaton	Público	Energía hidroeléctrica	254,4	1120	Santo Domingo
Machala Gas	Público	Termoeléctrico	110	690	El Oro
Machala Gas Tercera	Público	Termoeléctrico	77	510	El Oro
Minas de Huascachaca	Público	Viento	50	119	Loja
Quijos	Público	Energía hidroeléctrica	50	355	Napo
Piatua	Privado	Energía hidroeléctrica	30	210,5	Pastaza
Sabanilla	Privado	Energía hidroeléctrica	30	210,5	Zamora Chinchipe
Río Verde Chico	Privado	Energía hidroeléctrica	10	74,3	Tungurahua
Chalpi Grande	Público	Energía hidroeléctrica	7,59	36	Napo
Mazar - Dunas	Público	Energía hidroeléctrica	7,38	41,4	Cañar
Mazar San Antonio	Público	Energía hidroeléctrica	7,19	44,9	Cañar
San José de Minas	Privado	Energía hidroeléctrica	5,95	48	Pichincha
Chorrillos	Público	Energía hidroeléctrica	4	23,2	Zamora Chinchipe
Ulba	Privado	Energía hidroeléctrica	1,02	8,4	Tungurahua
Total			644,5	3 490,6	-

Nota: IRENA defines. Pequeños proyectos ≤ 10 MW de capacidad, medianos a $11 \text{ MW} \leq 300 \text{ MW}$, y grandes hasta 301 MW .

Así mismo, se determinó que los aportes determinados a nivel nacional basados en la energía hidroeléctrica son altamente vulnerables a la aparición de un escenario de clima seco debido a las variaciones climáticas en la Amazonía. Además, dado el patrón de lluvias estacionales en Ecuador independientemente de la cantidad de energía hidroeléctrica instalada, el objetivo de la NDC requiere una cartera diversificada y no esencialmente de fuentes renovables (Carvajal y col., 2019; Gualpa, Céleri y Crespo, 2022). Ecuador debería trabajar una red energética más robusta en el largo plazo con una adecuada diversificación de las tecnologías de generación mediante políticas para aumentar las energías renovables no convencionales (solar, eólica, mareomotriz y geotérmica) (Carvajal y col., 2017). El Banco Interamericano de Desarrollo determina que en el futuro se proyecta la hidroelectricidad como fuente de apoyo, habilitando otras reno-

vables (Alarcon, 2019).

Además, en una evaluación de ecosistemas realizada en Ecuador, Briones-Hidrovo, Uche y Martínez (2020) en un estudio de cinco proyectos hidroeléctricos instalados: Baba, Marcel Laniado, Alazán, Mazar- Dudas y San Antonio determinó que el mundo tiene como objetivo desarrollar energías renovables frente al colapso climático y ecológico. Sin embargo, existen problemas ambientales debido a la profunda interacción con las áreas inmediatas que mueven a las personas de las comunidades indígenas hacia un cambio en el estilo de vida (Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2020; Hasan y Wyseure, 2018).

Parra (2020) explica que la energía hidroeléctrica en Ecuador es susceptible a las variaciones climáticas. Los estudios muestran que la capacidad hidroeléctrica podría mostrar una sensibilidad sustancial

a las diferencias en los patrones de precipitación. En Ecuador, esto podría cambiar los patrones de precipitación, especialmente en las regiones andinas del trópico alto. En los últimos años, la promoción de las centrales hidroeléctricas produjo una reducción de la quema de combustibles fósiles. A pesar de ello,

considerando los posibles impactos del cambio climático en esta renovable, como ocurrió en 2009, la energía hidroeléctrica se vio afectada por las condiciones climáticas secas (Cabrera y col., 2021; Parra, 2020).

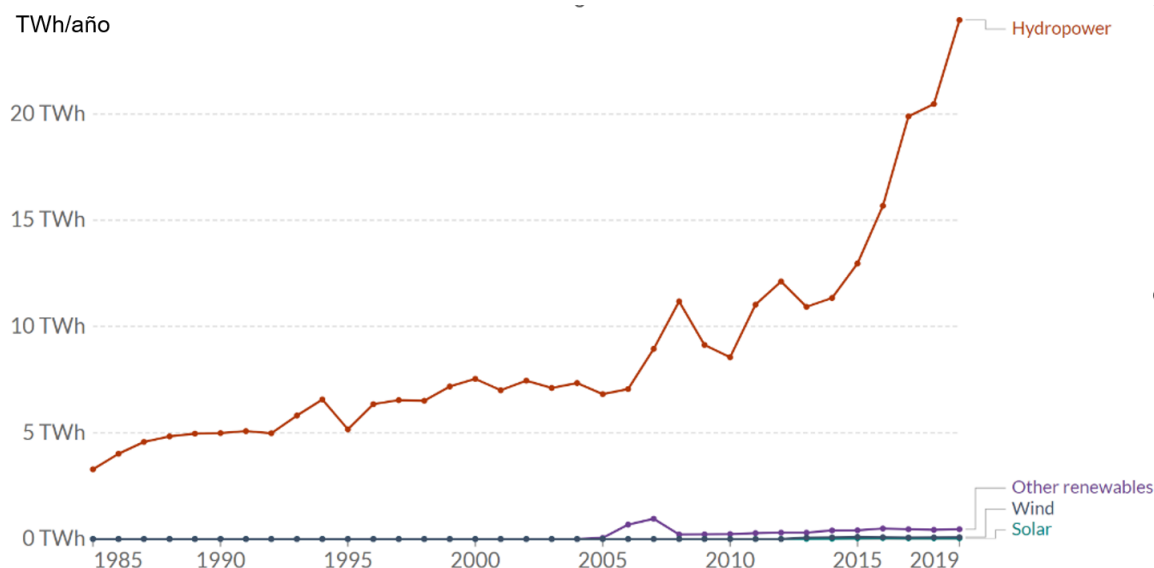


Figura 5. Producción de energía renovable en el 2019 en Ecuador.

Fuente: (Ritchie y Roser, 2020).

Finalmente, otro estudio determina la capacidad hasta el año 2030 de los cinco proyectos hidroeléctricos importantes del Ecuador (Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilaton y Delsintagua). Se proyectó que estas plantas tenían una capacidad inicial de 2 275 MW, sin embargo, la investigación concluye que del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático tres escenarios (A1, B1 y B2) muestran importantes disminuciones de capacidad. Por ejemplo, la línea llamada A1 tiene una reducción hasta 1 839 MW hasta 2050; el escenario B1 se proyecta hasta 1 995 MW; y el escenario conservador B2 hasta 2 104 MW. Concluyendo que en los escenarios A1, B1 y B2 la capacidad de estas plantas disminuirá en 19%, 12% y 8%, respectivamente (Naranjo-Silva y Quimbata, 2022).

De esta forma y a modo de resumir las proyecciones, se encontró que el valor de los servicios eco-

sistémicos disminuyó con la estructura de los proyectos hidroeléctricos; la explotación de fuentes renovables implica la degradación y supresión de los servicios ecológicos, lo que reduce la capacidad del ecosistema para proveer todas sus funciones cuantitativa y cualitativamente, planteando un tema preocupante debido a que la hidroenergía no debe ser promocionada como fuente de energía sostenible (Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2017; Briones-Hidrovo, Uche y Martínez, 2019). Además, los estudios mencionan que la energía hidroeléctrica depende de una ubicación y capacidad estratégicas, pero tiene algunos problemas sociales, ambientales y culturales, ya que desequilibra la vida acuática antes y después del embalse, fragmenta y transforma los ríos, destruye ecosistemas, reduce los recursos pesqueros y a veces utiliza territorios de comunidades lejanas, obligando a esas personas a reubicarse (Voegeli, Hediger y Romero, 2019; Zarfl y col., 2019).

Tabla 3. Proyectos hidroeléctricos de más de 500 MW en Ecuador.

Proyecto	Fase de proyecto	Capacidad [MW]	Energía media [GWh/año]	Patrimonio	Ubicación específica
Santiago	Viabilidad y diseño definitivo	2400	14 613	Morona Santiago	Twinza
Cardenillo	Viabilidad y diseño definitivo	596	3409	Morona Santiago	Méndez
Total		2996	18 022	-	-

5 Discusión

Para lograr la sostenibilidad energética mundial, la energía renovable debe sustituir a la quema de combustibles fósiles (Camayo y col., 2021; García-Parra y col., 2022). Sin embargo, a nivel mundial, la producción hidroeléctrica presenta una visión amplia de las ventajas, y poco se explica sobre las desventajas y problemas, por lo que estudios científicos muestran que la generación hidroeléctrica tiene varias implicaciones en los ecosistemas debido al desarrollo de la gran infraestructura (Naranjo-Silva y J., 2021).

En Ecuador se han desarrollado grandes infraestructuras hidroeléctricas durante 15 años debido a la disponibilidad de agua, pero ¿hasta qué punto es sostenible este uso excesivo del agua? De acuerdo con la IHA, Ecuador ocupó el tercer lugar en el ranking mundial de naciones que agregaron nuevos proyectos de hidroelectricidad el año pasado (International Hydropower Association, 2018b).

Por otra parte, se llevaron a cabo estudios sobre los efectos climáticos y el desarrollo violento de la energía hidroeléctrica; por ejemplo, Lehner, Czisch y Vassolo (2005) estima que el potencial bruto de energía hidroeléctrica disminuirá aproximadamente entre un 6% y un 12% para la década de 2070 en Europa. Las estimaciones en regiones vulnerables o modificadas establecen que, a nivel mundial, se necesita un billón de dólares para compensar el deterioro de los últimos 18 años de generación hidroeléctrica asociada con el cambio climático (Turner, Kim y Edmonds, 2017).

Según Hofstra y col. (2019), el cambio climático plantea una amenaza global para la producción hidroeléctrica y termoeléctrica. A través de la mo-

delación hidrológica acoplada se evalúan opciones para la adaptación sostenible del agua y la energía; para el escenario 2040-2069, el estudio estima una reducción del 61%- 74% en la capacidad utilizable de los proyectos hidroeléctricos y termoeléctricos (Hofstra y col., 2019).

Un análisis en China indica que la hidroenergía es sensible y vulnerable a las fluctuaciones climáticas, siendo la temperatura y la lluvia los factores más importantes; por lo tanto, los fenómenos meteorológicos extremos como la lluvia, las olas de calor, las inundaciones y la sequía imponen desafíos para el desarrollo hidroeléctrico del país, con una mayor capacidad global instalada de 356 GW (año 2020) (Fan y col., 2020).

Los estudios llevados a cabo en India concluyen que todas las cuencas hidrológicas experimentan cambios sustanciales en la precipitación y la temperatura que afectan la disponibilidad de agua para la producción de la energía hidroeléctrica, y se observa un clima más cálido y húmedo en el futuro; por lo tanto, se calcula que la temperatura media anual aumentará entre $18 \pm 14,6\%$ hasta el final del siglo (Ali y col., 2018).

Los resultados de Ecuador mostraron una rápida expansión de la hidroenergía en los últimos años, y hoy en día es la principal fuente de energía, y el escenario medio conservador para 2030 determina una necesidad de 47 TWh para el país. Sin embargo, Escribano (2013), en un análisis de políticas energéticas ecuatorianas, menciona que es evidente que la expansión de la hidroelectricidad enfrenta problemas regulatorios, financieros y sociales, subrayando la seria importancia de realizar un análisis exhaustivo de la red energética relacionada con el desarrollo del país versus la conservación ambiental.

Tabla 4. Escenarios de demanda energética en Ecuador.
Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, 2019).

Año	Baja [GWh]	Medio [GWh]	Alta [GWh]
2020 (Base)	26 727	26 727	26 727
2021	28 037	28 304	28 571
2022	29 410	29 974	30 543
2023	30 852	31 742	32 650
2024	32 363	33 615	34 903
2025	33 949	35 598	37 311
2026	35 613	37 699	39 886
2027	37 358	39 923	42 638
2028	39 188	42 278	45 580
2029	41 108	44 773	48 725
2030	43 123	47 414	52 087
Porcentaje de variación 2020-2027	4,90 %	5,90 %	6,90 %

Además, como se menciona en la sección de proyecciones hidroeléctricas en Ecuador, existe un 22% de capacidad instalada factible con datos de 2021, pero debido a las diferencias de precipitación entre el norte y sur de Ecuador, donde se registran sequías y subproducción hidroeléctrica, respectivamente, es técnicamente complicado materializar proyectos adicionales que requieren análisis robustos además de las constantes variaciones climáticas. Por lo tanto, lograr la capacidad hidroeléctrica total factible dependería de los recursos, lo que significa una inversión que el país no tiene, porque en este momento (corte de diciembre de 2022), la deuda pública es aproximadamente de 73 114 millones de dólares (Llerena-Montoya y col., 2021). Además de los costos económicos como obstáculo para nuevas inversiones en sistemas hidroeléctricos, las áreas técnicas y administrativas por la falta de avance de los estudios finales de factibilidad e ingeniería no permiten el desarrollo específico de este tipo de estructuras que finalmente también tienen repercusiones ambientales en ecosistemas vírgenes que se encuentran en lugares alejados de las principales ciudades.

En un estudio de escenarios energéticos en Ecuador, Villamar2019, Villamar2021 muestra que las influencias del cambio climático estorbarían la capacidad hidroeléctrica para contribuir con el cumplimiento de los objetivos como país para disminuir los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Aunque la hidroenergía

se presenta de manera renovable, muestra impactos ambientales, haciendo de este un subsector de especial consideración para su desarrollo (Chiang y col., 2013). En general, la tendencia mundial es desarrollar más proyectos hidroeléctricos para mitigar la contaminación de los gases de efecto invernadero procedentes de fuentes de generación de combustibles fósiles. Sin embargo, hoy en día, en Ecuador, hay algunos impactos de esta fuente renovable. Sin embargo, hay que considerar que el crecimiento y el suministro de energía requieren un análisis específico de la infraestructura hidroeléctrica. Se espera que los cambios sustanciales en la precipitación y la temperatura a nivel mundial afecten la disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica, haciendo de Ecuador un país vulnerable (Ali y col., 2015; Mousavi, Ahmadizadeh y Marofi, 2018).

Finalmente, este manuscrito presenta un resumen general de la energía hidroeléctrica en Ecuador, sin embargo, sigue siendo solo un ejemplo de un pequeño país en América Latina con una capacidad hídrica sustancial. Para conocer en profundidad las repercusiones de la hidroelectricidad, especialmente a gran escala, se debe obtener más información de países como Brasil, China y Estados Unidos, donde la expansión hidroeléctrica es mayor en cuanto a la capacidad instalada.

6 Conclusiones

La energía hidroeléctrica en el Ecuador ha crecido excesivamente en los últimos años; en 1985, el país generó 4.000 GWh; en 2010 Ecuador aportó alrededor de 8 000 GWh. Para 2020, suministró 24.000 GWh, lo que representó un aumento relativo para 2010-2020 en torno al + 300 %.

Con base en la estimación del Ministerio de Ambiente y Agua de los cambios de temperatura y precipitación, las proyecciones realizadas por la red de energía y las plantas hidroeléctricas del Ecuador están sujetas a incertidumbre. Además, para 2030, el país requerirá el escenario de baja energía, media y alta en alrededor de 43 123 GWh, 47 414 GWh y 52 087 GWh, respectivamente, y la hidroelectricidad seguirá siendo una fuente renovable esencial para el país.

Según las proyecciones para Ecuador hasta 2030, se estableció como escenario principal un crecimiento medio conservador promedio del 5,9% anual de consumo de energía. Pero, independientemente del porcentaje de capacidad hidroeléctrica instalada, en el futuro se necesitará una expansión no necesariamente renovable, lo que podría causar un notorio desequilibrio ambiental.

Ecuador es un ejemplo global de gestión de una red energética con más del 80% de energía hidroeléctrica para el año 2020. Por lo tanto, este desarrollo renovable relaciona el hallazgo de fragilidad con los ecosistemas que rodean los proyectos hidroeléctricos, generando un nuevo problema aparte del efecto del cambio climático.

Las futuras investigaciones podrían analizar la interacción de la hidroenergía con los ecosistemas instalados con modelos de disponibilidad de agua y cambio ambiental. Asimismo, se recomienda desarrollar y aplicar criterios de sostenibilidad a través de una metodología de evaluación climática, económica, ambiental y social para contrarrestar los efectos producidos por los proyectos hidroeléctricos.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Javier Álvarez del Castillo, Director de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad

en Terrassa, España, profesor que me orientó en aspectos de investigación como parte de mi Tesis Doctoral que está relacionada con este manuscrito.

Referencias

- Alarcon, A. (2019). *The hydroelectric plants in Latin America, where are we? and where are we going?*
- Ali, S. y col. (2015). «Twenty first century climatic and hydrological changes over Upper Indus Basin of Himalayan region of Pakistan». En: *Environmental Research Letters* 10.1, 014007. Online: <https://n9.cl/hrz5i>.
- Ali, S. y col. (2018). «Projected increase in hydropower production in India under climate change». En: *Scientific reports* 8.1, 12450. Online: <https://n9.cl/pig3o>.
- Álvarez-Chiriboga, D. (2020). «Modelo de predicción de la producción de energía de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, basado en técnicas de aprendizaje computacional». Tesis de maestría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- BP p.l.c. (2020). *Statistical Review of World Energy. 69th edition*. Online: <https://bit.ly/48x0Uv0>. Inf. téc. BP p.l.c.
- Bakken, T., Å. Killingtveit y K. Alfredsen (2017). «The water footprint of hydropower production—state of the art and methodological challenges». En: *Global Challenges* 1.5, 1600018. Online: <https://n9.cl/vgh0q>.
- Briones-Hidrovo, A., J. Uche y A. Martínez (2017). «Accounting for GHG net reservoir emissions of hydropower in Ecuador». En: *Renewable Energy* 112, 209-221. Online: <https://n9.cl/6cnos>.
- (2019). «Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador». En: *Journal of cleaner production* 233, 33-42. Online: <https://n9.cl/abt1u>.
- (2020). «Determining the net environmental performance of hydropower: A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment». En: *Science of the Total Environment* 712, 136369. Online: <https://n9.cl/o0pdt>.
- CELEC (2020). *CELEC EP genera y transmite más del 90 por ciento de la energía eléctrica limpia que consume el país y exporta a los países vecinos*.

- CISPDR y SENAGUA (2016). *Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador*. CISPDR.
- Cabrera, S. y col. (2021). «Variations in benthic macroinvertebrate communities and biological quality in the Aguarico and Coca river basins in the Ecuadorian Amazon». En: *Water* 13.12, 1692. Online: <https://n9.cl/gkzqz>.
- Camayo, B. y col. (2021). «Autonomous solar thermal system design for indirect dehydration of Aguaymanto (*Physalis Peruviana* L.), Junín». En: *La Granja* 33.1, 114-123. Online: <https://n9.cl/v6zka>.
- Carvajal, P. y col. (2017). «Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador». En: *Climatic Change* 144, 611-624. Online: <https://n9.cl/ow3ag>.
- Carvajal, P. y col. (2019). «Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty: Modelling power sector pathways for Ecuador». En: *Energy Strategy Reviews* 23, 86-99. Online: <https://n9.cl/ul5pv>.
- Chiang, J. y col. (2013). «Potential impact of climate change on hydropower generation in southern Taiwan». En: *Energy Procedia* 40, 34-37. Online: <https://n9.cl/lc2yd>.
- Escribano, G. (2013). «Ecuador's energy policy mix: Development versus conservation and nationalism with Chinese loans». En: *Energy Policy* 57, 152-159. Online: <https://n9.cl/yvgbtp>.
- Fan, J. y col. (2020). «Impacts of climate change on hydropower generation in China». En: *Mathematics and Computers in Simulation* 167, 4-18. Online: <https://n9.cl/3hm24>.
- García-Parra, M. y col. (2022). «Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 46-59. Online: <https://bit.ly/4aUrvUx>.
- Gualpa, M., R. Céleri y P. Crespo (2022). «Efecto del coeficiente teórico de descarga de vertederos sobre la medición de caudales en pequeños ríos Andinos». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 36.2, 75-87. Online: <https://bit.ly/4b3NjN5>.
- Guilcatoma-Aimacaña, V. (2010). «Inventario de las especies vegetales nativas del Cerro Teligote cantón Pelileo, provincia del Tungurahua desde los 3200 hasta los 3420 msnm». Tesis de maestría. Universidad Técnica de Ambato.
- Hasan, M. y G. Wyseure (2018). «Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador». En: *Water Science and Engineering* 11.2, 157-166. Online: <https://n9.cl/z7o9x>.
- Hidalgo, D. y col. (2024). «Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 39.1, [Acceso Temprano]. Online: <http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06>.
- Hofstra, N. y col. (2019). «Editorial overview: Water quality: A new challenge for global scale model development and application». En: *Current opinion in environmental sustainability* 36, A1-A5. Online: <https://n9.cl/37pxz>.
- ICOLD (2019). *General Synthesis of World register of dams*.
- IRENA (2020). «Renewable Energy Statistics 2020». En: International Renewable Energy Agency. Cap. Renewable hydropower (including mixed plants), págs. 16-21.
- (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. International Renewable Energy Agency.
- International Hydropower Association (2018a). *Hydropower Sustainability Assessment Protocol (Vol. 56, Issue 3)*.
- (2018b). *Hydropower Sustainability Guidelines on Good International Industry Practice*.
- (2021). *Hydropower Status Report 2021: Sector trends and insights*.
- International Renewable Energy Agency (2020). *Renewable Energy Capacity Highlights 2019*. Irena, 00(March 2020), 1-3.
- Jin, Y., H. Andersson y S. Zhang (2016). «Air pollution control policies in China: a retrospective and prospects». En: *International journal of environmental research and public health* 13.12, 1219. Online: <https://n9.cl/b4fh9>.
- Killingtveit, Å. (2018). «Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues». En: International Renewable Energy Agency. Cap. Hydropower, págs. 265-315.
- Lehner, B., G. Czisch y S. Vassolo (2005). «The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis». En: *Energy Policy* 33.7, 839-855. Online: <https://n9.cl/q63q3>.
- Llamas, C. y B.K. Sovacool (2021). «The future of hydropower? A systematic review of the drivers, benefits and governance dynamics of transboundary dams». En: *Renewable and Sus-*

- tainable Energy Reviews 137.0327, 110-124. Online: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110495>.
- Llerena-Montoya, S. y col. (2021). «Multitemporal analysis of land use and land cover within an oil block in the Ecuadorian Amazon». En: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10.3, 191. Online: <https://n9.cl/arbzn>.
- Lu, S. y col. (2020). «A review of the impact of hydropower reservoirs on global climate change». En: *Science of the Total Environment* 711, 134996. Online: <https://n9.cl/bs7su>.
- MERNNR (2018). *National Energy Efficiency Plan. 2018*. Online: <https://bit.ly/48yZj7Q>. Inf. téc. BP p.l.c.
- Mena-Vasconez, P. (2018). «Biodiversity Ecuador». p. 16.
- Ministerio de Energía y Recursos No Renovables (2019). *Plan Maestro de Electricidad*.
- Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Trancisión ecológica (2019). *First Contribution Determined at the National Level to the Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Mousavi, Roya Sadat, Mojtaba Ahmadizadeh y Saffar Marofi (2018). «A multi-GCM assessment of the climate change impact on the hydrology and hydropower potential of a semi-arid basin (A case study of the Dez Dam Basin, Iran)». En: *Water* 10.10, pág. 1458.
- Naranjo-Silva, S. y Álvarez. J. (2021). «Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this clean source». En: *Ciencia América* 10.2, 32-45. Online: <https://n9.cl/arwut>.
- Naranjo Silva, S., D. Punina y J. Morales (2021). «Energía solar en paradas de bus una aplicación moderna y vanguardista». En: *Revista Ingeniería* 4.1, 58-68. Online: <https://n9.cl/0t8k5>.
- Naranjo-Silva, S. y O. Quimbita (2022). «Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador». En: *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad* 5, 268. Online: <https://n9.cl/9e0a3>.
- Naranjo Silva, Sebastian y J. Álvarez (2021). «An approach of the hydropower: Advantages and impacts. A review». En: *Journal of Energy Research and Reviews* 8.1, 10-20. Online: <https://n9.cl/dfnky>.
- Parra, R. (2020). «Contribution of Non-renewable Sources for Limiting the Electrical CO2 emission factor in Ecuador». En: *WIT Trans. Ecol. Environ* 244, 65-77. Online: <https://n9.cl/xohgi>.
- Ponce-Jara, M. y col. (2018). «Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade». En: *Energy Policy* 113, 513-522. Online: <https://n9.cl/5nmoyw>.
- Purcell, T. y E. Martínez (2018). «Post-neoliberal energy modernity and the political economy of the landlord state in Ecuador». En: *Energy Research & Social Science* 41, 12-21. Online: <https://n9.cl/pw5afo>.
- Regional Energy Integration Commission of South America (2021). *Energy publications of South America*.
- Ritchie, H. y M. Roser (2020). *Renewable Energy - Our world in data*.
- Schaeffli, B. (2015). «Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments». En: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2.4, 271-289. Online: <https://n9.cl/dl2oi>.
- Tang, W., Z. Li e Y. Tu (2018). «Sustainability risk evaluation for large-scale hydropower projects with hybrid uncertainty». En: *Sustainability* 10.1, 138. Online: <https://n9.cl/r2qiz>.
- Teräsväinén, T. (2019). «Negotiating water and technology—Competing expectations and confronting knowledges in the case of the Coca Codo Sinclair in Ecuador». En: *Water* 11.3, 411. Online: <https://n9.cl/gmdeg>.
- Turner S. and Hejazi, M., L. Kim S. and Clarke y J. Edmonds (2017). «Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs». En: *Energy* 141, 2081-2090. Online: <https://n9.cl/hvuq4>.
- Vaca-Jiménez, S., P. Gerbens y S. Nonhebel (2020). «The monthly dynamics of blue water footprints and electricity generation of four types of hydropower plants in Ecuador». En: *Science of The Total Environment* 713, 136579. Online: <https://n9.cl/cu5bj>.
- Van Vliet, M. y col. (2016). «Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources». En: *Nature Climate Change* 6.4, 375-380. Online: <https://n9.cl/4387x>.
- Voegeli, G., W. Hediger y F. Romerio (2019). «Sustainability assessment of hydropower: Using causal diagram to seize the importance of impact pathways». En: *Environmental Impact Assessment Review* 77, 69-84. Online: <https://n9.cl/bk2hd>.

Zarfl, C. y col. (2019). «Future large hydropower dams impact global freshwater megafauna». En: *Scientific reports* 9.1, 18531. Online:<https://n9.cl/aml8v>.

Zhong, R. y col. (2019). «Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: A case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong». En: *Energy* 179, 685-696. Online:<https://n9.cl/400jc>.