



# *Análisis de la producción hidroeléctrica en base a las implicaciones en la sostenibilidad energética*

**Héctor Sebastián Naranjo Silva**

**ADVERTIMENT** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**

---

**Escola de Doctorat**

**Programa de Doctorado en Sostenibilidad**  
**Instituto de Sostenibilidad**

Tesis Doctoral

Análisis de la producción hidroeléctrica en base a las implicaciones en la  
sostenibilidad energética



**Héctor Sebastián Naranjo Silva. MSc.**

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

Director de tesis: **Javier Álvarez del Castillo. PhD.**

<https://orcid.org/0000-0002-6428-8467>

Año: 2023

## Índice de Contenido

|   |    |
|---|----|
| Capítulo I.....   | 9  |
| 1. Objetivos y Contribución de la Tesis al Estado del Arte .....                  | 9  |
| 1.1 Objetivo General (OG) .....   | 9  |
| 1.2 Objetivos Específicos (OEs) .....   | 9  |
| 1.3 Justificación de la Investigación .....                                       | 9  |
| 1.4 Planteamiento del problema y postulados .....                                 | 11 |
| Capítulo II.....  | 14 |
| 2. Estado del Arte .....  | 14 |
| 2.1 Hidroelectricidad y sus impactos .....  | 17 |
| 2.1.1 La hidroelectricidad: Mitigación y adaptación al cambio climático .....     | 35 |
| 2.2 La hidroelectricidad en el mundo (Contexto global).....                       | 41 |
| 2.3 Políticas de desarrollo e hidroelectricidad.....                              | 46 |
| 2.4 Metas de la hidroelectricidad .....   | 48 |
| 2.5 Relación de las variables y fenómenos .....                                   | 50 |
| Capítulo III.....   | 52 |
| 3. Descripción de la Metodología .....  | 52 |
| 3.1 Tipo de investigación .....   | 52 |
| 3.2 Estrategia metódica .....   | 53 |
| 4.3 Técnicas implementadas.....   | 54 |
| Capítulo IV .....   | 56 |
| 4. Del Estado del Arte a la Tesis Doctoral .....                                  | 56 |
| Capítulo V .....  | 64 |
| 5. Análisis y Discusión .....   | 64 |
| 5.1 Encuestas para el levantamiento de información y perspectivas .....           | 65 |
| 5.2 Análisis físico químico del recurso hídrico en proyectos hidroeléctricos..... | 80 |
| 5.3 Análisis del Ecuador (Variables relacionadas a la hidroelectricidad).....     | 94 |
| 5.3.1. Huella hídrica (Uso de agua por kWh) .....                                 | 95 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.2. Eficiencia (Factor de planta o potencia).....                        | 103 |
| 5.3.3. Costo de centrales hidroeléctricas.....                              | 108 |
| 5.4 Modelación proyectada y planificación hidroeléctrica para Ecuador ..... | 112 |
| 5.5 Relación entre la Hidroelectricidad y la Sostenibilidad .....           | 127 |
| 5.6. Relación de resultados, objetivos planteados y actividades .....       | 149 |
| Capítulo VI .....   | 151 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones.....                                      | 151 |
| 6.1 Conclusiones .....  | 151 |
| 6.2 Recomendaciones.....  | 152 |
| 6.3 Próximos trabajos y líneas de investigación.....                        | 153 |
| Referencias bibliográficas .....  | 154 |
| Anexos .....  | 171 |
| Anexo nro. 1. ....  | 171 |
| Producción científica desarrollada con la Tesis.....                        | 171 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Objetivos alienados de la Agenda para el Desarrollo Sostenible.....                     | 12 |
| Tabla 2. Fuentes editoriales científicas .....   | 16 |
| Tabla 3. Fuentes editoriales científicas útiles para el estudio.....                             | 17 |
| Tabla 4. América: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente ..... | 20 |
| Tabla 5. Asia: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente.....     | 23 |
| Tabla 6. Europa: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente.....   | 27 |
| Tabla 7. África: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente .....  | 32 |
| Tabla 8. Potencial de energías renovables en Mozambique.....                                     | 38 |
| Tabla 9. Principales hidroeléctricas mundialmente .....  | 44 |
| Tabla 10. Consideraciones del premio Blue Planet para el desarrollo hidroeléctrico.....          | 49 |
| Tabla 11. Metodología investigativa.....   | 52 |
| Tabla 12. Técnicas implementadas.....  | 55 |
| Tabla 13. Ventas y desventajas de la hidroelectricidad .....                                     | 58 |
| Tabla 14. Propuesta investigativa .....  | 64 |
| Tabla 15. Datos poblacionales de las comunidades.....  | 66 |
| Tabla 16. Cálculo de la muestra.....   | 67 |
| Tabla 17. Preguntas desarrolladas en la encuesta .....   | 68 |
| Tabla 18. Factores y hallazgos observados por los encuestados .....                              | 75 |
| Tabla 19. Factores y hallazgos negativos observados por los encuestados.....                     | 76 |
| Tabla 20. Factores negativos consolidados de los encuestados .....                               | 77 |
| Tabla 21. Parámetros a medir en muestras de agua.....  | 81 |
| Tabla 22. Características de las centrales hidroeléctricas analizadas .....                      | 83 |
| Tabla 23. Muestras recolectadas de agua.....   | 85 |
| Tabla 24. Resultados físico químico de contraste del recurso hídrico .....                       | 86 |
| Tabla 25. Tabulación diferencial de los datos recolectados.....                                  | 89 |
| Tabla 26. Diferencia por parámetro de salida y entrada en orden descendente.....                 | 90 |
| Tabla 27. Potencia y uso bruto promedio de agua en las hidroeléctricas del Ecuador.....          | 95 |
| Tabla 28. Uso neto hidroeléctrico en centrales hidroeléctricas de Ecuador.....                   | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 29. Uso promedio neto de agua en las hidroeléctricas del Ecuador .....                      | 97  |
| Tabla 30. Uso promedio de agua en diversas estaciones .....                                       | 98  |
| Tabla 31. Uso promedio de agua de centrales hidroeléctricas globales .....                        | 99  |
| Tabla 32. Uso promedio de agua en Etiopía y Noruega.....  | 100 |
| Tabla 33. Huella hídrica de la hidroelectricidad en Europa.....                                   | 101 |
| Tabla 34. Resumen global de la huella hídrica hidroeléctrica .....                                | 101 |
| Tabla 35. Factor de potencia de las centrales hidroeléctricas en Ecuador .....                    | 104 |
| Tabla 36. Factor de planta ordenado de las hidroeléctricas en Ecuador .....                       | 105 |
| Tabla 37. Variaciones de temperatura y precipitación en Ecuador .....                             | 105 |
| Tabla 38. Factor de planta hidroeléctrica globalmente .....                                       | 106 |
| Tabla 39. Factor de planta hidroeléctrico promedio (2010-2015 versus 2016-2020) .....             | 106 |
| Tabla 40. Factor de planta y uso de agua en las hidroeléctricas de Ecuador.....                   | 107 |
| Tabla 41. Costo e inversión de centrales hidroeléctricas en Ecuador.....                          | 108 |
| Tabla 42. Inversión promedio y por percentil en relación a la capacidad específica .....          | 110 |
| Tabla 43. Comparación de costos de las centrales hidroeléctricas en Ecuador.....                  | 111 |
| Tabla 44. Comparación costo y potencia promedio de las 5 hidroeléctricas en Ecuador.....          | 111 |
| Tabla 45. Primera estrategia del sector energético de la NDC del Ecuador.....                     | 113 |
| Tabla 46. Proyectos hidroeléctricos emblemáticos determinados en la NDC Ecuador .....             | 114 |
| Tabla 47. Escenarios de cambio climático según el IPCC. ....                                      | 115 |
| Tabla 48. Producción de energía hidroeléctrica en Ecuador [MWh]. ....                             | 116 |
| Tabla 49. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario A1. .... | 117 |
| Tabla 50. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario B1. .... | 117 |
| Tabla 51. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario B2. .... | 117 |
| Tabla 52. Factor de potencia hidroeléctricas del Ecuador período 2010–2020 [%] .....              | 123 |
| Tabla 53. Variaciones del factor de potencia ecuatoriano al 2050 .....                            | 126 |
| Tabla 54. Clasificación por capacidad de cada proyecto hidroeléctrico .....                       | 133 |
| Tabla 55. Modelos de planificación energética y evaluación integrada.....                         | 136 |
| Tabla 56. Comparaciones energéticas .....   | 143 |

## Índice de Ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1. Capacidad hidroeléctrica instalada en el mundo .....                             | 14 |
| Ilustración 2. Generación hidroeléctrica global en el 2020 [TWh].....                           | 15 |
| Ilustración 3. Enfoque temático del estado del arte.....  | 17 |
| Ilustración 4. Países analizados con estudios científicos de la producción hidroeléctrica ..... | 19 |
| Ilustración 5. Relación de los impactos negativos en la producción hidroeléctrica .....         | 34 |
| Ilustración 6. Modelos de sistemas de energía RCP 8.5 y RCP 4.5.....                            | 36 |
| Ilustración 7. Localización del río Kaoping de Taiwán .....                                     | 37 |
| Ilustración 8. Ubicación cuenca del río Nanlijiang en China .....                               | 39 |
| Ilustración 9. Seis principales cuencas del Ecuador y su potencial hidroeléctrico [GW].....     | 40 |
| Ilustración 10. Diez países con mayor capacidad hidroeléctrica en 2021.....                     | 42 |
| Ilustración 11. Represas hidroeléctricas en construcción y planificadas para el 2030.....       | 43 |
| Ilustración 12. Crecimiento hidroeléctrico mundial período (2000-2021) en [TWh].....            | 45 |
| Ilustración 13. Relación entre hidroelectricidad, políticas de desarrollo y gobernanza.....     | 48 |
| Ilustración 14. Relación hidroelectricidad, agua, energía y sostenibilidad .....                | 57 |
| Ilustración 15. Ubicación comunidades El Chaco, San Luis, San Carlos, Lumbaqui.....             | 65 |
| Ilustración 16. Estructura de las obras de la Central Coca Codo Sinclair (CCS).....             | 65 |
| Ilustración 17. Clasificación de preguntas por temas .....                                      | 70 |
| Ilustración 18. Edad y género de los encuestados (Preg. 1).....                                 | 70 |
| Ilustración 19. Formación de los encuestados en las comunidades (Preg. 2).....                  | 71 |
| Ilustración 20. Área de intervención.....   | 71 |
| Ilustración 21. Planes o proyectos establecidos .....   | 72 |
| Ilustración 22. Apoyo a las comunidades.....  | 73 |
| Ilustración 23. Parámetros sociales .....   | 74 |
| Ilustración 24. Aspectos ambientales .....  | 74 |
| Ilustración 25. Observaciones negativas ambientales (12).....                                   | 75 |
| Ilustración 26. Proyectos hidroeléctricos en Ecuador, Uruguay y Argentina para análisis.....    | 82 |
| Ilustración 27. Ejemplo de muestreo en hidroeléctrica Hidroagoyan - Ecuador.....                | 82 |
| Ilustración 28. Central hidroeléctrica Salto Grande - Argentina & Uruguay .....                 | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 29. Central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair - Ecuador .....                 | 87  |
| Ilustración 30. Embalse compensador Coca Codo Sinclair – Ecuador.....                     | 87  |
| Ilustración 31. Represa y Central de la hidroeléctrica Hidroagoyan - Ecuador .....        | 88  |
| Ilustración 32. Hidroeléctrica Baba - Ecuador.....  | 88  |
| Ilustración 33. Parámetros principales con desviaciones.....                              | 90  |
| Ilustración 34. Principales cuencas y estaciones hidroeléctricas de Ecuador .....         | 94  |
| Ilustración 35. Análisis para el Ecuador .....  | 95  |
| Ilustración 36. Principales centrales hidroeléctricas de Ecuador.....                     | 97  |
| Ilustración 37. Proyectos hidroeléctricos analizados .....                                | 99  |
| Ilustración 38. Costo promedio de instalación hidroeléctrica por KW.....                  | 110 |
| Ilustración 39. Estaciones meteorológicas ecuatorianas .....                              | 124 |
| Ilustración 40. Energía hidráulica neta entregada por mes en Ecuador .....                | 125 |
| Ilustración 41. Escenarios hidroeléctricos de eficiencia ecuatoriana hasta 2050.....      | 125 |
| Ilustración 42. Variables de la Guía para el desarrollo Hidroeléctrico Sostenible.....    | 131 |
| Ilustración 43. Periodicidad de las acciones.....   | 132 |
| Ilustración 44. Parámetros y variables de la Guía Operacional.....                        | 132 |
| Ilustración 45. Modelos energéticos y sistemas climáticos .....                           | 134 |
| Ilustración 46. Estimación emisiones de GEI durante el ciclo de varias fuentes.....       | 141 |
| Ilustración 47. Criterios del impacto hidroeléctrico aparente .....                       | 141 |
| Ilustración 48. Oxigenación agua (Sistema de recuperación características hídricas) ..... | 147 |
| Ilustración 49. Relación de resultados, y variables .....                                 | 150 |



## Índice de Ecuaciones

|                  |     |
|------------------|-----|
| Ecuación 1.....  | 45  |
| Ecuación 2.....  | 45  |
| Ecuación 3.....  | 66  |
| Ecuación 4.....  | 88  |
| Ecuación 5.....  | 101 |
| Ecuación 6.....  | 102 |
| Ecuación 7.....  | 104 |
| Ecuación 8.....  | 104 |
| Ecuación 9.....  | 109 |
| Ecuación 10..... | 141 |

## Índice de Notas

|   |     |
|---|-----|
| Nota 1. The American Continent Hydropower Development and The Sustainability: A Review. ....  | 33  |
| Nota 2. Hydropower Development in Three South American Countries: Brazil, Colombia, and Ecuador ..  | 33  |
| Nota 3. Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this "clean" source. ....  | 35  |
| Nota 4. An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review.....  | 62  |
| Nota 5. Memorias de Congreso. ISSN 2706-3674 (Digital Proceedings), July 24 – 28, 2022. 3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. .... | 80  |
| Nota 6. Analysis of Water Characteristics by the Hydropower Use (Up-Stream and Downstream): A Case of Study at Ecuador, Argentina, and Uruguay.....   | 93  |
| Nota 7. A physical-chemical study of water resources in 5 hydropower projects. ....   | 93  |
| Nota 8. Comparative cost per kilowatt of the latest hydropower projects in Ecuador.....   | 112 |
| Nota 9. Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador.....  | 120 |
| Nota 10. Hydropower Scenarios in the Face of Climate Change in Ecuador.....   | 127 |

# Capítulo I

- a) Sin ciencia, desarrollo e investigación no existirá un mejor futuro. (El Investigador).
- b) El agua es vida, es un recurso sensible, necesario, finito y la sostenibilidad es ineludible para usarla responsablemente. (El Investigador)

**Tema:** Análisis de la producción hidroeléctrica en base a las implicaciones en la sostenibilidad energética

## 1. Objetivos y Contribución de la Tesis al Estado del Arte

### 1.1 Objetivo General (OG)

Analizar la producción hidroeléctrica global bajo un enfoque de sostenibilidad.

### 1.2 Objetivos Específicos (OEs)

#### A nivel regional

OE 1. Identificar los parámetros sociales, ambientales y técnicos que intervienen en la producción de la energía hidroeléctrica mundial.

OE 2. Establecer un instrumento de evaluación de los proyectos hidroeléctricos bajo una dimensión técnica, económica y social buscando la correlación entre ellas.

OE 3. Realizar un análisis crítico y de evaluación de la sostenibilidad hidroeléctrica para desarrollar ámbitos de conocimiento, contextos académicos, profesionales de avance científico y social dentro de una sociedad globalizada con poca conciencia ambiental.

#### A nivel local

OE 4. Analizar la percepción de las poblaciones aledañas a los proyectos hidroeléctricos del Ecuador, así como la expansión de la producción hidroeléctrica a largo plazo con posibles escenarios.

### 1.3 Justificación de la Investigación

La Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) mediante su Programa de Doctorado en Sostenibilidad enuncia que el objetivo y retos actuales de la sostenibilidad es el análisis del “...*agotamiento, distribución y gestión de los recursos naturales, incluidos los energéticos e hídricos, los impactos del cambio climático y los mecanismos de adaptación y mitigación, la modelización de los sistemas socio ambientales y evaluación de su evolución y desarrollo...*” (Universidad Politécnica de Cataluña, 2019).

Como enuncia la Universidad, el uso muchas veces irracional e insostenible de los recursos naturales, deforestación a gran escala, niveles excesivos de contaminación del aire y agua, alteración irreversible de ciertos ecosistemas son factores que amenazan crecientemente el delicado equilibrio ecológico, cultural y social de las regiones a nivel mundial permitiendo establecer un marco analítico de exploración para el bien global como, por ejemplo, áreas tropicales donde se modifica ecosistemas para producir hidroelectricidad.

Al respecto, modelar escenarios con medidas de control del impacto ambiental, crecimiento controlado de las actividades productivas y desarrollo energético sostenible es necesario, pese que no siempre existen actividades de este tipo o son poco efectivas como se demostrará en la investigación, por lo cual, en el mismo objetivo de la UPC se menciona que *“...La ciencia y tecnología de la sostenibilidad es un campo de investigación con una gran capacidad interdisciplinaria, que permite la integración de muchas disciplinas. Nos ofrece la oportunidad de hacer contribuciones originales, no sólo en la comprensión y resolución de los problemas que condicionan el bienestar y desarrollo de pueblos y sociedades...”* (Universidad Politécnica de Cataluña, 2019).

En tanto, si la Universidad Politécnica de Cataluña menciona la necesidad de gestionar y distribuir convenientemente los recursos hídricos en base a la mitigación y adaptación del cambio climático, es preciso generar investigaciones de este tipo para fomentar la sostenibilidad de los recursos mediante datos, hechos e información que mejoren el aprovechamiento hidroeléctrico con modelaciones que contengan criterios técnicos, y así, comprobar las hipótesis de manera interdisciplinaria.

Por otra parte, relacionando y definiendo la sostenibilidad, Xun Zeng (2022) determina que *“La sostenibilidad sigue siendo una idea normativa eficaz que promueve relaciones mutuamente beneficiosas para la sociedad y el medio ambiente.”* Además, el desarrollo sostenible *“...se refiere al progreso a largo plazo que satisface los deseos humanos y mejora su calidad de vida. Al mismo tiempo, los recursos naturales deben utilizarse con una frecuencia y un grado compatibles con el potencial regenerativo del ecosistema.”* (Zeng et al., 2022), de ahí que, la hidroelectricidad actualmente requiere de estudios cuya finalidad garantice la sostenibilidad energética debido a las diversas modificaciones naturales que se realizan.

En consecuencia, el presente proyecto investigativo tiene como objeto mejorar las decisiones de inversión en los proyectos hidroeléctricos nuevos o existentes, de ahí que generará un **impacto positivo** al ambiente y sociedad, además, al analizar los sistemas y estándares de producción hidroenergética **se favorece** al ámbito gubernamental siendo críticos con conocimiento de las afectaciones y metas de esta fuente “renovable”.

Adicionalmente, la tesis tiene una factibilidad **amplia** porque gestiona variables de acceso público relacionadas a la producción hidroeléctrica, costos de inversión, eficiencia, huella hídrica y potencia generada entre otros datos, además, la investigación tendrá criterios del uso irracional del agua y cauces naturales, basada en desarrollar nuevos conceptos que amplíen las fronteras del conocimiento, a través de un estudio **original** sobre las afectaciones que sufre la hidroelectricidad en las condiciones actuales del

planeta.

Finalmente, **la importancia** de la tesis es alta porque establece vínculos entre la hidroelectricidad, sostenibilidad, recursos naturales utilizados, medio ambiente, infraestructura y análisis de la calidad del agua proponiendo mejoras.

#### 1.4 Planteamiento del problema y postulados

Las transformaciones técnicas, ecológicas, territoriales y culturales en diferentes niveles y espacios de la sociedad donde existen proyectos hidroeléctricos a menudo implican conflictos, nuevos regímenes de conocimiento, prácticas locales diferentes, marcos globales de mitigación y, gestión de recursos hídricos (Teräväinen, 2019).

El hecho de que la hidroelectricidad no dependa del uso de combustibles fósiles no debe relacionar que no tiene efectos adversos sobre el ambiente; las energías llamadas "limpias" nunca son limpias cuando se producen en gran escala ni cuando producen un cambio drástico, por el contrario, tienen graves impactos en vidas humanas y ecosistemas naturales, muchas veces irreversibles (Crónicas del despojo, 2013).

Según los estudios que se nombrarán en el estado del arte, la producción de hidroelectricidad a nivel mundial en el ámbito energético tiene una relación directa con la sostenibilidad, de ahí surge el planteamiento del problema investigativo:

¿Bajo qué condiciones y parámetros es sostenible la hidroelectricidad por los cambios globales climáticos, sobre uso de recursos hídricos, movimiento de poblaciones y afectaciones a ecosistemas aledaños?

Con este problema definido, la investigación formula varios postulados e hipótesis que se desarrollarán, por lo tanto, el primer postulado es:

**H1: El análisis de la producción hidroeléctrica resulta fundamental para considerar la dimensión de sostenibilidad en torno a la expansión energética e infraestructuras a gran escala.**

La hidroelectricidad se basa en el desarrollo y construcción de represas, centrales de gran envergadura, infraestructura de concreto, además de apertura de carreteras, canales hídricos, ductos, torres eléctricas de transmisión y demás instalaciones que no son una novedad, pero que si ubican particularidades, beneficios y desventajas que caracterizan el proceso como:

- Los grandes proyectos hidroeléctricos necesitan de infraestructura amplia que muchas veces no se sustentan en planes de expansión territorial ni de compensación social y ambiental (Hanna et al., 2016).
- En países en vías de desarrollo que buscan aumentar su matriz energética con planes de expansión hidroeléctrica masiva y a gran escala se generan cambios bruscos sin analizar el apoyo social, ambiental o cultural necesario para producir electricidad sostenible (Dorber et al., 2020).

Sobre las consideraciones anteriores, es relevante mencionar que no existe literatura que cuantifique específicamente, sustente robustamente o documente estos impactos y que los proyectos hidroeléctricos en pocas ocasiones son propiciados por poblaciones de esas áreas debido a los cambios que implican (Turner, Jia, et al., 2017); al respecto contrastar la calidad y características del recurso hídrico antes y después de su uso es pertinente, de ahí que, se establece el segundo postulado:

**H2: Existe diferencia en las características y calidad del recurso hídrico por el paso de agua, antes y después de una central hidroeléctrica.**

Una parte de la mitigación del cambio climático global es el desarrollo de energías renovables en base a inversión, convenios, normativa e instrumentos en búsqueda de sostenibilidad, en este contexto, es relevante nombrar la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en el año 2015 la Asamblea General de la Organización de Naciones Unidas (ONU) adoptó la Agenda como plan de acción a favor de las personas, el planeta y prosperidad con la intención de reconocer en base a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2009; IPCC -ONU, 2019), en este plan se tiene 17 objetivos y entre los relacionados a este tema de tesis se tienen los siguientes:

Tabla 1. Objetivos alienados de la Agenda para el Desarrollo Sostenible

| ODS y Temática  | Relevancia   |
|---|--|
| 7<br>Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. | La energía significa desarrollo, es necesaria y su sostenibilidad debe ser asegurada con el cuidado de recursos naturales pertinente en las renovables y no renovables (sistemas de generación eléctrica).   |
| 12<br>Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.                           | La producción sostenible consiste en fomentar el uso eficiente de recursos y energía, pero sin un análisis adecuado del cual se conozca la afectación por la sobre explotación hidroeléctrica la sostenibilidad pierde fuerza.   |
| 13<br>Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.             | El cambio climático afecta a todos los países, produciendo un impacto negativo en su economía, sino se analizan las repercusiones en los proyectos hidroeléctricos que alteran ecosistemas se proyecta un impacto perjudicial para áreas ricas en recursos hídricos, fauna y flora donde existen estas infraestructuras. |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (IPCC -ONU, 2019).

Como se muestra existen instrumentos que buscan la producción eléctrica mediante fuentes renovables sostenibles, pero, la hidroelectricidad enfrenta varios problemas como la calidad variable del agua por su sobre uso, estrés hídrico a caudales modificados, falta de oxígeno por estancamiento en embalses y otros efectos negativos que se verificarán, por lo tanto, se define un tercer postulado investigativo de la siguiente manera:

**H3: La sostenibilidad debe considerar el uso consciente hídrico en la producción hidroeléctrica teniendo en cuenta las expectativas de los diferentes actores que intervienen en su desarrollo.**

Dicho postulado se establece sobre el análisis que:

- La infraestructura para la producción hidroeléctrica necesaria en varios países se encuentra en áreas rurales donde habitan poblaciones campesinas, indígenas o pequeños agricultores que generalmente son económicamente vulnerables, donde el grado de marginación social, ambiental y económica es marcado, instalaciones hidroeléctricas implican una afectación alta desde el movimiento de poblaciones hasta el cambio de modo de vida de la localidad aledaña que pocas veces es tomado en cuenta y que son parte del contexto (Spalding-Fecher et al., 2016).

## Capítulo II

### 2. Estado del Arte

La hidroelectricidad es una fuente renovable, la cual se deriva de la energía potencial del agua en movimiento, al año 2021 existen alrededor de 14,000 proyectos en actividad como una tecnología ampliamente utilizada; en el año 2020, un total de 180 países en el mundo reportaron beneficiarse (International Commission on Large Dams, 2021; Llamosas & Sovacool, 2021).

La energía hidroeléctrica se encuentra entre las tecnologías más eficientes renovables, con una eficiencia típica del 55% al 80%, es competitiva en costos y es la única fuente renovable que produce electricidad a un costo igual o menor, en comparación con la energía térmica como el carbón, petróleo o gas en el rango de USD 4 – 5 centavos de dólar americanos por kilovatio hora (Killingtveit, 2019). A continuación, la capacidad hidroeléctrica global al año 2021 con 1,360 [GW] y los principales actores por país según la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA por sus siglas en inglés).

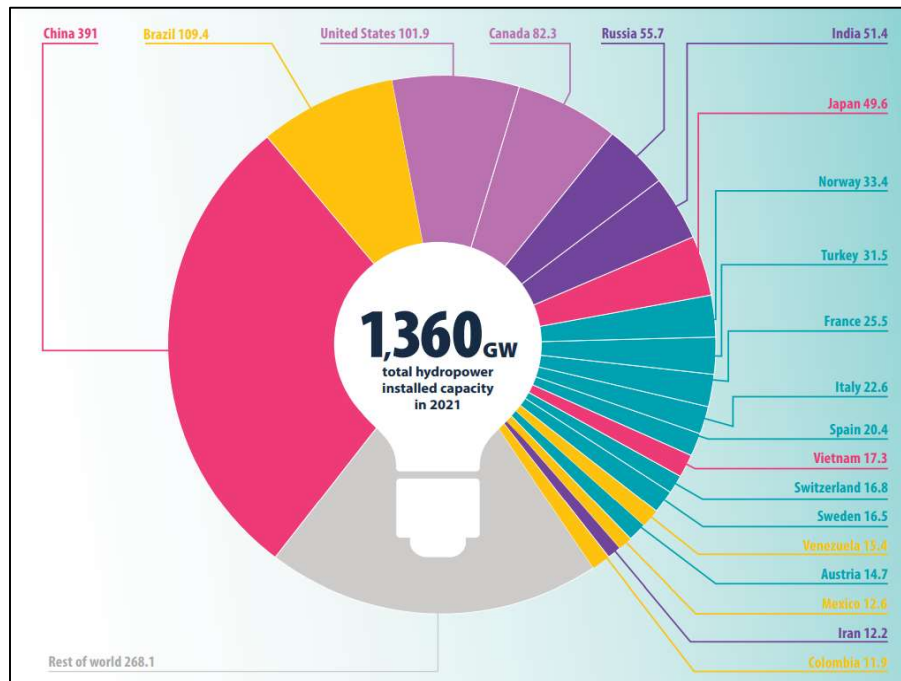


Ilustración 1. Capacidad hidroeléctrica instalada en el mundo

Fuente: (International Hydropower Association, 2022)

Pero, a pesar de su carácter “renovable”, la hidroelectricidad presenta impactos ambientales que producen su aprovechamiento, así como las limitaciones de factibilidad económica, volviendo a la hidroenergía un subsector de especial atención para su desarrollo en forma sostenible (Chiang et al., 2013).

Estudios presentan a la energía hidroeléctrica como una fuente de energía limpia y de las principales en el mundo, sin embargo, existen afectaciones sociales, ambientales y técnicas asociadas con el aprovechamiento (Daniel & Gaviria, 2018). A continuación, el despliegue energético global por país en [TWh] en la siguiente ilustración:

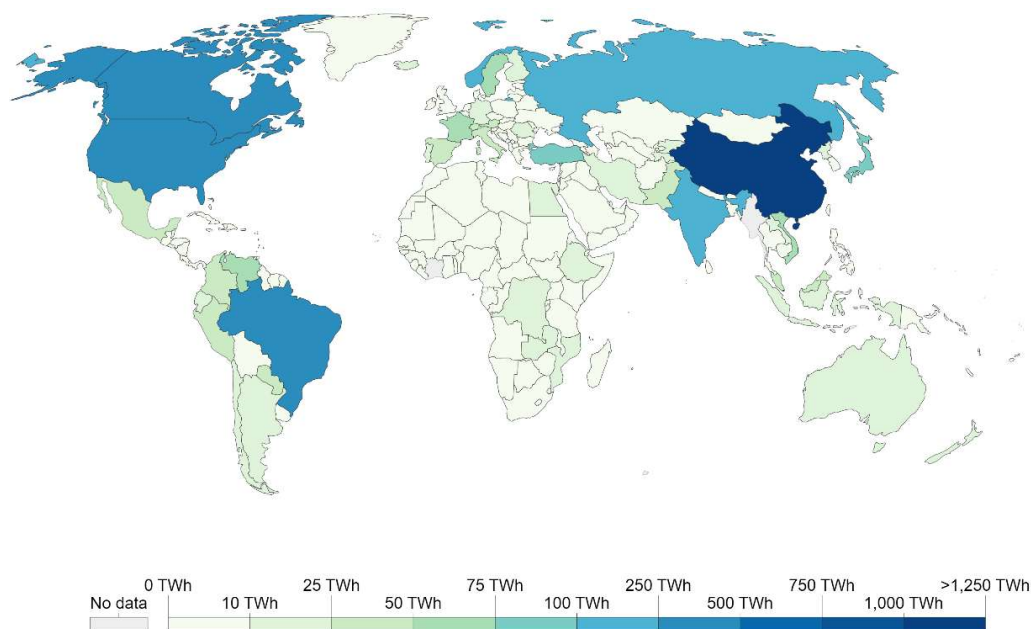


Ilustración 2. Generación hidroeléctrica global en el 2020 [TWh]

Fuente: (Ritchie & Roser, 2022).

A efectos de esto, la hidroelectricidad es la única tecnología renovable que tiene una interacción fuerte y vinculante con el entorno, haciendo especial la necesidad de una evaluación integral (Briones Hidrovo et al., 2020), por lo cual, la hidroenergía puede ser desplazada por otros sistemas de generación para construir resiliencia y diversificación en las redes eléctricas (Tarroja et al., 2016).

Por otro lado, según lo investigado, la clave del recurso para la generación hidroeléctrica es la escorrentía que depende de la precipitación, pero, el clima futuro es incierto y, por lo tanto, plantea un alto riesgo para esta renovable (Hamududu & Killingtveit, 2012).

Al respecto, globalmente se han generado varios documentos entre protocolos, guías, manuales y estudios que buscan orientar los impactos de la hidroelectricidad, en consecuencia, en un mundo de tecnología, conocimiento y cambios constantes existen reflexiones y abordajes de cada tema de manera multi diversa; en el siguiente análisis se desarrollan y estudian teorías e investigaciones ejecutadas con el fin de evaluar el estado de arte de manera robusta, en el cual, se reflexione sobre la producción sostenible hidroeléctrica, por tal motivo, se verifican fuentes de información científica, evaluando editoriales formales para seleccionar mediante criterios de pertinencia artículos que sirven de referencia.

Al respecto como el tema de tesis pretende "*analizar la producción hidroeléctrica bajo un enfoque de sostenibilidad*" evalúa la dimensión social, ambiental, económica y técnica de la producción hidroeléctrica



con palabras clave que consolidan y abarcan dentro de su contexto las dimensiones establecidas y sus derivaciones, así se seleccionó palabras como 'sostenibilidad', 'sostenible', 'políticas' e 'impactos'. Si bien, los documentos referenciales pueden ser amplios, también al determinar palabras como impactos y políticas se busca conocer el comportamiento de esta fuente renovable con estudios semejantes como antecedentes inmediatos de esta investigación, es decir se apoya la investigación en hallazgos hasta el momento para mostrar donde nace la novedad de este documento desde el punto de vista del problema de investigación como de los resultados. Seguido las fuentes editoriales evaluadas, artículos encontrados y textos útiles para esta investigación:

Tabla 2. Fuentes editoriales científicas

| Período determinado   | Área            | Editoriales<br>Repositorios digitales | Palabras claves (Búsqueda en idioma inglés) |                                     |  |
|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--|
|                       |                 |                                       | A: Hydropower negative impacts              | B: Hydropower generation influences | C: Hydropower policies and projections |
| 2013-2021             |                 | Elsevier - Science Direct             | 106   | 169                                 | 99                                     |
| 2013-2021             | Scopus          | Springer                              | 203   | 325                                 | 105                                    |
| 2013-2021             |                 | Taylor & Francis                      | 84  | 123                                 | 87                                     |
| 2013-2021             | Web of science  |                                       | 187   | 204                                 | 68                                     |
| 2013-2021             | Google academic |                                       | 259   | 286                                 | 111                                    |
| <b>Subtotal</b>       |                 |                                       | 839**                                       | 1,107**                             | 470**                                  |
| <b>Suma Subtotal*</b> |                 |                                       |   | 2,416*                              |  |
| <b>Duplicados</b>     |                 |                                       |   | 2,426 - 1,486 = 930                 |  |

Elaboración: El Investigador

Como se muestra, se generó un protocolo de búsqueda de manera estructurada con palabras clave mediante rutas descritas previamente analizadas, se arrojó un total de documentos de 2,416\* filtrados para el período del 2013 y 2021, posterior, como primera parte, se excluyeron 1,486 referencias duplicadas entre las bases de datos quedando 930 (2,426 – 1,486). Es decir al buscar la información de las diversas bases se duplican artículos encontrados.

Seguido, de esos artículos y documentos investigativos, el segundo criterio de exclusión fue eliminar los documentos solo con temas cualitativos, sin aporte a este documento, o sin una base científica robusta, subsistiendo 131\* publicaciones con referencia en el título y resumen afín al presente estudio, el criterio de los documentos excluidos fue no cumplir con parámetros de inclusión determinados de acuerdo con las palabras específicas de la investigación como muestra la Tabla 2.

Con los 131\* documentos, por otra parte, los criterios de inclusión a la tesis fue revisar estos textos (47 + 53+31), se analizaron, 80 artículos en texto completo con revisión sistemática para consolidar y unificar criterios investigados, y de manera general se revisaron alrededor de 51 artículos para conocer estudios por país y agrupar discernimientos según continente como se indicará en apartados seguidos. Las revisiones son en base a los criterios de inclusión y exclusión, literatura obtenida mediante las herramientas de búsqueda digital (Tabla 3).

Tabla 3. Fuentes editoriales científicas útiles para el estudio

| Período determinado | Nro. | Editoriales Repositorios digitales | A: Útiles  | B: Útiles  | B: Útiles  |
|---------------------|------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| 2013-2021           | 1    | El Seiver - Science Direct         | 12         | 15         | 4          |
| 2013-2021           | 2    | Springer                           | 7          | 9          | 6          |
| 2013-2021           | 3    | Taylor & Francis                   | 14         | 12         | 10         |
| 2013-2021           | 4    | Web of science                     | 6          | 11         | 7          |
| 2013-2021           | 5    | Google academic                    | 8          | 6          | 4          |
| <b>Subtotal</b>     |      |                                    | <b>47*</b> | <b>53*</b> | <b>31*</b> |

Elaboración: El Investigador

Como se muestra existen diferentes artículos y referencias científicas, se identificaron alrededor de 131 textos, de estos, en el documento se presentarán los principales resultados, teorías, metodologías y datos investigativos en base a temas relacionados lo cual es respectivamente citado. Seguido la estructuración de los principales temas que se utilizaran para el estado del arte.

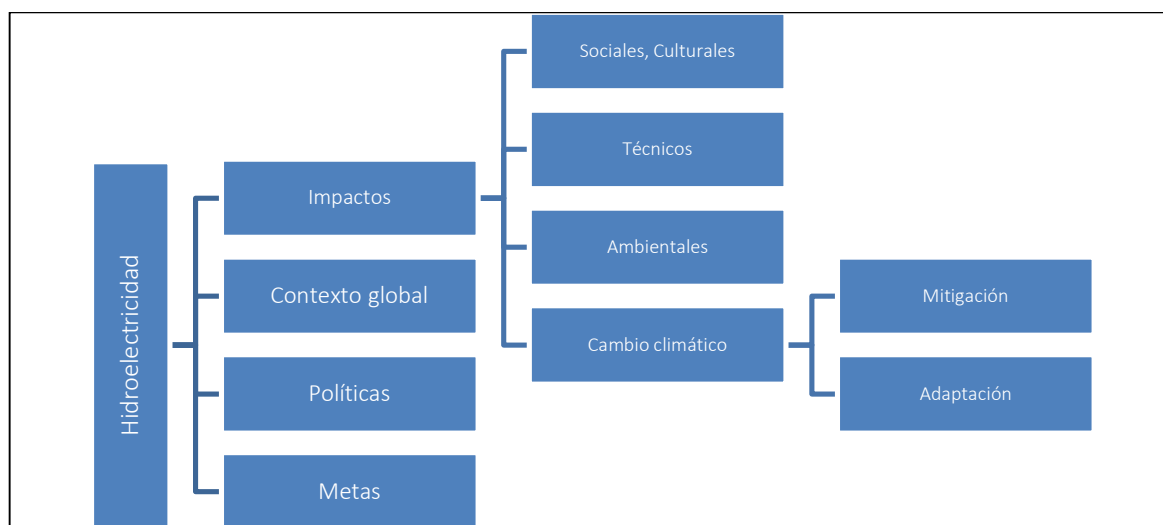


Ilustración 3. Enfoque temático del estado del arte

Elaboración: El Investigador

## 2.1 Hidroelectricidad y sus impactos

La energía hidroeléctrica y termoeléctrica juntas representaron el 98% de la producción eléctrica mundial en el año 2015, y estas tecnologías de generación dependen de la disponibilidad de recursos naturales para desempeñar un papel fundamental (M. T. H. van Vliet et al., 2016). Pero, independientemente del enfoque de desarrollo, los rápidos cambios actuales responden a la creciente población que demanda de recursos, energía y alimentación.

Según la Asociación Internacional de la Hidroelectricidad con datos del año 2019, el 15.9% de la energía global es representada por hidroelectricidad (International Hydropower Association, 2019); no obstante, para definir la relación de la hidroelectricidad e impactos desde diferentes áreas de conocimiento se

comparan y emergen perspectivas con sustento técnico investigativo, por ejemplo, globalmente existe el instrumento de apoyo al desarrollo hidroeléctrico que busca mitigar efectos, siguiente:

- Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad Hidroeléctrica (HSAP por sus siglas en inglés), en 2014 el Banco Mundial aprobó el Protocolo como herramienta para guiar el desarrollo hidroeléctrico en los países asociados del Banco (Liden, R.; Lyon, 2014). En la actualidad la adopción de este protocolo es relativamente lento por parte de los países donde gran parte de la energía hidroeléctrica ya existe o está proyectada, y no se basó en criterios del Protocolo. La última actualización del protocolo es del año 2018, la cual busca crear conciencia a través de compromiso a nivel sectorial con un documento de naturaleza compleja que evalúa la sostenibilidad utilizando un enfoque y consideración de la evaluación del ciclo de vida (Life cycle assessment: LCA por sus siglas en inglés) y desde la perspectiva de sistema hidroeléctrico completo es decir, embalse, presa, central eléctrica, transmisión, ubicación del proyecto, y, alrededores (International Hydropower Association, 2018a).

En este contexto, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad genera el protocolo HSAP que evalúa criterios de sostenibilidad para medir y agilizar enfoques de hidroelectricidad en busca de un nivel de convergencia. Dicho protocolo analiza las perspectivas en base a evaluaciones que utilizan evidencia para crear un perfil de sostenibilidad que identifica brechas e impulsa la mejora; estas evaluaciones son entregadas por asesores acreditados por el Banco, asesores que entregan niveles calificativos desde 1 hasta 5 como guía para asignar mejoras (International Hydropower Association, 2018a).

El HSAP es una herramienta de implementación voluntaria, la cual, al momento no se desarrolla con gran acogida debido a que proporciona un sistema de puntuación en una amplia gama de temas que hacen complejo el entendimiento de los actores, además no existe ningún reconocimiento, incentivo puntual, ni ganancia adicional por los operadores o constructores que, por otra parte, deben pagar a los asesores del Banco. Pero, específicamente para esta investigación el protocolo sirve de referencia con criterios de sostenibilidad y búsqueda de mitigación de impactos en temas sociales y técnicos que se evalúan en los proyectos (International Hydropower Association, 2018b).

Por otra parte, con el fin de desarrollar un marco teórico robusto de cómo se desarrolla esta fuente renovable y sus impactos, se determinan los principales resultados investigativos obtenidos de las bases de datos mencionados en el apartado 2, por lo cual, se separa por región global para un mejor entendimiento de los fenómenos y observaciones analizadas. A continuación, de manera gráfica los 31 países analizados donde se encontró información científica sobre los impactos de la hidroelectricidad.

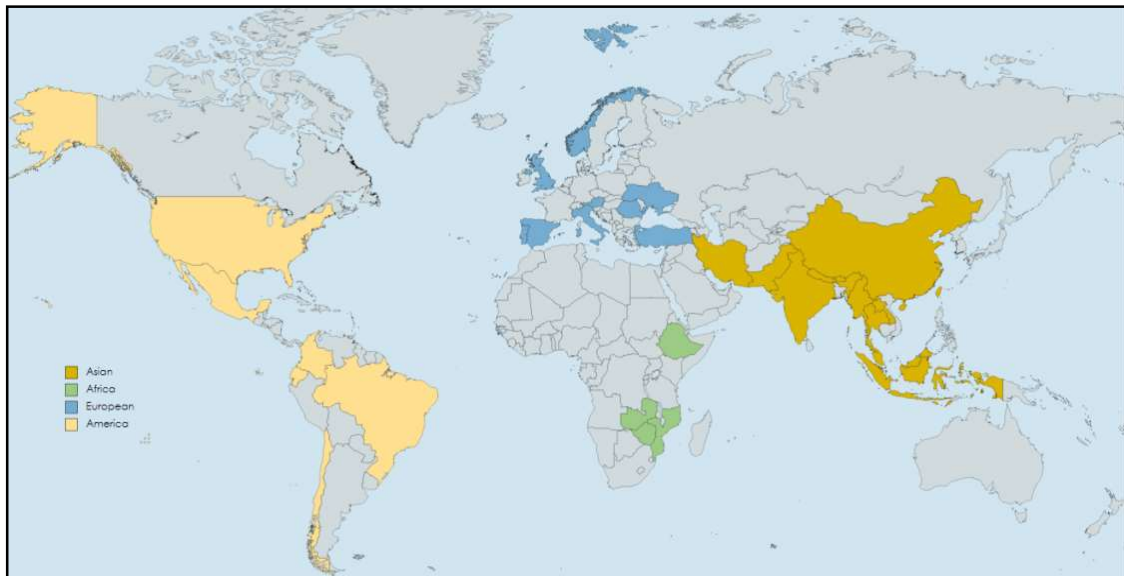




Ilustración 4. Países analizados con estudios científicos de la producción hidroeléctrica.



Elaboración: El Investigador. Fuente: (Mapchart, 2022).

Adicional, seguido en las Tablas 4 a 7, se recupera los hallazgos encontrados en diversos contextos, sitios diferentes, y bajo perspectivas seleccionadas con varias metodologías, sin embargo busca relacionar como a lo largo de los países la información determina perspectivas futuras de producción hidroeléctrica, proyecciones de la capacidad instalada, y los impactos relacionados con el desarrollo de estas infraestructuras, verificando el comportamiento de las variables sociales, técnicas y ambientales que el Estado del Arte de esta tesis abarca con la propuesta del tema.

Tabla 4. América: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente

| Nro. | País   | Conclusiones, recomendaciones, consideraciones y observaciones   |
|------|--|--|
| 1    | <p data-bbox="304 544 388 576">Brasil</p>     | <p data-bbox="451 381 1942 511">En Brasil se modeló el futuro energético sobre alternativas del desarrollo hidroeléctrico, el fundamento es la inversión que el gobierno brasileño tiene planeada para 26 grandes centrales hidroeléctricas en la cuenca del Amazonas con una capacidad total de 44 [GW], en un área de 9,000 [km<sup>2</sup>] de embalse con un costo total de 50-70 mil millones de dólares [USD] (De Queiroz et al., 2019).</p> <p data-bbox="451 535 1942 657">Brasil es un buen estudio de caso dado que su sector eléctrico depende en gran medida de la energía hidroeléctrica, en promedio, el 75% de la electricidad del país en los últimos diez años, conllevando que actualmente al 2021 sea el segundo país con mayor capacidad instalada de alrededor de 109 [GW] (De Faria &amp; Jaramillo, 2017; International Hydropower Association, 2020).</p> <p data-bbox="451 690 1942 868">Se evaluaron rutas de generación alternativa para evitar efectos sociales e impactos ambientales adversos asociados a los embalses hidroeléctricos, se concluyó que las inversiones para nuevos proyectos hidroeléctricos son necesarias, sin embargo, una condición previa es el acceso a otras fuentes renovables para diversificar la generación con escenarios alternativos, ya que las plantas eólicas, solares y de gas natural pueden reemplazar grandes hidroeléctricas que dañan los alrededores (De Faria et al., 2017).</p> |
| 2    | <p data-bbox="304 1047 388 1079">Chile</p>  | <p data-bbox="451 885 1942 1055">En el país de América del Sur un estudio etnográfico de 22 meses verifica que existen impactos por cada mega watt que generan las pequeñas hidroeléctricas determinadas de 1 a 10 [MW] (Kelly, 2019). De acuerdo al Ministerio de Energía de Chile al 2020, la capacidad instalada de la tecnología hidráulica llegó a 6,823 [MW] representando un 25.9% del sistema eléctrico local, y, en materia de energía generada, registra una participación de 18.9% (La Revista Energética de Chile, 2020).</p> <p data-bbox="451 1079 1942 1209">Del estudio, la cadena montañosa del sur de Chile, se producen nuevas cascadas en las laderas de las cordilleras durante los meses de invierno debido a que las lluvias se acumulan, sin embargo, para una gestión integral hídrica, el desarrollo hidroeléctrico en pequeña escala debe enfocarse en el análisis de las cuencas que están variando (Kelly-Richards et al., 2017).</p> <p data-bbox="451 1234 1942 1372">No obstante, es necesario enfatizar el principio ecológico de menos afectación posible por las construcciones hidroeléctricas considerando perspectivas colaborativas con las personas afectadas. Se recomienda que, las represas se regulen de manera más adecuada, los hallazgos sugieren cambios, y que las leyes ambientales hagan una evaluación hidroeléctrica integral en Chile (Kelly, 2019).</p>   |

---

|   |  |  |
|---|--|--|
| 3 | Colombia<br>  | <p>Se genera un análisis multimodal en Colombia sobre el cambio climático e hidroelectricidad, se detecta que es probable que se afecte la disponibilidad de agua en algunas regiones, y, por lo tanto, la producción hidroeléctrica varíe, se aplicaron cuatro modelos energéticos independientes, dos modelos de equilibrio parcial (GCAM y TIAM-ECN) y dos de equilibrio general (MEG4C y Phoenix), los cuatro identifican proyecciones de deterioro hidroeléctrico para las próximas tres décadas (Arango-Aramburo et al., 2019).</p> <p>A partir de los modelos, se encontró que, las pérdidas ocasionadas por el clima en la hidroelectricidad deben compensarse con la expansión de otras tecnologías, mostrando la necesidad de explorar sinergias energéticas (Arango-Aramburo et al., 2019). Otro estudio encontró que durante el período de 2015 a 2029, el cambio climático reducirá la capacidad de generación hidroeléctrica entre un 5.5% y un 17.1% en Colombia (Guerra et al., 2019).</p> <p>De los estudios, se determina que se necesitará de nuevas plantas de energía no hidroeléctricas para sostener una población en crecimiento, y, el cambio de la tecnología eléctrica colombiana dependerá de la economía, sectores financieros y restricciones regulatorias país que son inciertas o complejas para modelos energéticos globales (Calderón et al., 2014).</p>   |
| 4 | Ecuador<br> | <p>En el país sudamericano se evalúa el papel a largo plazo de la hidroelectricidad en el sistema de energía hacia el cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) (Carvajal et al., 2019). Entre los años 2007 y 2015, el país invirtió cerca de 6 mil millones de dólares [USD] en ocho proyectos hidroeléctricos elevando a más del doble su capacidad (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2018), según la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica (IHA), el Ecuador ocupó el tercer lugar después de China y Brasil para países que agregaron nueva capacidad en el año 2016 (IHA, 2020). Además, con corte 2020, el Ecuador generó el 77% de toda la energía mediante hidroelectricidad (CELEC, 2020).</p> <p>El estudio demuestra que la energía hidroeléctrica genera impactos por usar las condiciones del medio ambiente, relacionando efectos por la acumulación de agua (Carvajal et al., 2019). Es evidente entonces que el despliegue de la hidroelectricidad enfrente problemas regulatorios, financieros y sociales, subrayando la importancia crítica de emprender un análisis del sistema energético (Escribano, 2013). Ecuador demuestra incertidumbre sobre la hidroenergía, los resultados muestran que la energía total suministrada por hidroelectricidad variaría significativamente entre 53% a 81% para el año 2050, lo cual, genera, que la meta de NDC de Ecuador se lograría sin el despliegue de una gran infraestructura hidroeléctrica, si no, a través de una cartera energética más diversificada con energías no necesariamente renovables (Carvajal et al., 2019).</p> |

---

---

En el país de América del Norte se generan varios estudios por ser el tercer país con mayor capacidad hidroeléctrica global con 103 [GW] al año 2020, se establece que el impacto futuro del clima en la disponibilidad de agua indica una variabilidad estacional entre los modelos climáticos, corrientes de aire y entradas de agua en la generación hidroeléctrica (IHA, 2020). El clima cambiante representa una gran amenaza para las civilizaciones futuras, debido a las diferencias en precipitación y patrones de temperatura que alteran la hidrología, ciclo natural del agua e hidroelectricidad (Chilkoti et al., 2017).

Estados Unidos

5



Por tal motivo, según modelos para compensar las deficiencias hidroeléctricas, será necesario activar más centrales termoeléctricas produciendo emisiones de carbono contaminantes importantes (Boehlert et al., 2016). Además, se verificó que existen varias implicaciones para la planificación energética de recursos, por ejemplo, la infraestructura hídrica es manejada por un largo número de instituciones municipales y regionales, cada uno con sus propios planes, de este modo, la jurisdicción del agua e instalaciones hidroeléctricas raramente se alinean involucrando retos para la toma de decisiones americana (Tarroja et al., 2019).

Por otra parte, investigaciones estadounidenses mencionaron que es necesario monitorear la esorrentía y generación anual de energía hidroeléctrica, porque el cambio medio en la generación anual de proyectos públicos planea una reducción en -2 [TWh], con una incertidumbre de conjunto estimada de  $\pm 9$  [TWh] para el período 2025 – 2039 (Kao et al., 2015).

---

Según la secretaria de Energía del país en el año 2017, la generación hidroeléctrica representó el 17% de la capacidad instalada con 12,589 [MW] en 84 centrales hidroeléctricas, y la generación anual de energías limpias contribuyen con el 20.3%, es decir 64,868 [GWh], donde la hidroelectricidad aporta el 48% de la generación total en renovables (Palacios-Fonseca et. al., 2017). En el país azteca, se analizan las políticas de operación de la presa hidroeléctrica “El Infiernillo”, proyecto ubicado en el cauce del río Balsas entre los límites de los estados de Michoacán y Guerrero, para el análisis se utiliza programación dinámica estocástica con el fin de obtener lineamientos del embalse.

México

6



Del análisis del Infiernillo se proponen dos alternativas políticas de operación: La que parece ideal desde el punto de vista de minimizar las inundaciones, pero generan riesgos y daños en lugares aguas abajo de la presa por producción constante hidroeléctrica, y la segunda, conduce a mayor generación hidroeléctrica con almacenamientos mínimos de agua, pero afectaciones ambientales mayores (Arganis Juarez et al., 2015).

---

De los dos escenarios se concuerda que, la hidroelectricidad produce cambios amplios en su lugar de acción y buscar el punto medio donde se mitiguen su mayoría es necesario, el investigador recomienda mayores análisis a nivel de todo el sistema hidroeléctrico de México debido a la sensibilidad de generación que presenta esta renovable (Arganis Juarez et al., 2015).

Tabla 5. Asia: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente

| Nro. | Países   | Conclusiones, recomendaciones, consideraciones y observaciones   |
|------|--|--|
| 1    | Bután y Nepal<br> | <p>Bután y Nepal son dos países ricos en potencial hidroeléctrico por sus cuencas hidrográficas, pese a que no tienen salida al mar. Bután tiene una capacidad excedente para la exportación energética, mientras que Nepal tiene un enorme déficit de energía doméstica (Ogino et al., 2019). Los potenciales hidroeléctricos económicamente viables se estiman en 26,760 [MW] para Bután y 43,000 [MW] para Nepal. Sin embargo, la capacidad al 2019 instalada de Bután en generación hidroeléctrica fue 1,614 [MW], mientras que la de Nepal fue 856 [MW], es decir, se ha desarrollado el 6% y 2% respectivamente (International Renewable Energy Agency, 2020a).</p> <p>De estudios históricos en Nepal, las temperaturas medias y mínimas muestran tendencias decrecientes a razón de 0.05° [C], y 0.14° [C] por año, respectivamente (Sahukhal &amp; Bajracharya, 2019). Por otra parte en Bután más del 95% de la población dependen de un suministro de electricidad a un precio razonable entregado a través de los sistemas de red de todo el país que bordea los 5 [c.USD/KWh].</p> <p>En estos dos países vecinos del Asia se analiza el cambio y desarrollo energético, se demuestra que las instalaciones hidroeléctricas se diseñan para retener grandes volúmenes de agua en depósitos, aumentando los costos ambientales y riesgos sociales, se recomienda reducir la construcción de infraestructura a gran escala por instalaciones compactas con menos riesgos e impactos, donde se cautive recursos de financiación, incluyendo la emisión de fondos climáticos relacionados a la reducción de carbono (Ogino et al., 2019).</p> |
| 2    | China<br>       | <p>En China mediante proyecciones simuladas, se muestra que el cambio climático modifica dramáticamente las condiciones de entrada de agua con consecuencias nefastas para la hidroelectricidad, especialmente en el Suroeste, donde la hidroenergía domina el sistema de energía (P. Zhang et al., 2019). Sin embargo, dado que la energía eólica y solar están en auge en China y otros países del mundo, se sugiere investigar los efectos del cambio climático en otras renovables en coordinación con la hidroelectricidad para complementar redes energéticas diversas (Liu et al., 2020).</p>   |



---

Además, hallazgos indican que la gestión hídrica del proyecto hidroeléctrico más grande del mundo “Tres Gargantas” debe tomar medidas de adaptación en el futuro, a fin de hacer frente al riesgo de fluctuación interanual, si se toman medidas de adaptación debido al cambio climático se obtendrá una ganancia máxima de energía en 2046–2065 de 4.4–4.7% y de 9.5% en el período 2080–2099. (Qin et al., 2020).

En otra región del gigante asiático, en la meseta tibetana, se evalúa el río Lancang en el alto Mekong porque su río proporciona agua dulce a millones de personas, la investigación indica variación interanual de agua, y se recomienda que esta variabilidad se considere para la sostenibilidad futura hidroeléctrica (Zhong et al., 2019).

Los resultados indican que la hidroelectricidad en China es sensible y vulnerable a las fluctuaciones climáticas; la temperatura y lluvia son los factores más importantes, por tanto, los fenómenos meteorológicos extremos provocados por el calentamiento global, entre ellos, la lluvia, olas de calor, inundaciones y sequía, imponen retos para el desarrollo hidroeléctrico del país con mayor capacidad instalada global con 356 [GW] (Fan et al., 2020).

---

En Laos se generó una encuesta social a 160 hogares en cuatro aldeas aguas abajo y arriba de cuatro proyectos hidroeléctricos, los datos se recopilaron en el 2011 mediante una encuesta social en la que participaron 40 hogares por cada aldea, se encontró que dos tercios de los entrevistados eran agricultores, el 75% eran hombres, la edad promedio de la muestra fue 48 años (rango de 24 a 84 años), y finalmente la media de educación fue 6 años de escuela (Sivongxay et al., 2017).

3



Se encontró que el impacto de las centrales hidrogeneradoras en las comunidades expuso resultados positivos y negativos. Por ejemplo, la hidroelectricidad tiene el potencial de ser un empleador importante en la fase de construcción y operación con beneficios financieros que los miembros de las comunidades relacionaron como empleo directo (Sivongxay et al., 2017).

Sin embargo, la visibilidad principal de las comunidades es que la hidroelectricidad degrada el capital natural alterando los ríos, reduciendo la naturaleza y productividad de la pesca, estableciendo más impactos negativos que positivos. Se recomienda estudios similares a esta investigación para arrojar más conceptos sociales sobre el descuido del desarrollo económico y análisis empíricos sobre los impactos de la energía hidroeléctrica en los medios de vida de la población (Sivongxay et al., 2017).

---

---

En la India se analizó la producción hidroeléctrica bajo el escenario del cambio climático, sobre la base que, la hidroenergía es un valioso recurso renovable que en parte mitiga el cambio climático y satisface las crecientes demandas del país. En el estudio se simulan siete grandes proyectos hidroeléctricos que experimentaron significativamente el calentamiento global, una disminución de precipitaciones y caudal de los ríos durante el período observado de 1951 a 2007 en las cuencas de las represas bajo la Vía de Concentración Representativa 8.5 (RCP por sus siglas en inglés) (S. A. Ali et al., 2018).

India

4



Para la corriente simulada en los embalses hidroeléctricos se muestra un aumento bajo el escenario de calentamiento global, además, el flujo medio anual de los arroyos se modificará hasta un 45% y la producción de hidroelectricidad hasta 25% según el aumento en el clima futuro. No obstante, se proyecta un calentamiento significativo de  $6.25 \pm 1.62^\circ$  [C] que provocaría una disminución del caudal de los ríos afectando la producción hidroeléctrica en mayo y junio para las centrales Nathpa Jhakri y Bhakra Nangal donde domina un clima de nieve (S. A. Ali et al., 2018).

Se concluye que todas las cuencas hidrológicas experimentan cambios sustanciales en precipitación y temperatura que afecta la disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica, y, del análisis se advierte un clima más cálido y húmedo en el futuro, por tal razón, se calcula que la temperatura media anual aumentará entre un  $18 \pm 14.6\%$  hasta final de siglo (S. A. Ali et al., 2018).

---

En el ex país persa, se estudia el impacto del cambio climático a partir de la descarga de dos centrales hidroeléctricas (Bakhtiari y Dez), utilizando seis Modelos Climáticos Globales (GCM) y tres escenarios conforme el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) para mediados y finales del siglo XXI.

Irán

5



Los resultados de las proyecciones obtenidas para la precipitación son anómalos, lo que demuestra un aumento y una disminución dependiendo del mes en la precipitación. Además, la evaluación de cambio climático multimodal e impacto en hidrología y potencial hidroeléctrico, hace proyecciones en los escenarios que revelaron un aumento significativo de temperatura hasta  $4.9^\circ$ [C] y variación en la precipitación hasta 18% para mediados y fines de siglo (Mousavi et al., 2018).

El modelo hidrológico confirma una reducción anual proyectada hidroeléctrica del 33% en condiciones de cambio climático, y los resultados demuestran la vulnerabilidad de las fuentes renovables en torno a un clima incierto (Mousavi et al., 2018).

---

Al Sur de Asia, en Nepal y Paquistán la hidroelectricidad es cubierta por el 2% y 12% respectivamente de su potencial factible, por lo cual, un estudio recomienda generar estrategias y políticas de energía que enfaticen la prioridad del recurso hídrico en base a simulaciones climáticas, de lo observado, se muestran varios retos económicos, técnicos, medioambientales, ecológicos y políticos en la producción hidroeléctrica (Hussain et al., 2019).

Nepal y Paquistán

6



La escasez de electricidad y creciente demanda en la región abren la posibilidad del comercio energético regional, obteniendo beneficios al conectar estaciones de transmisión de energía a nivel transnacional y realizar negocios entre países. Este comercio de energía ayudará a los países a fortalecer su seguridad energética nacional (S. Ali et al., 2015). Por ejemplo, en Nepal, los datos meteorológicos muestran un aumento de la precipitación media anual a una tasa leve de 0.284 [mm/año], con un cambio porcentual anual en el área. Además las temperaturas mínimas muestran tendencias crecientes a tasas de 0.05°[C] y 0.14°[C] por año, respectivamente para Nepal y Paquistán (Sahukhal & Bajracharya, 2019).

El estudio sugiere una perspectiva inteligente del comercio de energía y cooperación regional para el desarrollo eléctrico colectivo entre los dos países minimizando impactos en comunidades aguas abajo, vida acuática y ecosistemas terrestres (Hussain et al., 2019).

---

Se analizan 4 países del Sudeste Asiático, se concluye que es notable que el crecimiento económico dependa del recurso energético e hídrico, y las dos demandas, tienen un aumento amplio. El desarrollo de la hidroelectricidad y distribución de las centrales en los cuatro países presenta políticas energéticas deficientes, y los obstáculos de los cuatro países presentan retos para el futuro hidroenergético (Tang et al., 2019).

Malasia,  
Indonesia,  
Tailandia y  
Myanmar

7



Malasia es un país rico en recursos hidroeléctricos por sus ventajas geográficas únicas con 189 ríos que tienen una longitud de alrededor de 57,300 [km], el país tiene una generación hidroeléctrica total de Malasia es 414,000 [GWh/año], de los cuales alrededor de 329,000 [GWh/año] están disponibles en el oriente de Malasia (Ahmad & Tahar, 2014).

Indonesia teóricamente ocupa el cuarto lugar en capacidad hidroeléctrica del Asia con una estimación en 75,000 [MW], en los que 500 [MW] podrían clasificarse como hidroelectricidad a pequeña escala, y el potencial hidroeléctrico es extendido en más de 1,300 posibles ubicaciones debido a la geografía única (Purwanto & Afifah, 2016).


Tailandia tiene una superficie de 310,000 [km<sup>2</sup>] donde la precipitación media anual en Tailandia es de 1,560 [mm] y la cantidad total de recursos hidroeléctricos desarrollados es cerca de 18,000 millones de [kWh], pero, en teoría, los recursos hidroeléctricos disponibles son 190,000 millones de [kWh], y, solo se pueden explotar 100,000 millones de [kWh] (Aroonrat & Wongwiset, 2015).

---

Myanmar es un país tropical; su potencial hidroeléctrico técnicamente factible es 39,720 [MW] y el potencial a gran escala ocupa más de 25,000 [MW]. Pero, al igual que otros países, Myanmar solo utiliza una pequeña parte de la inmensa energía hidroeléctrica, menos del 1% en torno a los 350 [MW] (Kattelus et al., 2015).

Como se muestra el aspecto hidroeléctrico en los cuatro países del sur de Asia presenta una amplia proyección por las condiciones geográficas, y, al analizar los recursos globales, la generación hidroeléctrica tiene importancia por el aspecto renovable, pero, las políticas energéticas limitadas, disputas dentro de los gobiernos nacionales y falta de cooperación internacional genera el déficit de estímulos adecuados e inversión para desarrollar proyectos hidroeléctricos sostenibles en estos países (Tang et al., 2019).

Tabla 6. Europa: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente

| Nro. | País   | Conclusiones, recomendaciones, consideraciones y observaciones  |
|------|--|---|
| 1    | Austria<br> | <p>A nivel global la hidroelectricidad es un sector energético importante, en Austria representa el 65.7% de la generación desarrollada, el país al año 2015 tenía alrededor de 2,882 centrales hidroeléctricas que alimentan las redes eléctricas produciendo 47.6 [TWh/año], de lo cual, aproximadamente dos tercios de las hidroeléctricas son plantas tipo pasada y el tercio restante son centrales de almacenamiento y bombeo. Sin embargo, en Austria un gran número de expertos debaten sobre el futuro de la hidroelectricidad, se revisó la fuente demostrando que existen limitaciones, según una encuesta, el país muestra perspectivas políticas, económicas y ambientales con desafíos debido a las afectaciones a la población y medio ambiente cercanos a dichos proyectos (Wagner et al., 2015).</p> <p>La situación actual en Austria es difícil, existen influencias ambientales, por ejemplo, el cambio climático muestra proyecciones inciertas sobre los proyectos hidroeléctricos, hay una variedad de razones para esto, la ubicación y pronósticos económicos negativos debido a malas condiciones de mercado en la electricidad (Wagner et al., 2015).</p> <p>Además, los cambios en la hidrología inducidos por el clima variable dan motivo a consideraciones minuciosas para Austria, un cambio estacional de la producción hidroeléctrica del verano al invierno proyecta una disminución nacional de la hidroelectricidad anual entre el 6 y el 15%, según los</p> |

---

escenarios de emisiones B1 y B2 hasta finales de este siglo, y, en general, los estudios muestran sensibilidad a las inundaciones en particular para las plantas de pasada (Holzmann et al., 2010).

---

2



En la isla europea, se genera un análisis de las centrales hidroeléctricas actuales y futuras, la capacidad operativa en 2015 fue 1.5 [GW], lo que supone una contribución sustancial a la red energética, del estudio se verifica que, las centrales hidroeléctricas funcionan con factores de carga más altos que los parques eólicos o solares, pero en algunas circunstancias pueden ser social y ambientalmente menos aceptables (Sample et al., 2015).

Del estudio, se recomienda que los esquemas hidroeléctricos existentes efectúen mejoras en el futuro para continuar haciendo el mejor uso del recurso disponible, dichos proyectos pueden requerir un diseño civil más sustancial y sostenible, pero costoso. Además, se espera que el cambio climático intensifique el ciclo hidrológico global lo que lleva a cambios, tanto en la magnitud como en la capacidad de recuperación de los recursos, en Escocia específicamente será variable la producción de hidroenergía ante el clima (Sample et al., 2015).

Finalmente, estudios sobre la disponibilidad del agua y perspectivas de la energía hidroeléctrica muestran una disminución general del potencial bruto en toda Europa, disminuyendo del 7% al 12% en la producción total, y resultados indican que, para Escocia en particular, el potencial hidroeléctrico bruto probablemente aumente un 7% para la década de 2070 (Alcamo et al., 2003; Lehner et al., 2005).

---

3



En España, país que gestiona 20,414 [MW] de hidroelectricidad instalada al 2020 (IHA, 2020), se estudia el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica estudiando las regiones del Sur, mediante el análisis de inversión se muestra que el cambio climático pelagra futuras inversiones en instalaciones hidroeléctricas (Solaun & Cerdá, 2017).

A pesar de las incertidumbres, la magnitud de los cambios esperados sugiere que los planificadores energéticos y responsables de la toma de decisiones deberían vigilar de cerca el cambio climático, que también afecta a otras tecnologías de generación (Schaeffer et al., 2012).

En cualquier caso, el cambio climático tiene un impacto decisivo en la rentabilidad de las centrales hidroeléctricas, y, a pesar de las incertidumbres existentes, la magnitud de los cambios esperados sugiere seguimiento porque los resultados predicen un riesgo importante para la hidroelectricidad en el sur de España en todos los escenarios; la reducción prevista de la esorrentía afectará significativamente la producción a finales de siglo entre el 30% y el 49% según el escenario A2 y entre el 10% y el 31% para el comportamiento B2 (Solaun & Cerdá, 2017).

---

---

4



En el país italiano con 20,593 [MW] de hidroelectricidad instalada al 2021, se analiza la Región Alpina Suroriental Italiana, área de 1,367 [km<sup>2</sup>], se simula el recurso hídrico en la hidroelectricidad futura de la cuenca del río Noce utilizando proyecciones de Modelos Climáticos Globales (Majone et al., 2016).

El análisis esperaba que el cambio climático provoque cambios en los regímenes de caudal de la región con posibles consecuencias para varios sectores socioeconómicos, incluida la producción hidroeléctrica (Bongio et al., 2016).

La evaluación se ejecutó para el período 2040-2070 bajo el escenario de emisiones A1B, las proyecciones indican un aumento de la temperatura media de la cuenca en el rango de 2 - 4° [C], dependiendo del modelo climático utilizado. En precipitación indican un aumento anual en el rango entre 2% y 6%, con mayores cambios en invierno y otoño, por lo cual, con el aumento de la temperatura y precipitación media anual, se pronostican cambios que causan una reducción en la captación hidroeléctrica, además se encuentra que en elevaciones más altas, es mayor el cambio como consecuencia del aumento espacialmente no uniforme de la precipitación (Majone et al., 2016).

---

5



La energía hidroeléctrica es un pilar del sistema eléctrico noruego. A principios de 2021, había 1,681 centrales hidroeléctricas con una capacidad instalada de 33,055 [MW] que producían 136.4 [TWh], el 90% de la producción total de energía de Noruega (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2021).

Además, en el país nórdico, la transición global hacia la producción de energía renovable aumento la demanda de operaciones hidroeléctricas nuevas. No obstante, la mayoría de los estudios hidroeléctricos con reservorios son casos específicos, lo que dificulta las acciones de planificación, evaluación y mitigación a gran escala en varios ecosistemas (Eloranta et al., 2018).

Se investigó si la producción hidroeléctrica contribuye a la pérdida de biodiversidad acuática; el estudio calcula valores netos de uso de agua para las centrales hidroeléctricas del país en 0.012 [m<sup>3</sup>/kWh] = 3.3 [m<sup>3</sup>/GJ], valor que establece el impacto del consumo hídrico en la biodiversidad de los peces (Dorber et al., 2019). Analíticamente, las diferentes percepciones científicas y el conocimiento de las políticas justifican una mayor atención, conocimiento e interés del desarrollo de la hidroelectricidad con una gestión basada en la naturaleza (Barton et al., 2020). La conclusión muestra que es posible que los proyectos hidroeléctricos con un gran consumo de agua para generar energía mayor al calculado provoquen impactos en la biodiversidad aledaña (Dorber et al., 2019).

---

---

6

Portugal



La hidroelectricidad juega un papel importante en la red eléctrica portuguesa con 7,262 [MW] en el 2020; aunque los impactos del cambio climático en esta fuente renovable son reconocidos, su cuantificación es escasa, especialmente en el mediterráneo (Ciscar & Dowling, 2014).

Una investigación utilizó un modelo de optimización de equilibrio parcial con el programa (TIMES\_PT). Al evaluar los impactos del cambio climático en la generación hidroeléctrica y sector eléctrico, en general, si bien la hidroenergía seguirá siendo una de las tecnologías más rentables, perderá ventajas en comparación con otras fuentes renovables como la solar y eólica (Teotónio et al., 2017).

La simulación proyectada muestra que la hidroelectricidad en Portugal disminuirá en un 41% hasta 2050, lo que resultará en precios más altos de la electricidad hasta un 17% de aumento. Además, cuanto más fuertes sean los impactos del cambio climático en esta fuente, mayores serán los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (aumento del 7.2%), lo que exige una acción política firme para cumplir con los objetivos climáticos de la Unión Europea para 2050 (Teotónio et al., 2017).

---

7

Rumania



En Rumania, la energía hidroeléctrica es la principal renovable aportando el 19% en la matriz energética en el año 2019, y con un balance de producción de 6,684 [MW] en el 2019 (International Renewable Energy Agency, 2020a). Pero, a pesar de sus valiosas ventajas en el suministro y equilibrio del sistema energético rumano, la aceptación pública, impacto ambiental, social y económico es un desafío común en el desarrollo hidroeléctrico (Robescu & Bondrea, 2019).

La investigación tomó la generación hidroeléctrica en el río Sebes donde se calcula la huella hidroeléctrica en 4 [m<sup>3</sup>/GJ], y, determinó que tener criterios específicos de calificación de los ductos hídricos para plantas de generación nuevas permite obtener la máxima eficiencia hidroeléctrica. Por lo tanto, la selección del río junto con la tecnología de desempeño aplicada, la calidad de las pruebas de puesta en marcha y gestión de la operación representan los pasos principales a controlar cuidadosamente en la expansión hidroeléctrica (Dadu et al., 2017).

Para concluir, se demostró que el nexo agua-energía es objeto de un debate significativo y los científicos discuten que la energía hidroeléctrica es un gran consumidor de agua que daña constantemente las cuencas hidrográficas (Robescu & Bondrea, 2019).

---

---

8

Turquía



En Turquía con datos del 2019, la generación por energía hidroeléctrica corresponde a 87.09 [TWh] con 28,503 [MW] de capacidad instalada, el país cuenta con más de 25 cuencas hidrográficas, incluidos los ríos transfronterizos Tigris y Éufrates (IHA, 2020).

Al respecto, en el país se reevaluó el daño por el desvío de ríos en las plantas hidroeléctricas, a pesar del vasto conocimiento teórico y práctico acumulado sobre las inundaciones, la falta de precauciones tomadas contra los desastres naturales sigue causando fatalidad y daños a la propiedad (Bilgili et al., 2018). Se analizó la inundación de la central hidroeléctrica Kutahya con un enfoque estocástico para obtener parámetros esenciales utilizados en los procedimientos de diseño mediante una simulación numérica computacional del flujo del río verificando el comportamiento a varios parámetros (Celik et al., 2017).

La inundación de la central hidroeléctrica de pasada en Kutahya, encontró que la descarga de diseño de la planta hidroeléctrica corresponde a aspectos hidrológicos mal analizados en la construcción, y, un número considerable de proyectos hidroeléctricos similares se construyen o están en funcionamiento, los cuales están bajo el mismo riesgo si no se toman las medidas adecuadas con respecto al aumento del nivel del agua en el río debido a infraestructura de contención mal ubicada, se concluye que dicho análisis e información será útil para evitar daños en el futuro en una gran cantidad de plantas hidroeléctricas comparables (Celik et al., 2017).

---

9

Ucrania



Según datos de la Asociación Internacional de Hidroelectricidad, Ucrania tiene una capacidad instalada hidroeléctrica al 2019 de 6,229 [MW] y generó 6.94 [TWh] (IHA, 2020), por lo cual, se desarrolla un análisis de los impactos de las plantas hidroeléctricas en la vida acuática mediante pruebas de marcadores bioquímicos de eco toxicidad (Gnatyshyna et al., 2020).



El estudio establece que falta investigar los efectos de las hidroeléctricas, por el uso de agua en relación a la calidad del recurso, dichas pruebas son hechas a organismos unicelulares vivos (moluscos: unio tumidus) para detectar niveles de proteínas que normalmente se producen en aguas en estado natural (Gnatyshyna et al., 2020).

Las muestras analizaron 11 indicadores, como resultado se detectan niveles insuficientes de proteínas que en condiciones naturales para las muestras donde existe un aprovechamiento del recurso para la generación hidroeléctrica, lo que demuestra que existe un impacto ambiental en el agua, con una reducción o variación de las condiciones de dichos organismos medidos, y es concluyente promover una política hidrodinámica constructiva en la explotación hidroeléctrica para evitar el daño de ecosistemas como los organismos estudiados (Gnatyshyna et al., 2020).

---



Tabla 7. África: Análisis y estudios científicos de la hidroelectricidad en el Continente

| Nro. | País   | Conclusiones, recomendaciones, consideraciones y observaciones  |
|------|--|---|
| 1    | <p data-bbox="304 560 388 584">Etiopía</p>                | <p data-bbox="451 381 1921 503">En Etiopía, un análisis de las perspectivas del nexo de energía y agua, verifica que la construcción agresiva de hidroeléctricas a gran escala genera costos ambientales que se imponen a las comunidades viviendo río abajo de las represas por las modificaciones de los patrones de agua (Van Der Zwaan et al., 2018).</p> <p data-bbox="451 535 1921 657">Del análisis se simula escenarios, y entre las perspectivas de energía hidroeléctrica a gran escala en Etiopía se encuentra que las proyecciones tienen dos enfoques de modelado distintos en generación entre 71 y 87 [TWh/año] para 2050 en un escenario de control de cambio climático estricto lo que contribuye sustancialmente a los esfuerzos mundiales para alcanzar la meta de 2° [C] del Acuerdo de París (Van Der Zwaan et al., 2018).</p> <p data-bbox="451 690 1921 901">El estudio nota que las variaciones climáticas en 200 ubicaciones de la sub cuenca del Nilo en Etiopía demuestran que la precipitación registra cambios promedio entre -14% y + 27% para el 2050, lo que dilucida que, los costos tangibles e intangibles de la construcción de grandes presas hidroeléctricas presentan una alta vulnerabilidad a eventos inesperados (X. Zhang et al., 2018). Se concluye que es probable que países vecinos vean sus derechos de agua perturbados, países dependientes del Nilo como el caso de Egipto, amenazan tomar medidas contra la expansión a gran escala de hidroeléctricas en Etiopía (Abera et al., 2018).</p>       |
| 2    | <p data-bbox="283 1015 409 1071">Zimbabue y Zambia</p>  | <p data-bbox="451 933 1921 1144">A lo largo del río Zambeze perteneciente al popular Parque Nacional Mana Pools, se observó que, en la última década se experimentaron cambios ecológicos y morfológicos debido a la construcción de represas hidroeléctricas aguas arriba. Los resultados muestran que la presencia de embalses reduce los caudales máximos altos promedio en 17% y aumenta los caudales bajos promedio en un 5% en Mana Pools (Ekandjo et al., 2018). Este análisis, se ejecuta a los dos países del África austral que, según datos de las Asociación Internacional de la Hidroelectricidad, Zambia al 2019 registró 2,400 [MW] de capacidad instalada, y Zimbabue 1,076 [MW] (International Hydropower Association, 2020).</p> <p data-bbox="451 1177 1921 1388">Además, se confirma que las presas en los alrededores de Zimbabue y Zambia tienen varias vulnerabilidades; por lo que, se recomienda sincronizar la operación hidroeléctrica con el manejo de áreas de vida silvestre, especialmente cuando se abren las compuertas de los embalses como medida de control de inundaciones; se comprobó que esta acción de manera brusca perturba abruptamente los ecosistemas, eliminando la vida silvestre y animales acuáticos (Ekandjo et al., 2018). Por otra parte, otra investigación del río Zambeze demuestra que es probable se cambie el flujo hídrico en el futuro y las implicaciones del análisis son debido a los dramáticos impactos del cambio climático en el potencial hidroeléctrico donde la viabilidad</p> |

---

y reembolso financiero de los préstamos de estos proyectos dependerán de la estabilidad de la generación hidroeléctrica e ingresos por venta energética (Spalding-Fecher et al., 2016). Por ejemplo, la central hidroeléctrica Kariba que es parte del río Zambeze y contiene los dos países, muestra resultados altamente vulnerables a un clima seco, lo que potencialmente reduce la generación promedio en 12% para el período 2050 - 2070 (Spalding-Fecher et al., 2016).

---

Tanzania es uno de los países de África de más rápido crecimiento, en los últimos años, la electricidad del país fue dominada por generación térmica, a pesar del hecho que se tiene un enorme potencial hidroeléctrico aproximado a 38,000 [MW] y solo una pequeña porción es explotada hasta la fecha con 586 [MW] al año 2019 (IHA, 2020; Kichonge, 2018). La investigación demuestra que, en Tanzania, la construcción de plantas hidroeléctricas, presas y embalses se extiende mucho más allá de los efectos directos sobre el medio ambiente para acoger los reasentamientos forzados de las comunidades y dispersión de la vida silvestre, demostrando una competencia por el uso del agua entre la población y operadores de las plantas hidroeléctricas, donde se asocia la creciente deforestación por nuevas infraestructuras (Ardizzon et al., 2014).

Tanzania

3



El estudio recomienda que, el potencial hidroeléctrico sin explotar del país y en estudios de factibilidad en alrededor de 4,765 [MW] para ser ejecutado en un medio o corto plazo, debe pensar en la combinación energética futura de varias fuentes renovables. Sin embargo, los numerosos desafíos climáticos a veces afectan los proyectos hidroeléctricos de gran y mediana escala; la investigación determinó un papel clave; Las centrales hidroeléctricas pequeñas son la clave a jugar en la generación y conservación del medio ambiente (Kichonge, 2018).

Es concluyente que la asignación geográfica del país y potencial hidroeléctrico es la principal opción para usar el recurso energético doméstico limpio, pero, hay que asegurar beneficios sustanciales a las comunidades y ambiente para promover su desarrollo en una vía de crecimiento sostenible de la generación eléctrica (Kichonge, 2018).

---

**Nota 1.** The American Continent Hydropower Development and The Sustainability: A Review.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva & Alvarez del Castillo, 2022). The American Continent Hydropower Development and The Sustainability: A Review. International Journal of Engineering Science Technologies, 6(2), 66-79. <https://doi.org/10.29121/ijoest.v6.i2.2022.315>

**Nota 2.** Hydropower Development in Three South American Countries: Brazil, Colombia, and Ecuador

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Barros-Enriquez, et al., 2023). Hydropower Development in Three South American Countries: Brazil, Colombia, and Ecuador, Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment, 14(2), pp. 102-110. Doi: 10.5829/ijee.2023.14.02.02

Como se detalla en las tablas precedentes de análisis por país y continente, en diferentes estudios regionales, a nivel global se espera que la creciente demanda humana requiera de mayores recursos como agua, energía, alimentos y materiales, y dichos recursos se enfrentarán a desafíos complejos en las próximas décadas (Johnson et al., 2019). Pero, los estudios, la hidroelectricidad y su compleja interacción de impactos son comúnmente tratados como independientes, pero, de hecho, las consecuencias hidroeléctricas no son puramente sociales, ecológicas, técnicas o económicas, sino relacionadas (Voegeli et al., 2019). Teniendo en cuenta la producción energética global, un factor importante es el número de centrales hidroeléctricas que crece constantemente en todo el mundo, pero, tales instalaciones conllevan una amplia gama de efectos que requieren de una evaluación sólida y profunda de cada proyecto nuevo o en operación. A continuación, una ilustración que relaciona los impactos encontrados:

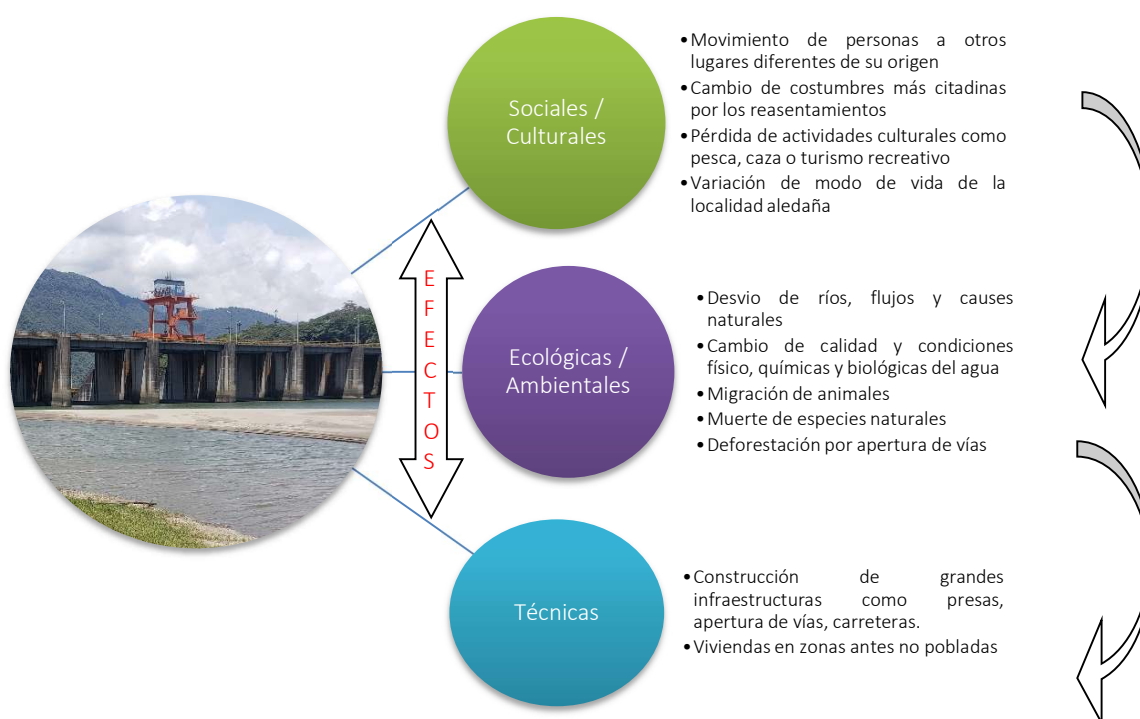


Ilustración 5. Relación de los impactos negativos en la producción hidroeléctrica

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021a).

De lo recolectado, existen varios efectos negativos; a nivel constructivo, las represas hidroeléctricas son una de las mayores infraestructuras energéticas en el mundo y existe una enorme necesidad de construir más represas, pero, se recomienda a través de un marco político robusto con preocupación social, protección ambiental, rehabilitación de ecosistemas, y transparencia constructiva (Tan-Mullins et al., 2017). Es importante que los formuladores de políticas, ingenieros y constructores adopten metodologías o protocolos para priorizar la ubicación de las centrales hidroeléctricas de manera sostenible en diferentes partes del mundo (Ghumman et al., 2020).

Por otro lado, estudios interdisciplinarios cuestionan el rol principal y beneficios ostensibles de la hidroelectricidad a gran escala. Los posibles beneficios de la generación hidroeléctrica son varios como

mejora del acceso a la energía, desarrollo económico, control de inundaciones, reducción de emisiones de carbono y otros, pero generalmente estos efectos son restringidos y ocurren en áreas urbanas muy alejadas (Ghumman et al., 2020). De ahí que, la energía hidroeléctrica seguirá siendo una renovable controvertida en los próximos años, necesitando evaluar riesgos, ventajas y viabilidad incluyendo el tamaño, costos e impactos de esta fuente (Van Der Zwaan et al., 2015).

El futuro de la hidroelectricidad presenta un camino desafiante para los proyectos en ejecución en todo el mundo a través de variaciones externas como el cambio climático y los impactos citados. Sin embargo, un profundo análisis social, ambiental y cultural es recomendado para desarrollar nuevos proyectos y mitigar las desventajas e impactos basados en estudios técnicos (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021a).

**Nota 3.** Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this "clean" source.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021b). Revista CienciAmérica. Vol. 10 Núm. 2 (2021): CienciAmérica (julio-diciembre 2021). Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this "clean" source. <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i2.363>

### **2.1.1 La hidroelectricidad: Mitigación y adaptación al cambio climático**

La electricidad es esencial para la vida humana, bienestar y desarrollo económico, sin embargo, según el Estudio Comparativo sobre Políticas de Electrificación Rural en Economías Emergentes de la Agencia Internacional de Energía del año 2010, aproximadamente el 20% de la población mundial permanece sin acceso a iluminación, refrigeración, buena educación o agua potable (International Energy Agency, 2010). La luz significa desarrollo socioeconómico, mientras que la oscuridad una preocupación importante. Hoy, más de 1,200 millones de personas carecen de acceso a electricidad, principalmente en Asia y África con alrededor del 80% en áreas rurales (Berga, 2016).

Sumado a esta falta energética, se desenvuelve los notables impactos del cambio climático, según el secretario general de la Organización de Naciones Unidas "*Retrasar la acción respecto al cambio climático es casi tan peligroso como negar que existe.*" (Guterres, 2021). De modo que, el cambio climático es una de las principales influencias que hacen que las sociedades cambien su forma de aprovechamiento (Shove, 2010). La sociedad se adapta a los cambios cuando es necesario para sobrevivir, pero, actualmente los patrones de consumo de los recursos naturales ya no se consideran sostenibles (Adger et al., 2003).

Si bien, el cambio climático influye continuamente en la forma en que las personas viven, especialmente las que dependen de los recursos naturales que son sensibles al cambio climático (Adger et al., 2003). Desde cualquier ámbito las transiciones del sector eléctrico requieren de un enfoque de adaptación y mitigación al cambio climático, por consiguiente, la necesidad de inversión en regiones vulnerables o modificadas se calcularon globalmente de manera acumulativa en un billón de dólares para compensar el

deterioro de los últimos 18 años de generación hidroeléctrica causada por el cambio climático (Turner, Hejazi, et al., 2017).

Bajo las perspectivas que desde hace 70 años se presentan, el cambio climático se determinó según el IPCC como un factor antropogénico que afectan los recursos naturales, variando las condiciones que se conocían como estándar (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), por esto, se establece que es importante discutir a continuación sobre estudios científicos por varios países como ejemplo para conocer las proyecciones climáticas en base a la hidroelectricidad.

**Brasil** es un buen caso de estudio, dado que su sector eléctrico depende en gran medida de la hidroelectricidad como principal suministro, en promedio, el 75% de la electricidad del país en los últimos diez años (EPE, 2017). En consecuencia, se evalúa el impacto del cambio climático en la hidroelectricidad hacia el 2050 con modelos múltiples de interacciones entre mitigación y adaptación para los escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5 del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (denominado en inglés IPCC); a continuación, el detalle explicativo de estos escenarios:

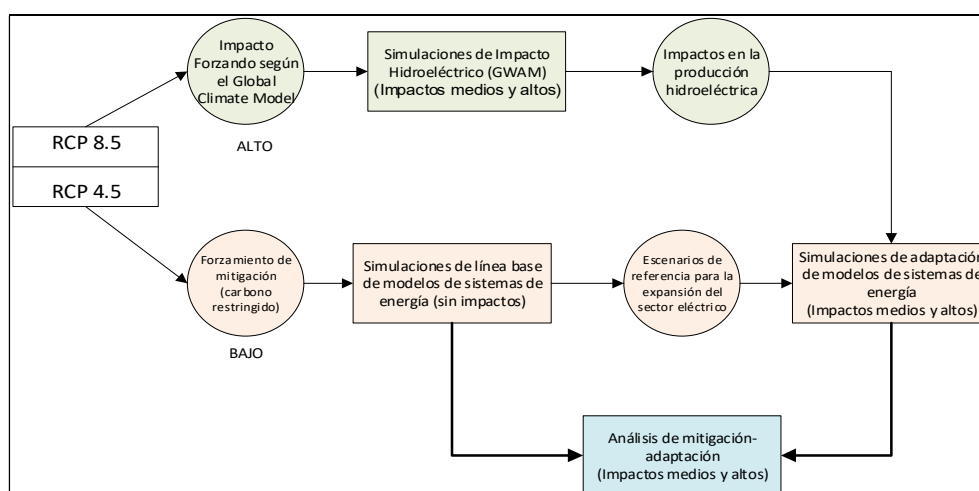


Ilustración 6. Modelos de sistemas de energía RCP 8.5 y RCP 4.5

Fuente: Lucena, A. (2018).

Las proyecciones de los modelos de circulación hídrica indican que un escenario de altas emisiones globales produciría impactos severos en la producción hidroeléctrica en Brasil, resultando 42 perfiles de manera aislada e independiente de cada vía de concentración representativa (RCP por sus siglas en inglés) (Lucena et al., 2018).

En la expansión energética simulada de todos los modelos, la energía hidroeléctrica sigue siendo la principal fuente de generación para Brasil, a pesar de perder importancia relativa. La mayor expansión en la generación de energía hidroeléctrica ocurre a principios del período del 2020, aun así, la mayoría de los modelos proyectan una diversificación de la combinación de generación de energía para 2050.

En 2050, los costos de inversión demuestran incertidumbre a medida que los impactos se vuelven más severos, pero el análisis de costos presentado se limita solo a inversión, los modelos de sistemas de energía

pueden mejorar la construcción de escenarios teniendo en cuenta las interacciones entre mitigación y adaptación del cambio climático.

Se concluye que, a pesar de los diferentes análisis combinados ejecutados y de la complejidad del análisis combinado ejecutado, los resultados muestran que los impactos del cambio climático conducirían al 2050 a la reducción hidroeléctrica e incremento de emisiones contaminantes en ausencia de políticas de mitigación y adaptación climática de Brasil. En este caso, para 2050 las emisiones aumentan de un rango de 2,911 – 4,274 [T.CO<sup>2</sup>/año] del escenario referencial a un rango de 2,920 – 4,280 [T.CO<sup>2</sup>/año] y 2,964 – 4,318 [T.CO<sup>2</sup>/año] para los escenarios bajo 4.5 y alto 8.5 (Lucena et al., 2018).

En el Sur de **Taiwán** se genera un estudio para analizar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica basados en la descarga fluvial del río Kaoping, se realiza escenarios mediante el uso de datos de lluvia y temperatura mediante una simulación de Modelo Global Climático denominado en inglés GCMs (Global Climate Models) (Chiang et al., 2013).



Ilustración 7. Localización del río Kaoping de Taiwán

Fuente: (Chiang et al., 2013).

En este estudio, se utiliza el modelo hidrológico de funciones de carga de cuencas hidrográficas por sus siglas en inglés (GWLF: Generalized Watershed Loading Function) para simular la descarga del río Kaoping en los escenarios A2 y B2 según lo publicado por el IPCC (Chiang et al., 2013). Cada línea evolutiva representa un nivel de desarrollo divergente en cuestiones demográficas, sociales, económicas y técnicas, presentando un escenario pesimista u optimista respectivamente (IPCC et al., 2007).

Con el detalle precedente, Jie Lun Chiang establece que, el impacto potencial del cambio climático en la hidroelectricidad en el Sur de Taiwán variará el caudal del río Kaoping de -26% a -15% en la estación seca y de -10% a -82% en la estación húmeda. Es decir, el cambio climático tiene el potencial de alterar la capacidad de producción hidroeléctrica de Taiwán con una variación alta y en la mayoría de los resultados se requiere de planes de mitigación y adaptación climática (Chiang et al., 2013).

En **Mozambique** el investigador Miguel Uamusse analiza el impacto del cambio climático en la producción hidroeléctrica en el Sur de África, se demuestra que la fuente será afectada por el cambio climático persistente a nivel global. El estudio es debido a que la hidroelectricidad representa el 95% de las

contribuciones renovables en la red nacional, pese a que su matriz energética está dominada en 75% de biomasa tradicional como el carbón (M. Uamusse et al., 2017). Sin embargo, Mozambique es uno de los principales estados africanos en utilizar hidroelectricidad, identificando la vulnerabilidad de esta fuente. A continuación, el potencial factible levantado de renovables del país.

Tabla 8. Potencial de energías renovables en Mozambique

| Energía renovable                | Hidroelectricidad | Eólica | Solar | Total factible |
|----------------------------------|-------------------|--------|-------|----------------|
| Potencial [MW]                   | 18,000            | 3,900  | 1,260 | 23160 [MW]     |
| Porcentaje de representación [%] | 78%               | 17%    | 5%    | 100%           |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (M. Uamusse et al., 2017).

Según los registros históricos de precipitación y temperatura de las estaciones en Mozambique muestran que, en general, la temperatura media anual aumentó en 0.6° [C] en 46 años, entre el período de 1960 y 2006, lo que equivale a una tasa media de 0.13° [C] por década (M. M. Uamusse et al., 2020).

Es decir que, la variabilidad del clima, por ejemplo, temperatura y precipitación, contribuirán a la futura escasez hidroeléctrica, el análisis de Miguel Uamusse utiliza un método de regresiones lineales para evaluar escenarios climáticos futuros, entre los resultados se muestra que la temperatura promedio en los primeros 10 años es de 25.4° [C] y los últimos 10 años es de 26.3° [C]; esto significa una diferencia de temperatura de 0.88° [C] que aumentó significativamente, especialmente entre octubre y marzo en la época de lluvias (M. Uamusse et al., 2017).

Los resultados muestran que el cambio climático causará variabilidad en las precipitaciones y sequía en Mozambique (M. M. Uamusse et al., 2020); el país africano es uno de los países más vulnerables del cambio climático debido a que se encuentra en la costa del Océano Indico con relaciones de pobreza extrema e infraestructura deficiente, dicha disminución afectará la hidroelectricidad y expansión energética futura (USAID, 2017).

Es concluyente que, Mozambique analice su matriz energética por las diversas vulnerabilidades, debido que el país actualmente vende hidroelectricidad a Sudáfrica, Botsuana y Zimbabue, la disminución de esta fuente afectará negativamente la economía del país y vecinos (M. Uamusse et al., 2017). Se espera que Mozambique afronte un futuro desafiante como un país de los más bajos del mundo en relación de acceso a la electrificación y que espera que el consumo de electricidad aumente entre un 5% y un 7% anual hasta 2070 debido al aumento de población e inversiones industriales manufacturera y mineras (M. M. Uamusse et al., 2020).

En **China** se evalúa el impacto del cambio climático en el potencial hidroeléctrico en la cuenca del río Nanliujiang, del estudio, se demostró que un modelo hidrológico de capacidad de infiltración variable (CIV) realiza una buena simulación de lluvias con incertidumbre de flujo alto y bajo de agua (Wang et al., 2019).

Combinando el modelo CIV con cinco modelos climáticos, se analizan distribuciones espaciales y temporales hídricas futuras en base a un coeficiente de eficiencia denominado NSE, los resultados reflejan que el cambio climático tiene afectación en el potencial hidroeléctrico en la cuenca del río Nanliujiang, y el modelo utiliza la escorrentía con valores del NSE superiores a 0.7 con un sesgo que no supera  $\pm 20\%$  (Wang et al., 2019).

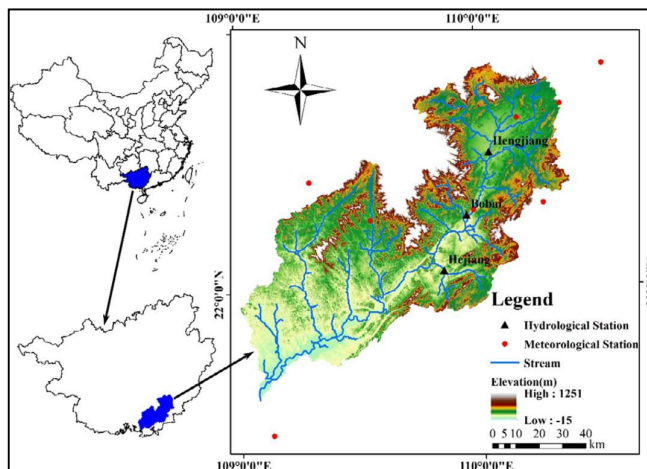


Ilustración 8. Ubicación cuenca del río Nanliujiang en China

Fuente: (Wang et al., 2019).

Los resultados indican diferentes grados de alteraciones del río, se concluye que, según el análisis multimodelo en China, el potencial hidroeléctrico disminuye en todo el año, su porcentaje durante la temporada de inundaciones aumenta, y si bien la escorrentía media mensual disminuye más de un 20% en julio bajo los tres escenarios climáticos, en general también presenta una tendencia creciente en los otros meses de 7.7% a 15.6% (Wang et al., 2019).

Con el fin de evaluar con precisión el impacto del cambio climático en la hidroelectricidad se recomienda un enfoque cuantitativo que combine modelos de climatología, hidrología, econometría e investigación operativa en el futuro para mitigar dichos cambios que van en aumento (X. Z. Li et al., 2018; Wang et al., 2019).

En **Ecuador** estudios mencionan que, ante el colapso climático y ecológico, el mundo tiene como objetivo desarrollar energías renovables, sin embargo, existe preocupación con respecto a los problemas ambientales y ecológicos, especialmente con aquellos que tienen una interacción profunda con su entorno inmediato como el caso de la hidroelectricidad por el uso del agua. Lo que resalta claramente un tema preocupante a considerar en el futuro, ante esto, la hidroenergía no debe ser promovida como una fuente totalmente sostenible y los esquemas hidroeléctricos con represas tienen mucho más impactos medioambientales y ecológicos en comparación con hidroeléctricas de pasada (Briones Hidrovo et al., 2020; Hasan & Wyseure, 2018).



Por otro lado, se encontró que el valor de los servicios eco sistémicos disminuyó con la construcción de centrales hidroeléctricas, la explotación hidroeléctrica implica degradación y supresión de servicios ecológicos, por lo tanto, reduce la capacidad del ecosistema para suministrar todos sus servicios tanto cuantitativa y cualitativamente (Briones Hidrovo et al., 2019). A continuación, las principales cuencas hidrográficas del Ecuador donde se establecen los proyectos hidroeléctricos:

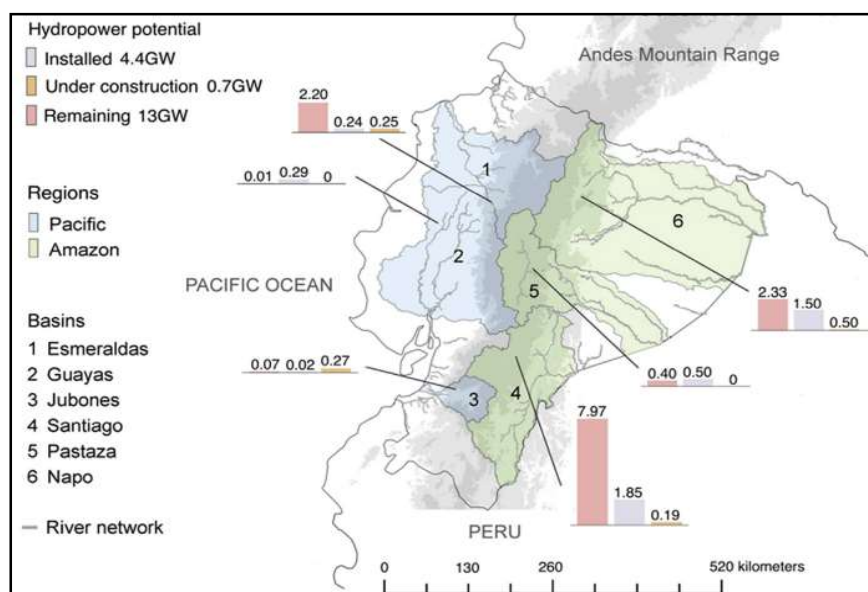


Ilustración 9. Seis principales cuencas del Ecuador y su potencial hidroeléctrico [GW]

Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2013).

En dichas cuencas hidrográficas, simulaciones determinan que los impactos del cambio climático se cuantifican para 2071-2100 en relación con 1971-2000 con un amplio rango de entrada anual, es decir la hidroelectricidad en Ecuador varía entre - 55 y + 39% de la producción histórica media del conjunto climático denominado CMIP5 RCP 4.5 (Carvajal et al., 2017).

La generación hidroeléctrica en Ecuador es altamente incierta y sensible al cambio climático, ya que las variaciones de entrada de agua en las estaciones climáticas resultan cambiantes en el potencial hidroeléctrico esperado, para Ecuador una matriz energética más robusta a largo plazo debe centrarse en una diversificación adecuada de tecnologías de generación con el apoyo a políticas de aumento de energías renovables no convencionales como solar, eólica, mareomotriz y geotérmica (Carvajal et al., 2017).

**En Europa**, Luis Berga, presenta una investigación sobre el papel hidroeléctrico en la mitigación y adaptación del cambio climático, sabiendo que la hidroelectricidad es una fuente renovable que representa el 16% de la electricidad en el mundo cubriendo el 78% renovable según datos del año 2015 (International Hydropower Association, 2019). Los proyectos hidroeléctricos tienen un papel habilitador, como un instrumento de financiamiento para reservorios multipropósito actuando como amortiguadores contra cambios hídricos como inundaciones, pero alteran los sistemas acuíferos en su flujo y libre movimiento (Berga, 2016).

Del estudio, indicadores muestran que países desarrollados con altos ingresos y un alto índice de desarrollo humano per cápita (IDH), la población tiene el 100% de acceso a electricidad, y el consumo medio energético es 8,500 [kWh/año] por habitante. Por el contrario, en países con bajos ingresos y bajo IDH, donde solo el 25% de la población tiene acceso a electricidad y agua (Berga, 2016).

Según, el Consejo Mundial de Energía (WEC por sus siglas en inglés), la hidroelectricidad produce emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sup>2</sup>) por cada [GWh] de 3 a 4 [T] para centrales de tipo de corriente o paso, y de 10 a 33 [T] para hidroeléctricas con reservorio; estos valores son aproximadamente 100 veces menores que las emisiones de energía térmica en centrales eléctricas de carbón convencionales, la hidroelectricidad evita la emisión de 3 [GT] de [CO<sub>2</sub>/año], lo que representa el 9% de emisiones globales anuales de CO<sub>2</sub> (World Energy Council, 2004).

Por otro lado, el Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC, denominado SRREN por sus siglas en inglés, titulado *“Fuentes de energía renovable y mitigación del cambio climático”*, muestra que la mayoría de estimaciones de GEI durante el ciclo hidroeléctrico se encuentran entre 4 y 14 [g.CO<sub>2</sub>.eq/kWh] (Edenhofer et al., 2011). Pero, en general, las estimaciones de gases de efecto invernadero en los proyectos hidroeléctricos son diferentes según los estudios y requieren de mayores análisis debido a que los impactos del cambio climático son variables y localmente diferentes, dependiendo principalmente del caudal de los ríos y efectos climáticos. Por ejemplo, se estima que el potencial hidroeléctrico para toda Europa disminuya en 6% para el año 2070 por las variaciones de temperatura y precipitación (Lehner et al., 2005).

Además, según el Reporte de la biodiversidad y cambio climático del IPCC, la hidroelectricidad hace que de los ríos de más de 1,000 [km], solo el 37% permanece libre durante toda su longitud, y a menudo en regiones muy remotas (IPCC-IPBES, 2020). Además, la construcción de represas para el almacenamiento de agua dulce, y creación de energía hidroeléctrica altera los hábitats para todos los organismos de agua dulce, bloqueando la migración de peces, lo que lleva a la contracción del ecosistema y disminución de fauna (Grill et al., 2019).

En conclusión, la energía hidroeléctrica es una tecnología que contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático a relación de fuentes fósiles, pero, varía la disponibilidad de los recursos hídricos cambiando ecosistemas, y, requiere una cuidadosa atención para adaptación y mitigación porque aumenta los costos no visibles ambientales y sociales que se producen (Berga, 2016).

## **2.2 La hidroelectricidad en el mundo (Contexto global)**

Al 2020, la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica registra una base de datos con 14,000 centrales hidroeléctricas mundialmente, y, en 2018, había 9,380 estaciones individuales por encima de 1 [MW] de capacidad, lo que representa el 89% de la capacidad global total (International Commission on Large Dams, 2021; International Hydropower Association, 2020).

Por otra parte, la hidroelectricidad es la mayor fuente de energía renovable en el sector eléctrico con una participación del 62% de las renovables al 2018, más que otras renovables combinadas 38% (eólica, bioenergía, solar fotovoltaica, oceánica y geotérmica). A pesar de ello, el potencial técnico para una mayor generación hidroeléctrica es tan grande como para cumplir con un despliegue sustancial tanto a mediano (2030) como a largo plazo (2050) con un escenario en más de 8,000 [TWh] para 2050 (Killingtveit, 2019).

Según, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés) en el año 2016 más de 1,000 millones de personas cubrió su demanda con hidroelectricidad y es la tercera fuente más grande de generación energética (International Renewable Energy Agency, 2020b). Por otra parte, para demostrar la amplitud de esta fuente, IRENA produce estadísticas de energía renovable, mostrando los 10 países con mayor capacidad instalada en el año 2021.

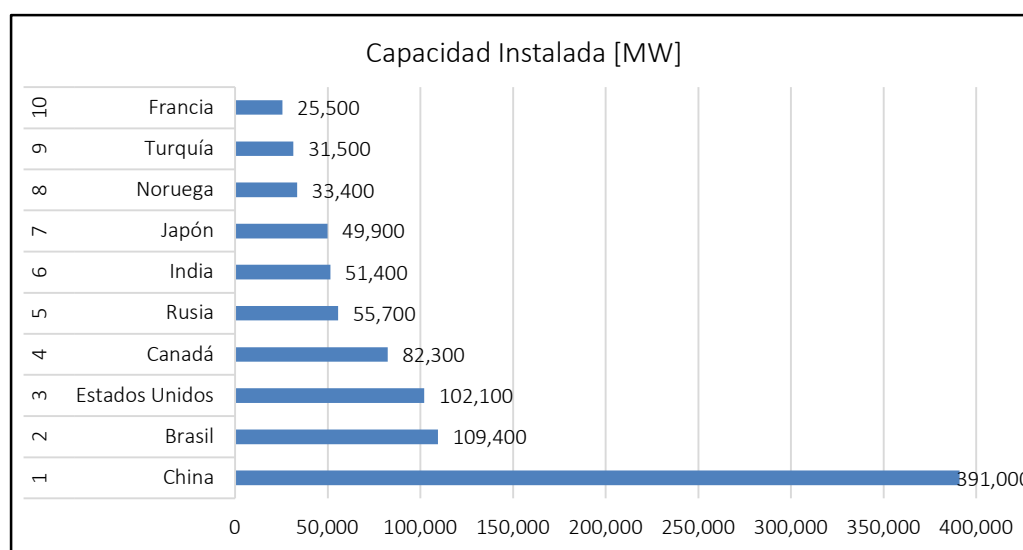


Ilustración 10. Diez países con mayor capacidad hidroeléctrica en 2021

Elaboración: El Investigador

A todo esto, en el año 2018 la capacidad hidroeléctrica global fue 1,292 [GW], y aumenta a una tasa anual compuesta de alrededor del 3.5% en los últimos cinco años (International Hydropower Association, 2019); por consiguiente, actualmente se construyen unos 160 [GW] de capacidad hidroeléctrica, y se planean más de 1,000 [MW], existiendo alrededor de 1,200 grandes represas en construcción en 49 países de todo el mundo, principalmente en Asia, de esto, 347 son presas importantes con una altura de más de 60 [m] (The International Journal on Hydropower, 2015; Zarfl et al., 2015). Seguido una ilustración de los proyectos hidroeléctricos en construcción o planificados globalmente para el 2030.

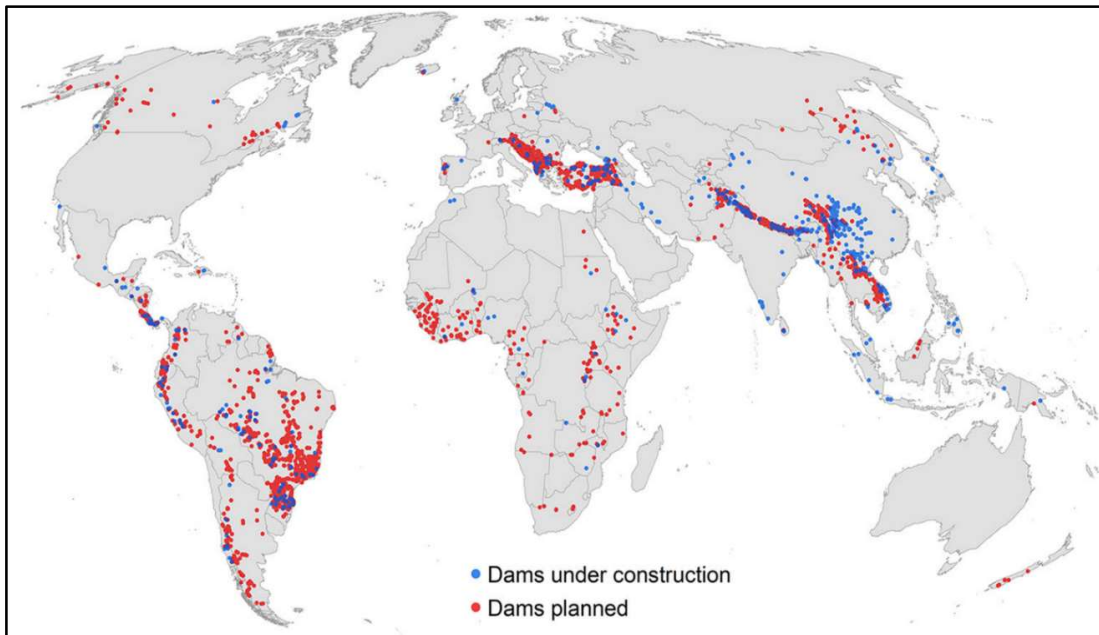


Ilustración 11. Represas hidroeléctricas en construcción y planificadas para el 2030

Fuente: (The International Journal on Hydropower, 2015).

La energía hidroeléctrica se implementa ampliamente en países desarrollados, que aprovechan más del 50% de su potencial técnico viable, y economías emergentes han invertido entre el 20% y el 30% de su potencial. África es un caso extremo, donde solo el 7% del potencial hidroeléctrico es ejecutado (Berga, 2016).

En este contexto, delimitando los grandes proyectos actuales, se desarrolla la siguiente tabla de las veinte (20) centrales hidroeléctricas más representativas en capacidad instalada en el mundo clasificadas por país, año de operación y otros datos, estableciendo que la central hidroenergética Bratsk en Rusia que utiliza el caudal del río Angara es la más antigua con 56 años de operación desde el 1967 al 2023 (Kuriqi et al., 2019; Roca, 2015).

Tabla 9. Principales hidroeléctricas mundialmente

| No.   | Hidroeléctrica                      | País                 | Río               | Año de arranque | Potencia [MW] | Producción Anual Máxima [TWh] | Factor de Potencia (F.P.) | Área inundada [km <sup>2</sup> ] |
|---|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 1   | Tres Gargantas                      | China                | Yangthe           | 2011            | 22500         | 80.8                          | 0.41                      | 1045                             |
| 2   | Itaipú                              | Brasil / Paraguay    | Paraná            | 2003            | 14000         | 98.6                          | 0.80                      | 1350                             |
| 3   | Xiluodu                             | China                | Jinsha            | 2013            | 13900         | 90                            | 0.74                      |                                  |
| 4   | Guri - Hidroeléctrica Simón Bolívar | Venezuela            | Caroní            | 1986            | 10200         | 46                            | 0.51                      | 4250                             |
| 5   | Tucuruí                             | Brasil               | Tocantins         | 1984            | 8370          | 41                            | 0.56                      | 3014                             |
| 6   | Grand Coulee                        | EE. UU.              | Columbia          | 1980            | 6809          | 20                            | 0.34                      |                                  |
| 7   | Xiangjiaba                          | China                | Jinsha            | 2015            | 6445          | 30.7                          | 0.54                      | 95,6                             |
| 8   | Longtan                             | China                | Hongshui          | 2009            | 6426          | 18.7                          | 0.33                      |                                  |
| 9   | Sayanogorsk                         | Rusia                | Yeneséi           | 1989            | 6400          | 26.8                          | 0.48                      | 621                              |
| 10  | Krasnoyarsk                         | Rusia                | Yeneséi           | 1972            | 6000          | 20.4                          | 0.39                      | 2130                             |
| 11  | Churchill Falls                     | Canadá               | Churchill         | 1971            | 5429          | 35                            | 0.74                      | 6988                             |
| 12  | Bratsk                              | Rusia                | Angara            | 1967            | 4500          | 22.6                          | 0.57                      | 5470                             |
| 13  | Ust-Ilimsk                          | Rusia                | Angara            | 1980            | 4320          | 21.7                          | 0.57                      | 1873                             |
| 14  | Yacyretá                            | Argentina - Paraguay | Paraná            | 1998            | 4050          | 19.2                          | 0.54                      | 1600                             |
| <b>Hidroeléctrica Río Santiago (Proyectado)</b> |                                     | Ecuador              | Zamora - Santiago | 2021            | 3600          | 26                            | S/D                       | S/D                              |
| 15  | Tarbela                             | Pakistán             | Indo              | 1976            | 3478          | 13                            | 0.43                      | 250                              |
| 16  | Ertan                               | China                | Yalong            | 1999            | 3300          | 17                            | 0.59                      | 101                              |
| 17  | Macagua                             | Venezuela            | Caroní            | 2010            | 3168          | 15.2                          | 0.55                      | 47,4                             |
| 18  | Nurek                               | Tayikistán           | Vajsh             | 1985            | 3003          | 11.2                          | 0.43                      |                                  |
| 19  | Goupitan                            | China                | Wu                | 2011            | 3000          | 9.67                          | 0.37                      | 94,29                            |
| 20  | Boguchany                           | Rusia                | Angará            | 2013            | 2997          | 17.60                         | 0.67                      | 2326                             |
| <b>Promedio de 20 proyectos principales</b>     |                                     |                      |                   | <b>1994</b>     | <b>6915</b>   | <b>33</b>                     | <b>0.53</b>               | <b>1953</b>                      |
| 32  | Coca Codo Sinclair                  | Ecuador              | Coca              | 2017            | 1500          | 9.73                          | 0.9                       | 800                              |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Kuriqi et al., 2019; Roca, 2015).

Como parte del análisis de la tabla precedente se expone el factor de potencia de cada proyecto, el cual, en promedio de las 20 centrales enunciadas, es [0.53] demostrando una eficiencia baja en relación a la potencia con la cual, cada proyecto se construyó, este promedio se despliega debido a que en el Capítulo V de Análisis y Discusión se generarán comparaciones de este indicador.

Adicional, se tiene un promedio de vida de 28 años de las plantas con una potencia promedio de 6,915 [MW], adicionalmente, a continuación, se menciona la fórmula del factor de potencia con el cual se establecen los valores:

$$E = P \times H \times F.P. \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- E: Energía [TWh]. P: Potencia [MW]. F.P.: Factor de potencia
- H: Horas de trabajo, teniendo en cuenta que las horas efectivas de un proyecto son 8,760 año.

Despejando el valor del factor de potencia se tiene que:

$$F.P. = \frac{E}{P \times H} \quad \text{Ecuación 2}$$

Con los datos de los proyectos más representativos, seguido el detalle del crecimiento hidroenergético desde el año 2000 al 2021 a nivel mundial por continentes.

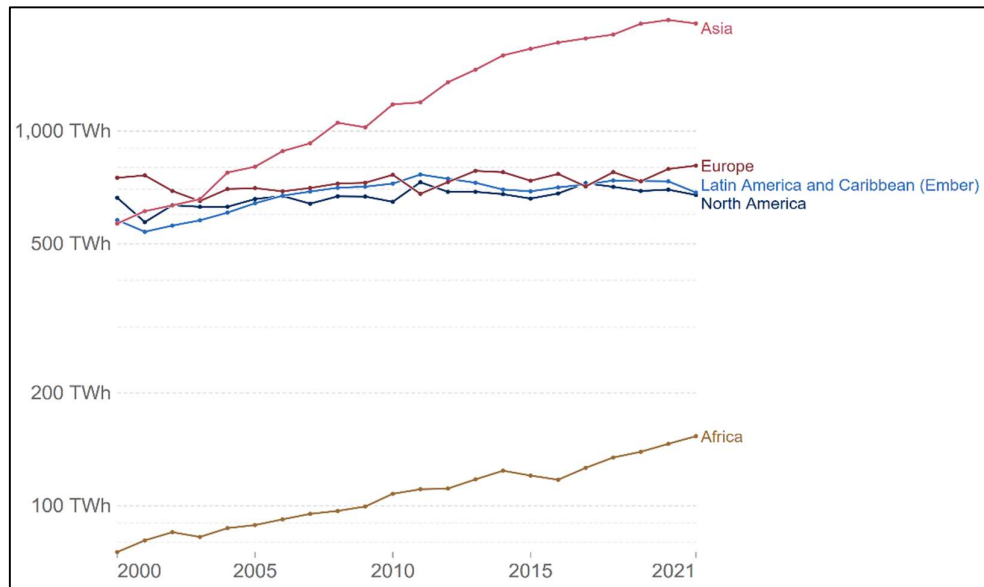


Ilustración 12. Crecimiento hidroeléctrico mundial período (2000-2021) en [TWh]

Fuente: (Ritchie & Roser, 2022)

Como se muestra el crecimiento hidroeléctrico es amplio en los últimos años, la región de América Latina, el Caribe y África son ricas en recursos energéticos renovables, sin embargo, globalmente se estima que

apenas un 22% del potencial hidroeléctrico y un 4.2% de las restantes energías renovables son aprovechadas en la actualidad (Killingtveit, 2019).

### 2.3 Políticas de desarrollo e hidroelectricidad

La disponibilidad de agua, tal como el crecimiento demográfico y cambio en el uso de suelo asociado con la urbanización, desarrollo industrial y agricultura se discuten en instancias políticas y de gobernabilidad, por tal motivo, evaluar el potencial de cambio futuro hidroeléctrico es un paso importante para garantizar que los proyectos cumplan con metas operacionales, financieras y económicas alineadas a políticas de sostenibilidad. Es por esto que a continuación, se mencionan las siguientes conclusiones científicas de la recolección de varios estudios.

- Scherer (2016) menciona que la hidroelectricidad genera impactos en la calidad y cantidad de agua, el desarrollo hidroeléctrico depende del consumo de mucha agua, desde la construcción hasta llenar la superficie del embalse contribuyendo a la escasez hídrica. (Scherer & Pfister, 2016).
- Van Vliet (2016) proyecta disminuciones en la capacidad utilizable de energía hidroeléctrica media global de 0.4% a 6.1% en los Escenarios de Concentración Representativa (RCP por sus siglas en inglés), RCP 2.6 a RCP 8.5 para la década de 2080 en relación con 1971-2000 debido a reducciones hídricas en Estados Unidos, Europa, Asia Oriental, América del Sur, África del Sur y Australia donde se programan aumentos de temperatura combinados con reducciones del flujo medio anual de agua (M. Van Vliet et al., 2016).
- Lehner (2005) estima que el potencial hidroeléctrico para toda Europa disminuirá en 6% para el año 2070 en base a un estudio que georreferencia 5,991 centrales hidroeléctricas europeas y las distingue en estaciones de pasada y embalse. Además, proyecta un patrón hidroeléctrico estable para Europa Occidental y Central, y, se espera, una disminución del 20% al 50% en todo el Mediterráneo, mientras que en general la hidroelectricidad desarrollada disminuirá del 7-12% (Lehner et al., 2005).
- Mattmann (2016) genera un meta análisis de las externalidades de la hidroelectricidad con la ayuda de una base de datos que consta de 81 observaciones derivadas de 29 estudios que valoran los impactos de la hidroelectricidad en el mercado. El estudio genera evidencia de aberración pública hacia la construcción de proyectos hidroeléctricos por el cambio de paisajes, daño de vegetación y muerte de vida silvestre. Además, existe resistencia a centrales hidroeléctricas en áreas donde el potencial negativo externo es amplio, por ejemplo, en áreas de conservación; el investigador recomienda que las centrales hidroeléctricas deben planificarse donde tienen el menor impacto posible al ambiente y poblaciones (Mattmann et al., 2016).
- Rasul (2019) analiza el Sur de Asia específicamente Bangladesh, Bután, Nepal, India, Pakistán y Afganistán, región pobre en energía, con cuencas de agua estresadas y deficiente en la producción de

alimentos, se espera que estos problemas se intensifiquen, por consiguiente, se estudió, el más allá de la energía hidroeléctrica buscando soluciones integradas para el nexo agua, energía y seguridad alimentaria. Se determinó que en esta región la demanda de agua, energía y alimentos crece, y la escasez de recursos aumenta, presentando una amenaza para la sostenibilidad (Rasul et al., 2019). Además, el cambio climático y su cascada de efectos e impactos agravan los desafíos, en consecuencia, el desarrollo hidroeléctrico desempeñará un papel fundamental para la seguridad energética en Asia meridional pero no para la seguridad hídrica (P. Zhang et al., 2019).

- Antwi (2018) establece que en África el cambio climático genera un cambio social que muestra un impacto en la generación hidroeléctrica, en base a estudios, se muestra que el cambio climático variará hasta un 3% la hidroelectricidad para el año 2050, lo que implica que el continente generaría incapacidad para adaptarse a estos cambios dando lugar a varias amenazas sociales como sequías frecuentes, pobreza, enfermedades, hambruna, conflictos y otros eventos (Antwi & Sedegah, 2018; Kling et al., 2016).
- Hofstra (2019) presenta una evaluación global de la vulnerabilidad de la producción hidroeléctrica y termoeléctrica del mundo por el cambio climático, se prueban opciones de adaptación sostenible del agua y energía mediante un modelado hidrológico acoplado, del estudio se muestra una reducción en la capacidad utilizable en las plantas hidroeléctricas y termoeléctricas entre el 61% – 74% para el escenario de tiempo 2040–2069 (Hofstra et al., 2019).
- Li (2015), menciona que una actividad energética importante actual es el desarrollo hidroeléctrico que proporciona renovables, así como beneficios socioeconómicos; sin embargo, la construcción de grandes represas, instalación de tuberías, barreras y equipos hidroeléctricos inevitablemente dañan o incluso destruyen ecosistemas a diferentes escalas espaciales como bosques, seres vivos, flujo de agua de ríos y cuencas. Además, el estudio concluye que la capacidad instalada óptima de los proyectos hidroeléctricos debería ser superior a 5 [MW] porque se espera que el costo de la pérdida ecológica por kWh sea menor a partir de esta capacidad (X. J. Li et al., 2015).

A fines de la década de 1980, el paradigma analítico de desarrollo fue alterado con preocupaciones ambientales y sostenibles, y, las políticas de crecimiento sostenible centran su discusión en la calidad y gestión de recursos naturales renovables y no renovables, por lo cual, la contaminación causada por energía no renovable y renovable es un problema importante porque los seres humanos se enfrentan a la doble presión, el crecimiento económico y protección del medio ambiente (Jin et al., 2016), a continuación, un gráfico de la relación de la política, gobernanza e hidroelectricidad mediante la información levantada.



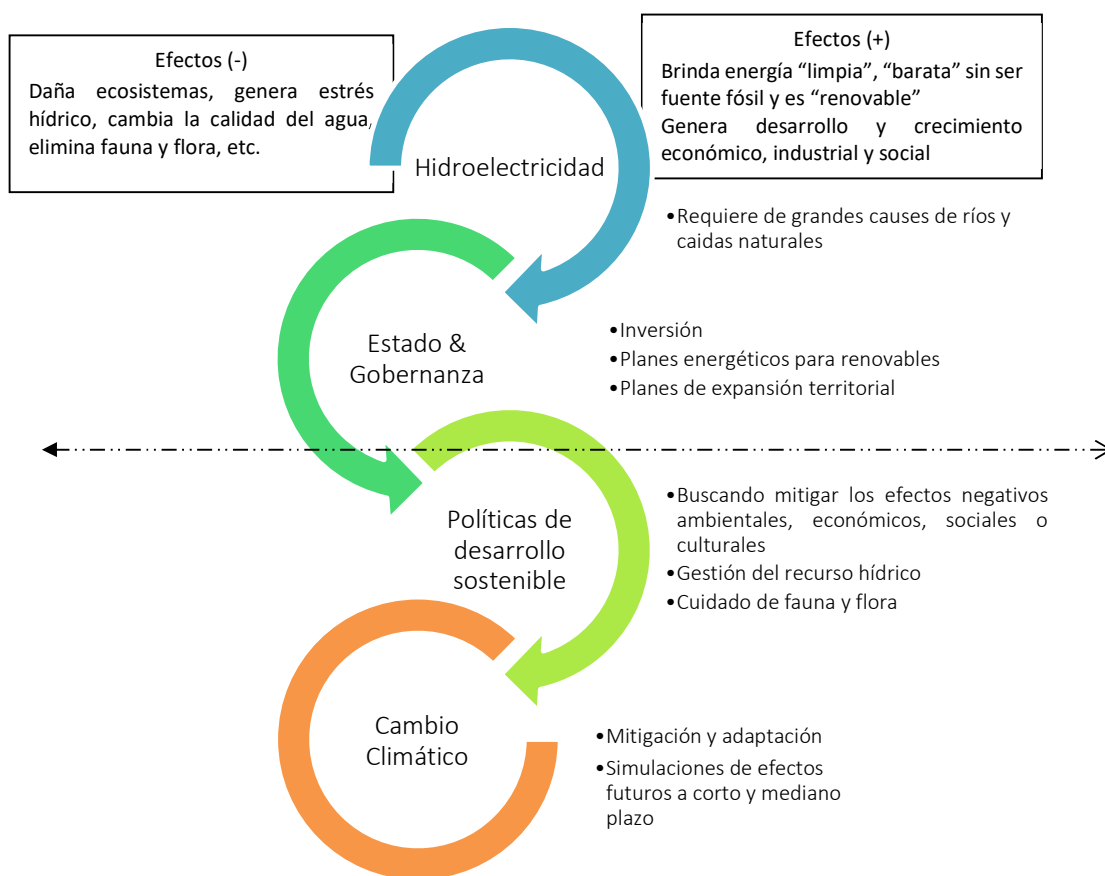


Ilustración 13. Relación entre hidroelectricidad, políticas de desarrollo y gobernanza

Elaboración: El Investigador

El investigador Melike Bildirici analizó la relación entre el crecimiento económico y consumo de energía hidroeléctrica, respaldando que, el crecimiento en los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) integrada por 36 países con ingresos altos tiene relación directa con la hidroelectricidad, es decir, la hidroelectricidad y crecimiento económico son complementarios y un aumento del consumo de energía estimula el crecimiento económico y viceversa. El estudio definió que la hidroelectricidad puede implementarse con pocos efectos adversos sobre la economía, pero en una economía global dependiente de recursos naturales no se tiene el resultado positivo esperado al ambiente (Bildirici, 2016).

En consecuencia, es importante examinar las implicaciones de la hidroelectricidad en la distribución de recursos hídricos que compiten entre sí, con el fin de brindar soluciones desde una perspectiva política de desarrollo consiente buscando el punto medio que mitigue conflictos y asegure que dichos proyectos ofrezcan energía sostenible en base a planes y programas de políticas asertivas.

## 2.4 Metas de la hidroelectricidad

Desde la peor sequía en Brasil en 80 años en el 2017, a nevadas récord en Norte América en el año 2018, el tema de la seguridad hídrica es noticia en varias revistas y diarios del mundo, y, es que, el cambio

climático agrava estos fenómenos cada vez más extremos. En los Andes Latinoamericanos, por ejemplo, desaparecen rápidamente glaciares que afectan el suministro de agua en ciudades como La Paz en Bolivia, o, Quito en Ecuador (Banco Interamericano de Desarrollo, 2018).

Al ser, la hidroelectricidad basada en el uso hídrico merece un análisis de sus metas; actualmente la energía hidroeléctrica es fuerte en la mayoría de países Latinoamericanos, Asiáticos y de ciertas áreas de Europa, pero, existen grandes riesgos por los cambios persistentes en caudales y disponibilidad de agua; en este sentido de acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) los recursos hídricos que proveen a las centras hidroeléctricas dependen de la resolución de metas técnicas por los países como cuidado de la biodiversidad, prevención de cobertura vegetal por la presencia de grandes instalaciones, cambio de propiedades fisicoquímicas en el almacenamiento de agua y altos niveles de demanda energética (BID. Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente, 2019).

En este contexto, un ejemplo, es el análisis generado en Ecuador, Pablo Carvajal, determina que las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) basadas en hidroelectricidad son altamente vulnerables a la aparición de un escenario de clima seco en la región del Amazonas, y, dado el patrón de lluvias estacionales de Ecuador, la matriz energética siempre requerirá de respaldo eléctrico de combustible fósil o renovable, independiente de la cantidad de energía hidroeléctrica instalada, el estudio establece que la meta de NDC para el sector eléctrico se lograría sin el despliegue de gran infraestructura hidroeléctrica, a través de una cartera más diversificada y con energía no necesariamente renovable (Carvajal et al., 2019).

Por otra parte dentro de las metas de esta renovable, se destaca el premio Blue Planet que considera buenas prácticas de sostenibilidad a proyectos hidroeléctricos, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad entrega anualmente reconocimientos evaluando aspectos financieros, técnicos, ambientales y sociales indicando si se aplicaron buenas prácticas en 20 temas, y cinco (5) de esos puntos son para el desarrollo de destrezas en la construcción de las centrales, dichos 5 puntos principales evaluados son:

Tabla 10. Consideraciones del premio Blue Planet para el desarrollo hidroeléctrico

| Ítem | Punto                              | Consideración  |
|------|------------------------------------|--|
| 1    | Salud pública                      | Evitar enfermedades, minimizar condiciones de vulnerabilidad de trabajadores y comunidades aledañas en la construcción del proyecto es necesaria con la evaluación de planes de salud pública.   |
| 2    | Ruido y calidad del aire           | El ruido y calidad de aire es afectado por el desarrollo hídrico de manera directa, la identificación de impactos residuales en la biodiversidad y residuos requieren de medidas de compensación y diseño, al respecto, una importante consideración es generar planes continuos en la búsqueda armónica entre los proyectos hidroeléctricos y medio ambiente. |
| 3    | Biodiversidad y manejo de residuos |  |

|   |                             |  |
|---|-----------------------------|--|
| 4 | Reasentamiento humano       | Los impactos sociales negativos y positivos requieren ser comunicados con las comunidades aledañas asociados con la instalación hidroeléctrica de forma que se gestionen compromisos ambientales y sociales considerando |
| 5 | La comunicación y consultas | enfoques de desarrollo con una viabilidad que acompañe el proyecto.  |

Fuente: (IHA, 2019).

Los puntos principales del premio Blue Planet buscan lograr metas en los proyectos hidroeléctricos relacionando la sostenibilidad en base a resultados obtenidos en la aplicación del Protocolo de Evaluación de la Sostenibilidad (HSAP) mencionado previamente, donde un equipo técnico acreditado por la Asociación Internacional de Hidroelectricidad evalúa los proyectos, a través de visitas de campo, entrevistas a comunidades y líderes locales, con la participación de personal involucrado en cada proyecto (International Hydropower Association, 2018a, 2018b).

El desarrollo de proyectos hidroeléctricos trae beneficios, pero conlleva impactos inevitables, por lo tanto, estos impactos deben evaluarse con estudios detallados; la energía hidroeléctrica puede aportar una variedad de beneficios a las comunidades si se construye en el lugar correcto y sigue criterios de sostenibilidad; sin embargo, sin seguir pautas, procedimientos, protocolos, normas y medidas de seguridad adecuados durante la ejecución del proyecto, puede causar amplios riesgos y desafíos (Shaktawat & Vadhera, 2021).

Las metas para la sostenibilidad de la producción hidroeléctrica son marcos regulatorios de distribución y uso responsable de agua con el fin de apoyar la vulnerabilidad de ecosistemas y asegurar análisis de sostenibilidad en futuros proyectos hidroeléctricos.

Adicional, a causa de referenciar el futuro de la hidroelectricidad, los avances en las turbinas "*amigables con el ambiente*" y técnicas mejoradas de recolección de datos para aumentar la efectividad de las tecnologías hidroeléctricas de paso, crean oportunidades en la infraestructura hidroenergética actual para operar de manera que minimicen los impactos ambientales (Union of Concerned Scientists, 2014).

El futuro de la hidroelectricidad busca utilizar modelos y estudios que aumenten la potencia de generación en proyectos hidroeléctricos existentes o expandir nuevos de manera sostenible, actualizando equipos y verificando la eficiencia a largo plazo del proyecto que requiere una evaluación exhaustiva basada en información científica del uso de los recursos hídricos integrando efectos sociales, ambientales, técnicos y de cambio climático por el desarrollo de estas centrales renovables de energía "*limpia*".

## 2.5 Relación de las variables y fenómenos

Bajo la información recolectada del Estado del Arte, y sustento investigativo del problema, se propone a estudiar como brecha del conocimiento los siguientes aspectos, fenómenos y variables:

Aspectos: Hidroelectricidad y su relación con la sostenibilidad

Fenómenos: La hidroelectricidad y sus impactos

Variables: Sociales, Ambientales, y Técnicas

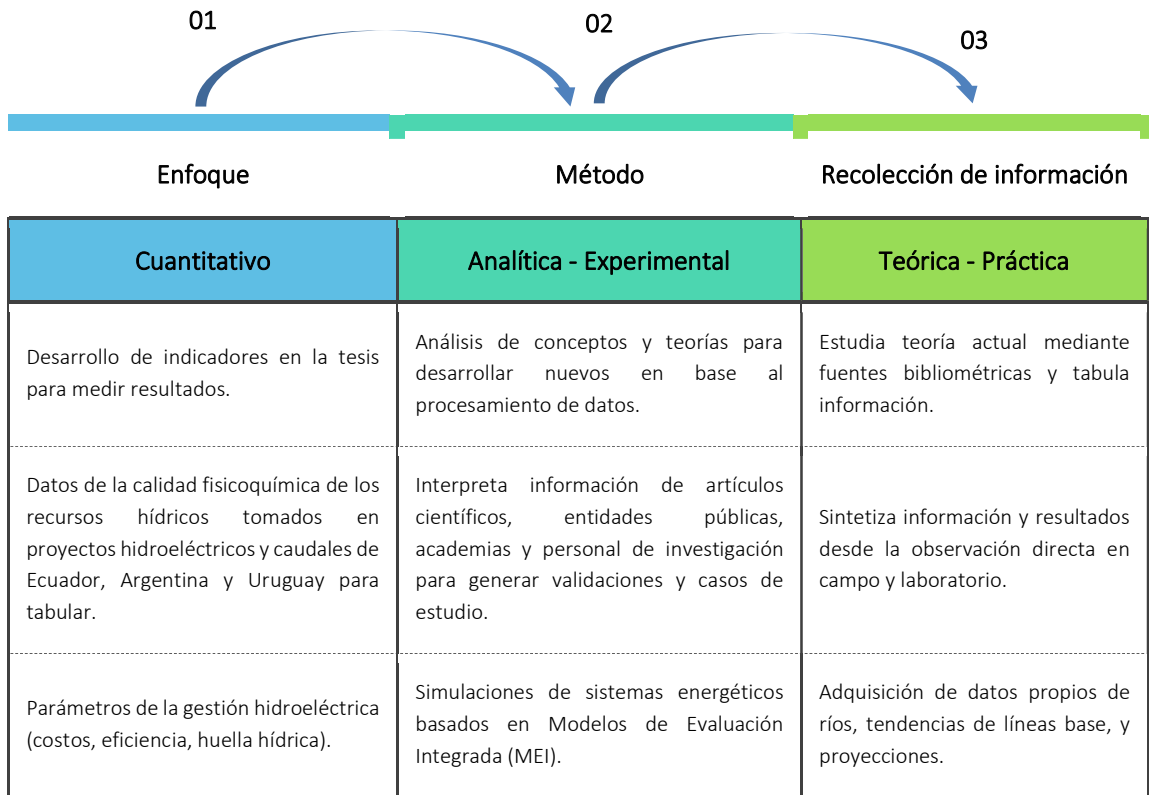
De los datos de la investigación se muestra que falta por estudiar y consolidar en base a los hallazgos como las variables sociales, ambientales y técnicas se reflejan en afectaciones por el despliegue de los proyectos hidroeléctricos, así es necesario estudiarlos al relacionar análisis de sostenibilidad para evitar inversiones agresivas con el ambiente, ineficientes en el tiempo o que aún más complicado dañen los ecosistemas aledaños; en el Capítulo III se determinará como se generará el análisis y metodología investigativa.

## Capítulo III

### 3. Descripción de la Metodología

A continuación, se presenta la metodología propuesta para el trabajo investigativo explicando el enfoque, método y tipo de recolección de información:

Tabla 11. Metodología investigativa



Elaboración: El Investigador

Con el fin de potenciar la capacidad de analizar, reunir, gestionar e interpretar datos sobre los recursos hídricos y mejorar la producción hidroeléctrica, se busca el desarrollo de un instrumento que integre la hidroenergía y sostenibilidad en la toma de decisiones.

#### 3.1 Tipo de investigación

La investigación está enfocada en el marco a continuación delimitado:

Líneas: Sostenibilidad, Energías renovables y Eficiencia energética,

Sub - líneas: Gestión de la demanda hidroeléctrica,

Área: Energías renovables,

Aspecto: Hidroelectricidad,

Temporal: Año 2019-2023.

Con la metodología investigativa determinada, se examinará información como calidad del agua, temperatura de los proyectos de Ecuador, huella hídrica de varios países, entre otros datos, así como vulnerabilidad del recurso para proponer políticas, para esto, se utilizarán Modelos Energéticos de Evaluación Integrada (MEI), tabulaciones estadísticas y proyecciones de escenarios para analizar a corto y mediano plazo el despliegue en la generación hidroeléctrica.

Además, se modelarán parámetros y criterios cuantitativos buscando evitar el uso irracional hidroeléctrico, por tal motivo, como la Tabla 11 la metodología de la investigación es analítica experimental basada en desarrollar nuevos conceptos que amplíen las fronteras del conocimiento, a través de una investigación original sobre la hidroelectricidad en las condiciones actuales del planeta.

### **3.2 Estrategia metódica**

Como estrategia metódica se plantean preguntas relacionadas con los objetivos específicos de la tesis, el fin es comparar su trascendencia y definir lineamientos investigativos en base a inquietudes. A continuación, se desenvuelven las preguntas investigativas relacionadas con el tema en curso.

#### **OE 1. Identificar los parámetros sociales, ambientales y técnicos que intervienen en la producción de la energía hidroeléctrica mundial.**

Preguntas:

P 1.1. ¿Cuáles son los principales parámetros que intervienen en la producción de la energía hidroeléctrica?

P 1.2. ¿Es contradictorio el interés de desarrollo sostenible y producción hidroeléctrica?

P 1.3. ¿Cuáles son los estudios necesarios de análisis que requieren el desarrollo sostenible de la energía hidroeléctrica?

#### **OE 2. Establecer un instrumento de evaluación de los proyectos hidroeléctricos bajo una dimensión técnica, económica y social buscando la correlación entre ellas.**

Preguntas:

P 2.1. ¿Cuáles son los impactos sociales, ambientales y técnicos que generan los proyectos hidroeléctricos?

P 2.2. ¿Cuáles son los principales proyectos hidroeléctricos y países que fundamentan su matriz energética en la producción de esta renovable?

P 2.3. ¿Cuál es la complejidad de generar un instrumento para gestionar la producción hidroeléctrica de manera sostenible?

**OE 3. Realizar un análisis crítico y de evaluación de la sostenibilidad hidroeléctrica para desarrollar ámbitos de conocimiento, contextos académicos, profesionales de avance científico y social de la hidroenergía dentro de una sociedad globalizada con poca conciencia ambiental.**

Preguntas:

P 3.1. ¿Cuál es la relación entre la producción de energía hidroeléctrica y la sostenibilidad?

P 3.2. ¿Cómo se desarrolla conocimiento nuevo en ámbitos técnicos, sociales y ambientales relacionados a la producción hidroeléctrica?

**OE 4. Analizar la percepción de las poblaciones aledañas a los proyectos hidroeléctricos del Ecuador, así como la expansión de la producción hidroeléctrica a largo plazo con posibles escenarios.**

Preguntas:

P 4.1. ¿La producción hidroeléctrica en el Ecuador se expande conociendo la percepción de las poblaciones cercanas a los proyectos?

P 4.2. ¿Cuáles son los escenarios futuros para los sistemas hidroeléctricos?

#### **4.3 Técnicas implementadas**

Como se muestra, se plantean preguntas específicas para cada objetivo específico de la tesis buscando el desarrollo del tema mediante el análisis interpretativo de datos en base a consultas bibliográficas, análisis experimentales y trabajo de campo, lo que terminará en las conclusiones de esta tesis doctoral. Finalmente, en la tabla siguiente se detalla el conjunto de técnicas para implementar en relación con los objetivos específicos y preguntas desplegadas.

Tabla 12. Técnicas implementadas

| Objetivo específico | Pregunta | Técnicas implementadas  |
|---------------------|----------|---|
| OE 1                | P 1.1.   | Recolección de información metódica, la mayoría de la información del desarrollo hidroeléctrico e infraestructura se ubica en páginas electrónicas de los proyectos, universidades técnicas y entidades relacionadas al desarrollo energético global.                           |
|                     | P 1.2.   |   |
|                     | P 1.3.   | Análisis interpretativos a lo largo del desarrollo de la investigación desarrollando estudios, acercamientos a partir de información realizada en torno a hidroeléctricas desarrolladas.  |
| OE 2                | P 2.1.   | Entrevistas telefónicas, presenciales o electrónicas con técnicos, investigadores u otros actores que conozcan del desarrollo y producción hidroeléctrica con sus diversas afectaciones.  |
|                     | P 2.2.   | Consulta bibliográfica y de publicaciones científicas en la red de repositorios digitales reconocidos.  |
|                     | P 2.3.   | Análisis del discurso de los actores identificados y comprometidos con la sostenibilidad hídrica, se contempla la posibilidad de realizar entrevistas por medio telefónico o electrónico.   |
| OE 3                | P 3.1.   | Pruebas de calidad de agua, ensayos y análisis de impacto en el tiempo, se prestará atención a sistemas georeferenciados de entidades o actores estatales.  |
|                     | P 3.2.   | Consulta bibliográfica y de publicaciones científicas en la red de repositorios digitales reconocidos.  |
| OE 4                | P 4.1.   | Encuestas a poblaciones específicas que estén cerca a proyectos hidroeléctricos desarrollados en el Ecuador.  |
|                     | P 4.2.   | Simulaciones de sistemas eléctricos con modelos de evaluación integrada, estadísticas y proyecciones del desarrollo energético con la recolección de información de entidades públicas o privadas, la mayoría de la información sobre el desarrollo hidroeléctrico del Ecuador. |

Elaboración: El Investigador



## Capítulo IV

### 4. Del Estado del Arte a la Tesis Doctoral

Con las investigaciones enunciadas del Capítulo II, se muestra, que en la actualidad es necesario generar análisis más amplios de los proyectos hidroenergéticos que en varios países, se sirven del recurso hídrico existente en la naturaleza para su explotación. Melike Bildirici define que *“El consumo de energía hidroeléctrica y el crecimiento económico son complementarios y un aumento en el consumo de energía estimula el crecimiento económico, y viceversa...”* (Bildirici, 2016). Si bien es cierto, los proyectos hidroeléctricos brindan energía “limpia” y desarrollo, dependen de una ubicación específica, estratégica y de un tipo ideal de infraestructura, lo cual, crea problemas en temas sociales, económicos, políticos y ambientales por utilizar agua dulce (Lima & Lall, 2010).

Globalmente la producción de hidroenergía presenta una visión macro de las ventajas, pero poco se discute de las desventajas y problemas que se desarrollan por la construcción de estas estructuras y sus sistemas cercanos, de ahí que, el Estado del Arte de la investigación se relaciona con el objetivo de analizar la producción hidroeléctrica en base a implicaciones en la sostenibilidad energética. Wang Hejia (2019) mencionó que con el fin de evaluar con precisión impactos en el potencial hidroeléctrico se debe ejecutar *“...un enfoque cuantitativo que combine modelos de climatología, hidrología, econometría e investigación operativa en el futuro”* (Wang et al., 2019).

El agua dulce y energía son dos recursos esenciales para la vida, sin embargo, la situación actual de ambas y perspectivas futuras a nivel global, se reflejan en una palabra “escasez”. En el contexto actual, de variaciones estacionales, de los conocidos efectos del cambio climático y una creciente población mundial que requiere de mayor demanda y competencia por agua y energía, llega el momento de integrar la gestión de estos recursos sabiendo que intrínsecamente se relacionan (Aguilera-Klink & Alcántara, 1994).

Luis Berga menciona que la disponibilidad hidroeléctrica requiere de una cuidadosa atención para mitigar los importantes costos ambientales y sociales, y es probable que el cambio climático altere los caudales de los ríos, lo que tendrá como resultado impactos en la generación (Berga, 2016), con estas ideas, a continuación, un gráfico de la relación de la hidroelectricidad, agua, energía y sostenibilidad en base a los conceptos recolectados del estado del arte:

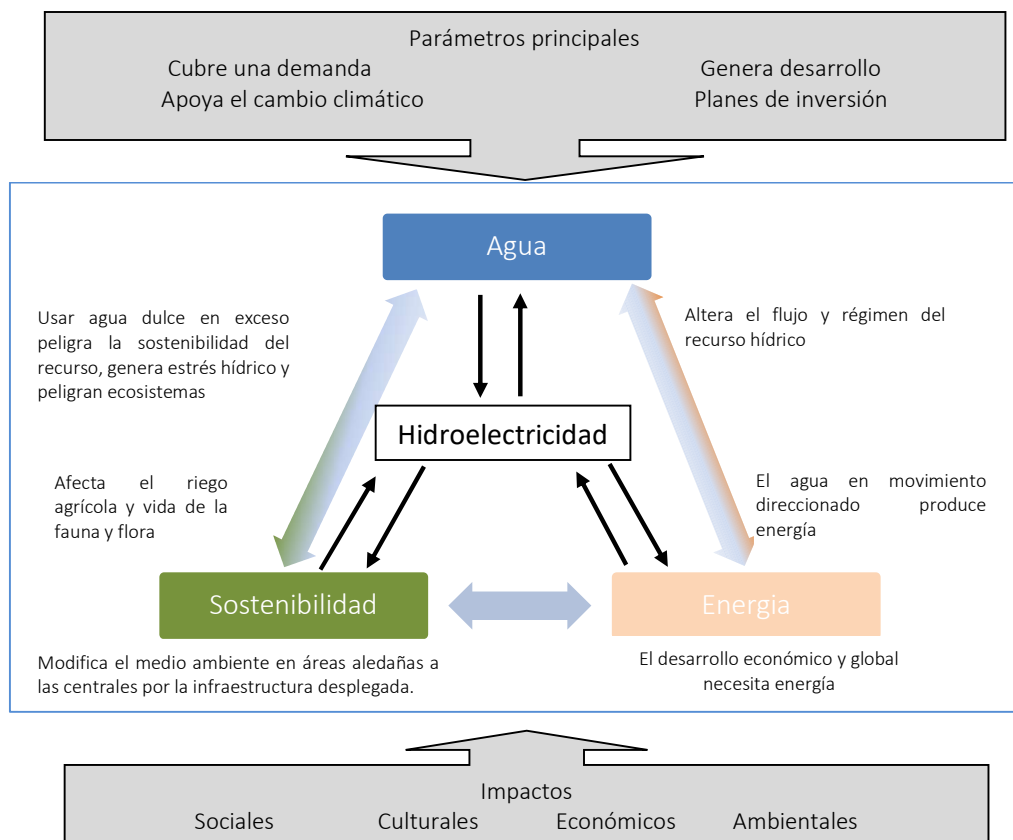


Ilustración 14. Relación hidroelectricidad, agua, energía y sostenibilidad

Elaboración: El Investigador

El uso de los recursos naturales como el hídrico en la producción de energía obligan a generar análisis climáticos, introducir balances energéticos y estudios de huella hídrica como opciones de acercamiento a cambios para la anhelada sostenibilidad. Zhang, Xiao menciona que la hidroelectricidad *“genera considerables impactos que deben tenerse en cuenta durante la planificación y gestión de los proyectos hidroeléctricos para minimizar los efectos adversos...”* (X. Zhang et al., 2018).

Si bien, las energías renovables son un tema prioritario de acción global y existe un amplio potencial hidroeléctrico, es necesario diversificar la energía eólica y solar para evitar cambios con la construcción de represas e infraestructura gigantesca hidroeléctrica que afecta el flujo de los ríos (Alarcon, 2019; Peng et al., 2019). En este orden, la relación de trabajo de las centrales hidroenergéticas muestra variables positivas y negativas, a continuación, se enuncian ventajas y desventajas recolectadas del Estado del Arte como una introducción del tema a la tesis donde se definen 15 parámetros que se pueden discutir y comparar, estos parámetros son presentados en base a la información recolectada y sirven como referencia del estado actual apreciado, analizado e investigado por diversos autores.

Tabla 13. Ventas y desventajas de la hidroelectricidad

| No. | Parámetro                      | Ventajas  | Desventajas  |
|-----|--------------------------------|---|--|
| 1   | Infraestructura                | Ofrece instalaciones para el control de inundaciones, lo que normalmente causa un efecto deseado cuando se construye una represa multipropósito para el control de crecidas, conservando el agua durante temporadas áridas, en una sola zona de manera controlada (Ponce-Jara et al., 2018).  | La presa controla el caudal del río donde se ubica, pero altera y desequilibra la vida acuática antes y después del embalse. Además, fragmentan y transforman los ríos del mundo, destruyendo ecosistemas y reduciendo dramáticamente los recursos pesqueros (IPCC-IPBES, 2020).   |
| 2   | Emisiones                      | Potencial de reducción de emisiones de carbono en el sistema eléctrico debido a las bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se generan en relación con fuentes fósiles como el carbón. El Informe Especial de Escenarios de Emisiones (SRREN) del IPCC muestra que los GEI durante el ciclo de la energía hidroeléctrica son entre 4 y 14 [g.CO2.eq/kW·h] a comparación del carbón que produce hasta 1,000 [g.CO2.eq/kW·h] (Edenhofer et al., 2011). | Gases de efecto invernadero en hidroeléctricas con represas donde se reduce o agota el oxígeno en el agua embalsada, además, de la interrupción de las rutas migratorias hídricas por el bloqueo del río (Kelly-Richards et al., 2017).<br><br>La producción energética que tiene un efecto en principio positivo, pero hay un impacto negativo por la erosión que producen los caudales aguas abajo de manera variable en función de la generación de electricidad en algunas horas del día (Greenteach, 2020). |
| 3   | Polifuncionalidad y protección | La infraestructura de almacenamiento proporcionada por un embalse hidroeléctrico mitiga los riesgos que plantea el cambio climático, incluidos los fenómenos meteorológicos extremos como inundaciones y sequías (Mohor et al., 2015).  | Divide al río en dos o tres secciones quitando caudal y riego natural, esto ocasiona la división de especies aguas arriba y debajo de la central, se evita con el uso de rampas de peces, especie de ascensores de manera que suben los peces hacia aguas arriba en las épocas de desove, pero, no se evita la muerte de gran cantidad de animales, desequilibrando ecosistemas (América Latina en movimiento, 2011).  |
| 4   | Costo                          | Capacidad energética con un bajo costo de generación, en comparación con otras fuentes de energía renovable y térmica. La hidroelectricidad es la fuente de generación con un costo promedio ponderado de 5 [c.USD/kWh] para nuevos proyectos (International Renewable Energy Agency, 2020b).   | Las centrales hidroeléctricas requieren de un alto presupuesto en su construcción, así como los equipos eléctricos y tendido de líneas de transmisión por ubicaciones alejadas a ciudades centrales (Koch et al., 2016).   |

|   |                              |   |  |
|---|------------------------------|---|--|
| 5 | Energía                      | Lleva energía a las personas, impulsa el crecimiento de las industrias, ciudades y sociedades (Berga, 2016). Actualmente existen alrededor de 14,000 proyectos en actividad, y, en el año 2018, un total de 180 países en el mundo reportaron beneficiarse de la hidroelectricidad (Killingtveit, 2019; Llamosas & Sovacool, 2021). | Se estiman globalmente de manera acumulativa en un billón de dólares la compensación por el deterioro causado de los últimos 18 años de la generación hidroeléctrica asociado al cambio climático (Turner, Hejazi, et al., 2017)   |
| 6 | Fuente                       | No requieren combustible fósil porque usan un recurso renovable hídrico brindando una constante repuesta por la naturaleza de manera gratuita.  | La hidroelectricidad acelera la destrucción del medio ambiente por el uso excesivo de agua y calentamiento global sobre todo por situarse en las zonas tropicales donde se desarrollan procesos rápidos de crecimiento, descomposición de suelos y deforestación de bosques (Severiche-Sierra, 2013).  |
| 7 | Inversión                    | La inversión en energías renovables crea nuevas fuentes de empleo y genera un círculo económico de productos y servicios al realizar los proyectos hidroeléctricos.   | Según La Agencia Internacional de Energías Renovables entre 2010 y 2020, el factor de potencia promedio global para hidroeléctrica cambió de 51% en 2015 a 46% en 2020, lo que muestra que la energía hidroeléctrica está perdiendo eficiencia en alrededor de 1 % por año, reflejando que las inversiones en estas infraestructuras en todo el mundo están perdiendo rentabilidad (International Renewable Energy Agency, 2020a). |
| 8 | Eficiencia                   | Las centrales hidroeléctricas tienen un alto coeficiente de eficiencia desde el 55% hasta el 82%, en comparación con aproximadamente el 33% de las centrales nucleares y centrales térmicas (Denisov & Denisova, 2017).   | Para mantener esta eficiencia, las plantas hidroeléctricas deben estar ubicadas en escenarios sin estacionalidad donde el caudal sea constante sin altas variaciones climáticas ni de cambio de estaciones pronunciadas.   |
| 9 | Construcción y mantenimiento | Costo comparativamente bajo de mantenimiento preventivo y un bajo costo primario de energía eléctrica generada, 2 - 4 veces menor que en las centrales nucleares (Bakken et al., 2017).   | Las centrales hidroeléctricas requieren mucho tiempo para construirse, de 10 a 20 años por los estudios iniciales, en comparación con los 3 - 4 años de las centrales nucleares o térmicas, y también requieren grandes inversiones en esta etapa (Denisov & Denisova, 2017).  |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>10</b> Personal y empleo</p>                              | <p>Una central hidroeléctrica es operada por una cantidad relativamente pequeña de personal, 0.25 personas están ocupadas por 1 megavatio de energía; para una central térmica son 1.26 personas; para una central nuclear este número es 1.05 personas (Denisov &amp; Denisova, 2017).</p> <p>La industria hidroeléctrica emplea a 1.8 millones de trabajadores en todo el mundo, y muchos más en cadenas de suministro conectadas (International Renewable Energy Agency, 2020b).</p> | <p>Las represas hidroeléctricas son una de las mayores infraestructuras energéticas en el mundo porque necesitan complejas adecuaciones y modificaciones en montañas, ríos y causes (Teräväinen, 2019).</p> <p>Inmigración masiva de trabajadores de otras regiones en la fase de construcción provocando deforestación generalizada y pérdida de biodiversidad en las zonas por el desarrollo comercial, industrial y residencial para apoyar a estos recién llegados y sus respectivos medios de subsistencia, existen datos del desplazamiento de ochenta millones de personas en todo el mundo por la construcción centrales hidroeléctricas (América Latina en movimiento, 2011).</p> |
| <p><b>11</b> Multifunción para otras renovables</p>             | <p>La energía hidroeléctrica respalda el crecimiento de las energías renovables variables, como la eólica y solar, y satisface la demanda cuando estas fuentes no están disponibles (International Hydropower Association, 2019).</p>   | <p>La operación hidroeléctrica de proyectos con represas daña la fauna y flora cuando las compuertas de los embalses se abren agresivamente como medida de control de inundaciones porque perturba los ecosistemas eliminando la vida silvestre y acuática (Ekandjo et al., 2018).</p> <p>Existen proyectos solares de generación asociados con embalses hidroeléctricos que presentan impactos ambientales más marcados por presentar los paneles en el agua superficial de la presa eliminado el paso de luz (Alarcon, 2019).</p>  |
| <p><b>12</b> Gestión hídrica responsable</p>                    | <p>La energía hidroeléctrica proporciona un medio vital para administrar el agua dulce de manera segura en embalses, proporcionando suministro de agua para hogares, negocios y agricultura (International Hydropower Association, 2018a).</p>  | <p>La hidroelectricidad depende de la hidrología, y ese sistema natural depende de los niveles de precipitación, que fluctúan de un año a otro, o presentarse modificaciones por externalidades como el cambio climático, provocando inestabilidad.</p>  |
| <p><b>13</b> Fortalecimiento de la cooperación entre países</p> | <p>La transmisión de electricidad a larga distancia a través de las fronteras nacionales promueve una sólida cooperación intergubernamental (International Hydropower Association, 2019).</p>   | <p>La hidroelectricidad provoca cambios en la calidad del agua del embalse y del arroyo de países vecinos cuando existen proyectos fronterizos. Además, el funcionamiento de una central hidroeléctrica altera la temperatura del agua y el caudal del río dañando las plantas, animales nativos del río y de la tierra (Hartmann, 2020).</p>  |
| <p><b>14</b> Comunidades y zonas rurales</p>                    | <p>El desarrollo de la energía hidroeléctrica puede impulsar la inversión en las comunidades locales, incluida la educación, atención médica y otros servicios (IHA, 2020).</p>   | <p>Los embalses pueden cubrir hogares, áreas naturales importantes, tierras agrícolas y sitios arqueológicos (International Hydropower Association, 2019). La infraestructura para la producción hidroeléctrica necesaria en varios países se encuentra en áreas rurales donde habitan poblaciones campesinas, indígenas</p>   |

|    |   |   |
|----|---|---|
|    |   | o pequeños agricultores que generalmente son económicamente vulnerables, donde el grado de marginación social y económico es marcado (Spalding-Fecher et al., 2016).      |
| 15 | <p>Actividades recreativas y turismo</p> <p>Los embalses hidroeléctricos pueden ofrecer desarrollo regional a través de la creación de turismo con áreas para actividades recreativas y pesquerías (International Hydropower Association, 2018a).</p> | <p>Creación de un lago artificial o embalse, generando un cambio en el ambiente de forma física, química y biológica en forma negativa (Robescu &amp; Bondrea, 2019).</p> |

Elaboración: El Investigador

Es notable observar que el crecimiento económico del mundo depende del recurso energético e hídrico, y las dos demandas tienen un aumento acelerado amplio (Tang et al., 2019), por lo cual, al analizar los recursos globales, la producción hidroeléctrica tiene importancia en el desarrollo de estudios por el aspecto de generación con bajas emisiones de carbono, y porque es la principal energía renovable en el despliegue global.

Desde el estado del arte y para el desarrollo de este documento se muestra que la energía hidroeléctrica no es contaminante, pero tiene impactos ambientales, sociales y técnicos, dichas instalaciones pueden afectar en el uso de suelo, hogares y hábitats naturales, además, las políticas limitadas, disputas dentro de gobiernos y falta de cooperación internacional genera el déficit analítico adecuado previo a una inversión en desarrollar proyectos hidroenergéticos (Voegeli et al., 2019).

Al respecto, es concluyente la necesidad de evaluar las condiciones actuales de los proyectos hidroeléctricos, especialmente los de gran escala para favorecer resultados y proyecciones equitativas para las poblaciones aledañas a estas centrales, partes interesadas y ecosistemas involucrados (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021b).

Además del Estado del Arte y observaciones bibliográficas, se demuestra que la concepción de la hidroelectricidad es ser una fuente *“limpia”* y *“renovable”* por usar agua, pero poco se conoce sobre las afectaciones a nivel ambiental, técnico y social, y solo se muestran estudios a nivel puntual es decir en proyectos hidroeléctricos específicos en ciertos países que no reflejan la tendencia de los proyectos a manera global, razón por la que, el desarrollo hidroeléctrico, es un área que requiere análisis y estudio para delinear el desarrollo sostenible con ámbitos desde perspectivas multidisciplinarias basados en información cuantitativa.

Por otra parte, el impacto de los eventos climáticos en la producción hidroeléctrica ha sido documentado levemente en el sector energético, es decir, estudios limitados miden esta fuente de producción de energía en base a criterios de sostenibilidad, lo cual también representa una brecha de conocimiento.

Así mismo, de la información de las Tablas 4 a 7, se estudió varias temáticas que responden a diversas metodologías y hallazgos según el contexto analizado, entre los principales se tiene que en países como Ecuador, USA, China, India, Escocia, y Etiopía se extrajo perspectivas futuras de producción hidroeléctrica; en Chile, México, Bután, Nepal, Laos, Austria se observa que existe información sobre la capacidad instalada en los países y como está fluyendo la hidroelectricidad en diversos aspectos sociales, ambientes y técnicos; finalmente en Brasil, Italia, Colombia, Irán, Tanzania y se extrajo información sobre la necesidad de desarrollar fuentes alternativas debido a que la hidroelectricidad afecta el entorno. Entonces el Estado del Arte de la producción de energía hidroeléctrica de los países refleja que aún no existen estudios sobre cómo relacionar la sostenibilidad a esta fuente renovable, o no se muestran estudios sobre la relación entre la hidroelectricidad y el comportamiento social, técnico y ambiental.

Finalmente, proponiendo el problema de investigación que la tesis busca resolver como los impactos sociales, ambientales y técnicos que produce la hidroelectricidad, existe un vacío detectado, el cual es que no se observan análisis de los recursos hídricos, percepciones de los asentamientos cercanos a los proyectos hidroeléctricos, o proyecciones futuras de la capacidad hidroeléctrica con escenarios.

**Nota 4.** An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021). An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review. Journal of Energy Research and Reviews, 8(1), 10-20. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v8i130201>



## Capítulo V

### 5. Análisis y Discusión

En primer lugar, es importante señalar que el desarrollo y preparación de la tesis consistió en visitas a varios proyectos hidroeléctricos en Ecuador principalmente y comunidades aledañas con el fin de verificar el entorno, infraestructura, equipos, operación, generar la recolección de muestras de agua y levantamiento de información con encuestas a personas que viven en estas áreas, los cuales facilitaron elementos investigativos y datos de los cambios contrastados desde la construcción de centrales hidroenergéticas.

En este contexto de edificación hidroeléctrica, la situación mundial actual de la producción energética presenta varios retos en referencia a cuantificar las afectaciones intangibles generando un desconocimiento de la hidroelectricidad para emitir criterios de sostenibilidad; cuando estos impactos no se conocen detalladamente es seguro que se omiten parámetros, generando el planteamiento investigativo.

Por ejemplo, Rivera (2020) generó un estudio sobre el pronóstico a largo plazo de la demanda de energía en el escenario sostenible en Ecuador para el período 2016-2035 que concluyó que para identificar desafíos y oportunidades específicas en el tiempo, existe una necesidad urgente de establecer políticas estatales de eficiencia energética, y desarrollo de energías sostenibles, tanto a medio, como largo plazo para implementarlas progresivamente, en consecuencia, se deben realizar escenarios energéticos de las fuentes de generación del país con conocimiento de las implicaciones relacionadas con la contaminación, calentamiento global, y actividades socio económicas (Rivera-González, Bolonio, Mazadiego, Naranjo Silva, et al., 2020). Con estos antecedentes, dentro de los resultados, discusión y propuesta, a continuación, se detalla el planteamiento investigativo concebido dividido en cuatro (4) secciones específicas:

Tabla 14. Propuesta investigativa



**Hidroelectricidad sostenible  
con visión holística**

1. (183) Encuestas para el levantamiento de información y perspectivas en comunidades cercanas al proyecto más grande del Ecuador
2. Análisis físico químico del recurso hídrico en cinco proyectos hidroenergéticos
3. Análisis de Ecuador en la producción hidroeléctrica (Variables y Proyección)
4. Relación entre la hidroelectricidad y la sostenibilidad

Elaboración: El Investigador

## 5.1 Encuestas para el levantamiento de información y perspectivas

Con el fin de recolectar información a nivel territorial, se levantó una encuesta en las comunidades cercanas a la hidroeléctrica más grande del Ecuador, la central Coca Codo Sinclair (CCS) ubicada en las provincias del Napo y Sucumbíos en la región oriental amazónica la cual posee un clima tropical; la central se inauguró en el año 2016 para una potencia de 1,500 [MW] con una inversión de 2,850 millones de dólares. Seguido la ubicación referencial donde se recolectó la información de las 4 comunidades:

- El Chaco & San Carlos: Aguas arriba – antes de la generación, y
- San Luis & Lumbaqui: Aguas abajo – después de la generación.



Ilustración 15. Ubicación comunidades El Chaco, San Luis, San Carlos, Lumbaqui  
Elaboración: El Investigador. Fuente: (Poveda-Burgos et al., 2017).

Posterior a la ubicación de la hidroeléctrica más representativa del Ecuador, seguido una imagen de cómo se estructuró esta obra, una de más grandes para el Ecuador en costo y dificultad.



Ilustración 16. Estructura de las obras de la Central Coca Codo Sinclair (CCS)  
Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017b).

## Metodología

Con la ubicación referenciada para el levantamiento de información, se calcula la muestra poblacional con el fin de determinar el tamaño de la muestra a levantar, seguido el detalle con base al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador (INEC).

Tabla 15. Datos poblacionales de las comunidades

| Cantón/ Comunidad encuestada  | Provincia                         | Área [km <sup>2</sup> ] | Población [Nro.]         | Densidad [pers/km <sup>2</sup> ] |
|---|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| (1-2) El Chaco & San Carlos <sup>a</sup>  | Napo                              | 3,500                   | 8,964 <sup>a</sup>       | 2.56                             |
| (3-4) Lumbaqui (Gonzalo Pizarro) & San Luis <sup>b</sup>  | Sucumbíos                         | 2,229                   | 9,684 <sup>b</sup>       | 4.34                             |
| <b>Total poblacional</b>  |                                   |                         | 18,648                   |                                  |
| Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) <sup>c</sup> , en esta región cada familia tiene alrededor de 6 integrantes | Por Familia (6):                  |                         | 3,108                    |                                  |
| El 68.5% de la población es del grupo de 20 a 70 años requerido para levantar la información  | <b>Dato final de distribución</b> |                         | <b>2,129<sup>d</sup></b> |                                  |

Fuente: a.b.(GAD El Chaco, 2021; GAD Gonzalo Pizarro, 2021). c. (INEC, 2010a, 2010b).

Elaboración: El Investigador

Seguido para conocer la muestra específica, se utiliza una fórmula estadística, la misma que puntualiza el tamaño de la muestra, estimando una porción de la población en base a un intervalo de confianza definido; el cálculo de la muestra para una población finita se precisa por el número de personas en las cuatro poblaciones (dato final de distribución).

$$n = \frac{z^2 * p * q * N}{e^2 * (N - 1) + z^2 * p * q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Fuente: (Noblecilla-Alburque, 2020).

Con la Ecuación 3 se define el valor (z), primero se define un nivel de confianza del 95% en la muestra dando desde tablas estadísticas  $z = 1.96$ . Este valor se especifica según el interés del investigador, e indica el grado de confianza otorgado en la población, y cuanto más confianza se desee, mayor será el número de muestras (Aguilar-Barojas, 2005).

Por otra parte, el margen de error se especifica como un porcentaje en el muestreo aleatorio contemplado para cualquier investigación, especialmente al aplicar cuestionarios o encuestas, a criterio definido por el investigador, el error máximo aceptable para esta investigación se propone en 5% debido a que la mayoría de los proyectos establecen el error entre 5% y 10%, seleccionando el valor más bajo (Badii et al., 2008).

$$n = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5 * 2,129}{0.05^2 * (2,129 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

Donde:

Tabla 16. Cálculo de la muestra

| No. | Ítem                                  | Representación | Valoración        |
|-----|---------------------------------------|----------------|-------------------|
| 1   | Valor de z al 95% de confiabilidad    | z              | 1.96              |
| 2   | Porcentaje supuesto de varianza       | p              | 50%               |
| 3   | Heterogeneidad                        | q              | 50%               |
| 4   | Tamaño del universo                   | N              | 2129 <sup>d</sup> |
| 5   | Error máximo aceptable                | e              | 5%                |
| 6   | Tamaño mínimo de la muestra propuesta | n              | <b>179</b>        |

Fuente: (Noblecilla-Alburque, 2020; Seoane et al., 2007).

Elaboración: El Investigador

### La Encuesta

De la muestra se calculó en 179 observaciones mínimas, sin embargo, se recolectó 183 para aumentar la seguridad de los resultados, al respecto se generaron 24 preguntas de opción múltiple y 2 abiertas que requieren de respuestas independientes.

Para el diseño de la encuesta se buscó principalmente medir parámetros sociales y ambientales de las personas como parte del desarrollo investigativo; además, las preguntas tienen relación en temas entre ellas para corresponder resultados y verificar incidencias, en el proceso de construcción de la encuesta se elaboraron las preguntas, y se compartió con un pequeño grupo de 5 personas de la zona para conocer si estaban de acuerdo, y tenían conocimiento de las mismas, bajo dicha percepción inicial, se determinó que la encuesta diseñada reunió criterios de validez donde como objetivo específico se tenía levantar la percepciones, observaciones e información de como la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair interactúa con la población y lugares aledaños al proyecto.

Con la definición de la encuesta que permita determinar información se menciona que tiene relación con el Objetivo Específico 3 de la tesis de *“Analizar la percepción de las poblaciones aledañas a los proyectos hidroeléctricos del Ecuador, así como la expansión de la producción hidroeléctrica a largo plazo con posibles escenarios.”*. Seguido, las preguntas establecidas que fueron las siguientes:

Tabla 17. Preguntas desarrolladas en la encuesta

| No. | Pregunta  | Aspecto o tema                                 |
|-----|---|--|
| 1   | ¿Detalle su género y edad? / Nombre opcional  | Datos personales                               |
| 2   | ¿Qué tipo de preparación tiene?   | Datos personales                               |
| 3   | ¿Cuál es su profesión de trabajo? Ejemplo: Guía, obrero, profesor, carpintero (Llenar por cada encuestado)  | Datos personales                               |
| 4   | ¿Qué tiempo en años vive en El Chaco, San Carlos, San Luis, o Lumbaqui?   | Área de intervención                           |
| 5   | ¿Recuerda la etapa de construcción del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair?  | Área de intervención                           |
| 6   | ¿Conocía el área de la ubicación del proyecto Coca Codo Sinclair antes de la construcción?  | Área de intervención                           |
| 7   | ¿Su trabajo o algún familiar directo a su núcleo tiene o tuvo relación laboral con el proyecto Coca Codo Sinclair?  | Percepción Laboral                             |
| 8   | ¿La empresa que construyó la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair les compartió los objetivos y metas de lo que hacían con el proyecto en charlas, reuniones, etc.?  | Soporte y ayuda del operador a las comunidades |
| 9   | ¿Cree usted que se generaron planes sociales, ambientales o culturales para remediar la intervención que se tuvo en el ecosistema con la construcción de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair?  | Planes o proyectos establecidos                |
| 10  | ¿Cree usted que el comportamiento ambiental o biodiverso del área donde se construyó el proyecto Coca Codo Sinclair es el mismo que antes?  | Aspectos ambientales                           |
| 11  | ¿La empresa operadora hidroeléctrica se esfuerza y proporciona recursos para la mejora continua del cuidado ambiental o social del Cantón el Chaco, San Carlos, San Luis, o Lumbaqui?   | Soporte y ayuda del operador a las comunidades |
| 12  | ¿Ha verificado algún parámetro adverso de los siguientes por generar hidroelectricidad en el río Coca?<br>a) Reducción del caudal de agua del río; b) Aumento del caudal de agua del río; c) Muerte de especies del lugar; d) Desaparición o alejamiento de animales; e) Reducción de peces en el río; f) Sequía en partes aledañas al bosque o represa; g) Cambio de lluvia o estaciones a lo largo de año; h) Erosión de suelos | Aspectos ambientales                           |
| 13  | ¿Existen actividades de formación o capacitación a los pobladores del Chaco, San Carlos, San Luis, o Lumbaqui en función a las necesidades identificadas por la empresa Coca Codo Sinclair EP??   | Soporte y ayuda del operador a las comunidades |

---

|    |   |  |
|----|---|--|
| 14 | ¿Cree usted que falta fomento y participación del Operador de la hidroeléctrica C.C. Sinclair para recoger ideas que mejoren el cuidado ambiental o desarrollo social?  | Soporte y ayuda del operador a las comunidades |
| 15 | ¿La empresa dispone de ayudas financieras a los pobladores del cantón por parte del Gobierno, Fundaciones u Organizaciones No Gubernamentales (ONG's) para abordar problemas o emprendimientos?   | Soporte y ayuda del operador a las comunidades |
| 16 | ¿Han existido incentivos sociales o económicos a los pobladores por el uso del agua y construcción de la hidroeléctrica en el área? Tales cómo:<br>a) Prestamos; b) Carreteras; c) Parques; d) Bibliotecas e) Escuelas; f) Centros de salud; g) Canchas | Incentivos para las comunidades                |
| 17 | ¿Conocen ustedes sobre evaluaciones ambientales o medidas adoptadas por la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair para remediar los ecosistemas?   | Planes o proyectos establecidos                |
| 18 | ¿Según su apreciación considera que el bosque y río Coca – Quijos son modificados por la construcción de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair?  | Aspectos ambientales                           |
| 19 | ¿Cree que el Estado Ecuatoriano ejecutó políticas públicas de desarrollo y compensación a las comunidades del Chaco, San Carlos, San Luis ó Lumbaqui por el uso del agua del río Coca para operar la hidroeléctrica?                                    | Planes o proyectos establecidos                |
| 20 | ¿Cree que han existido cambios por la construcción de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair?   | Aspectos sociales                              |
| 21 | ¿Después de este tiempo de operación de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair tienen satisfacción con los cambios realizados por el desarrollo de la hidroeléctrica?   | Aspectos sociales                              |
| 22 | ¿Existe gente que usted conoce que se desplazó, o, cambio de ciudad por la construcción de la hidroeléctrica?   | Aspectos sociales                              |
| 23 | ¿Cree que su población es compensada por el uso del agua e intervención del bosque por construir la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair?  | Área de intervención                           |
| 24 | ¿Usted, familiares o conocidos pescan o cazan en el río o alrededor de la hidroeléctrica?   | Aspectos ambientales                           |
| 25 | ¿Desde la operación de la hidroeléctrica la pesca aumento o bajo?   | Aspectos ambientales                           |
| 26 | Favor detalle algún otro dato, tema u observación que desee mencionar o se tome en cuenta por la construcción de la hidroeléctrica (De detalle a llenar por los encuestados)  | Observaciones adicionales                      |

---

Elaboración: El investigador

## Resultados

Con la Tabla 17 que define las preguntas, se generó una agrupación por temas para tabular las respuestas y generar un entendimiento específico de cada tema, seguido se establece la relación, la cual entre paréntesis integra las preguntas correlacionadas.

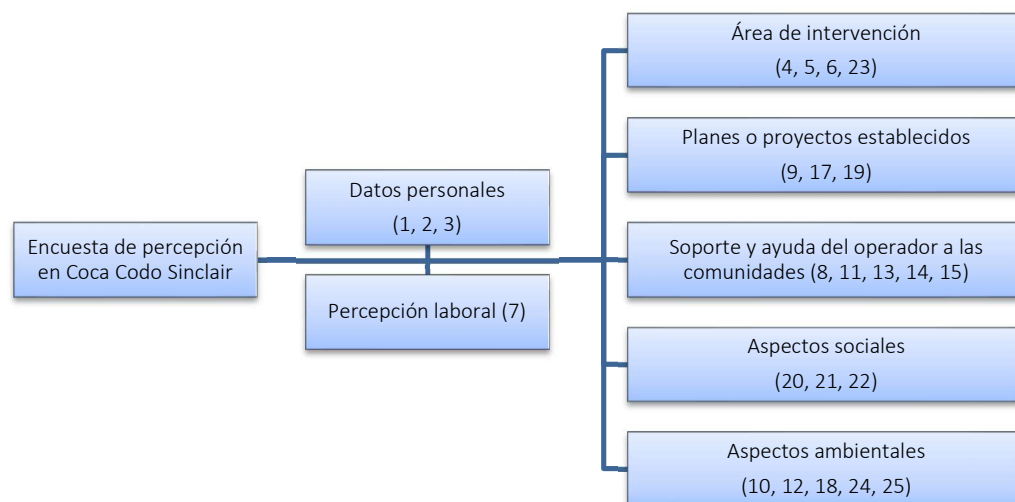


Ilustración 17. Clasificación de preguntas por temas

Elaboración: El investigador

La encuesta se ejecutó en el sitio, las preguntas se levantaban llenando formularios con el apoyo de un dispositivo electrónico, cuando no existía señal en papel y se ejecutó el levantamiento presencial de datos en las comunidades, se elaboró desde el 30 de noviembre del 2020 hasta el 21 de enero de 2021, es decir, existió 52 días para recolectar **183** respuestas.

### Datos personales

De la información se distribuyen en género y edad los encuestados de la siguiente manera.

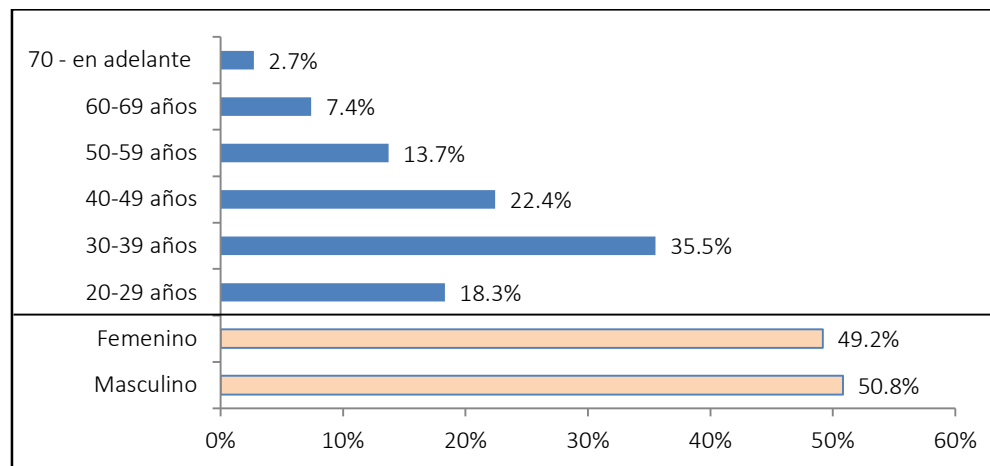


Ilustración 18. Edad y género de los encuestados (Preg. 1)

Por otra parte, como se mencionó los datos iniciales parten de preguntar nombres de los pobladores, y también existía la opción de enviar de manera anónima la encuesta, por consiguiente, se recibió datos

personales de identificación de 116 voluntarios. Adicional, definida esta distribución de encuestados, la pregunta 2, referencia el nivel académico y preparación educativa, o, profesional:

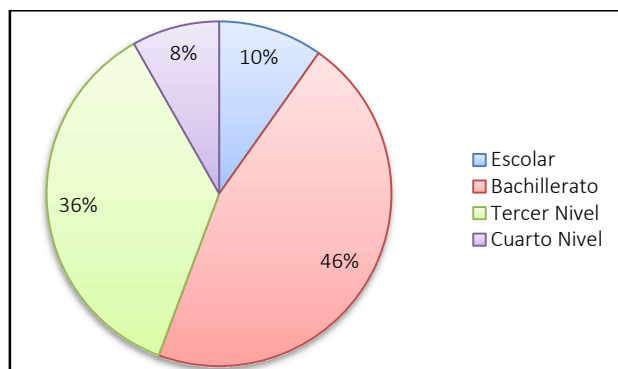


Ilustración 19. Formación de los encuestados en las comunidades (Preg. 2)

De estos encuestados la distribucional global académica o profesional es amplia, con un 46% de encuestados de nivel de bachillerato por dedicarse a trabajos comerciales o agropecuarios, y un 44% a nivel académico de tercer y cuarto nivel. Adicional, en referencia a la pregunta 3, se permite conocer que de los participantes se recibió información de ingenieros, abogados, personas de seguridad, policías, enfermeras, médicos, guías, obreros, conductores, agricultores, comerciantes, estudiantes y amas de casa.

### Percepción Laboral

De la información levanta, la pregunta 7, muestra que el 53% de los habitantes relacionan la construcción de la planta con el trabajo directo, o, a través de un familiar del núcleo que tenía relación laboral con Coca Codo Sinclair.

### Área de intervención

En la pregunta 4, los encuestados mencionan los tiempos de residencia en este lugar cercano a la central hidroeléctrica. El 72% de los encuestados vive más de diez años cerca del proyecto, recordando que Coca Codo Sinclair inició operaciones el 31 de agosto de 2016 y su construcción inició el 1 de julio de 2010. Además, los resultados de las preguntas 5, 6 y 23 gráficamente están en el siguiente orden.

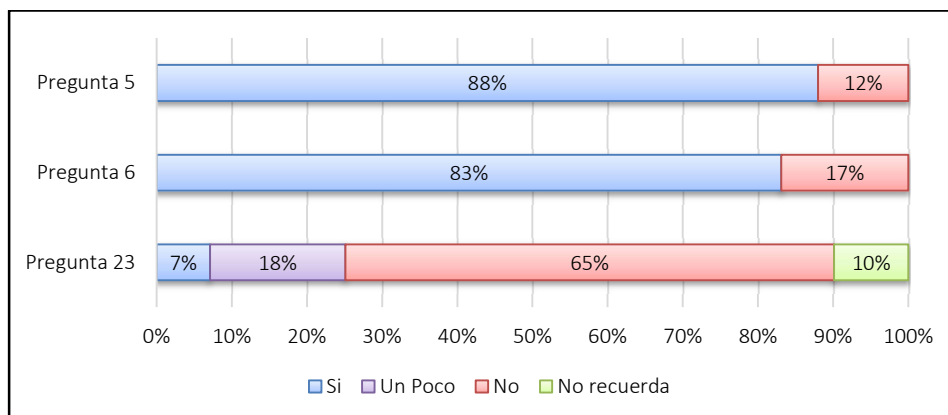


Ilustración 20. Área de intervención



Tabulando las preguntas 5 y 6, el promedio es que el 85.2% (87.4% y 83.1%) de las personas conocían el lugar donde se ubica Coca Codo Sinclair, y recuerdan la construcción, etapa que se desarrolló con disputas y gran cantidad de personal chino debido que una empresa oriental construyó la central hidroeléctrica.

Finalmente, en la pregunta 23, el 65% de las personas piensa que la comunidad no es compensada por la construcción del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair.

### Planes o proyectos establecidos

Al mismo tiempo, se indagó si se generaron planes sociales, ambientales o culturales para remediar la intervención en el ecosistema con la central hidroeléctrica, obteniendo la ilustración siguiente.

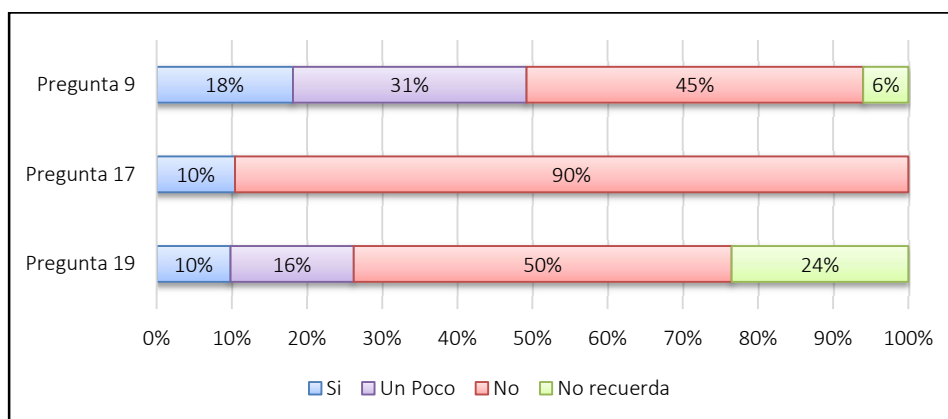


Ilustración 21. Planes o proyectos establecidos

Las respuestas a la pregunta 9, el **75.9%\*** (44.8 + 31.1) piensan que no se generaron, o solo se realizaron de manera parcial, planes sociales, ambientales o culturales para remediar la intervención agresiva que causa la construcción y operación de la hidroeléctrica, en consecuencia, se muestra inconformidad.

Además, la pregunta 17 mostró que el 89.6% desconoce las evaluaciones ambientales o medidas adoptadas por el operador de la hidroeléctrica. Finalmente, la pregunta 19 presenta que el 50.3% de la población encuestada considera que el Estado ecuatoriano no implementa políticas públicas para el desarrollo y compensación de las comunidades por el uso del agua.

### Soporte y ayuda del operador a las comunidades

Se agrupo cinco preguntas; el objetivo es conocer cómo el operador de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair apoya a las comunidades.

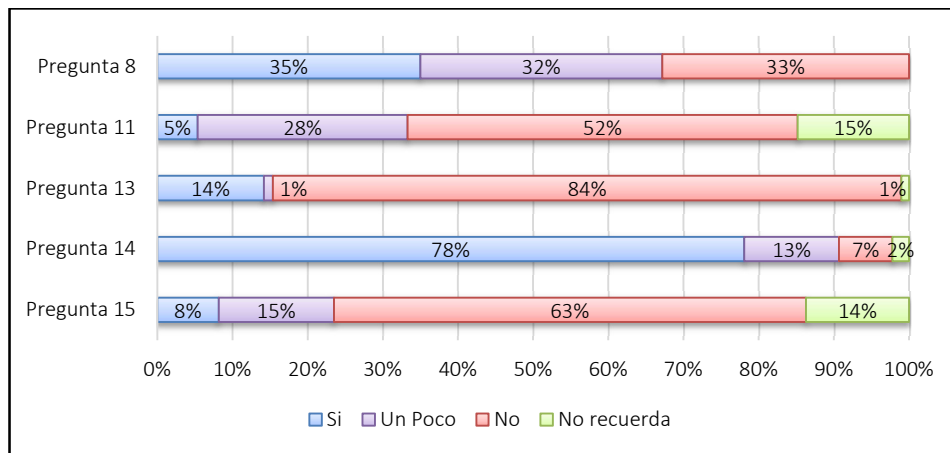


Ilustración 22. Apoyo a las comunidades

Sobre la pregunta 8, solo el 35% de los encuestados reconoce que los objetivos de proyecto fueron compartidos, cifra dispersa, además, el 32% no recuerda u olvidó la etapa de socialización, pero la Ley ecuatoriana exige reuniones para comunicar el alcance de este tipo de proyectos de gran envergadura.

La pregunta 11 recolecta información si el operador de la central apoyó al cuidado ambiental y social, y la pregunta 15 si el operador asiste económicamente a las comunidades, promediando las respuestas (51.9% y 62.8%), se obtiene que el 57.3% de los habitantes cree que no existen recursos del operador de la central hidroeléctrica para el cuidado del medio ambiente, y aún menos ayuda económica adicional. Además, el 27.9% de las personas de la pregunta 11 menciona que este apoyo existe parcialmente, y el 14.8% no conoce o no recuerda ninguna de estas actividades.

En cambio, del ~~resumen~~ de la pregunta 13, el 84% de los pobladores no menciona actividades de formación para las personas, solo recuerdan talleres introductorios que imparte la empresa.

Finalmente, en la pregunta 14, el 78% de las personas perciben falta de promoción y participación del operador de Coca Codo Sinclair para recolectar ideas que mejoren la protección ambiental o desarrollo social.

### Aspectos sociales

Por otro lado, se discute algunas perspectivas sociales como movimientos de comunidades y satisfacción de las personas. Sobre la pregunta 20, el 78% de los encuestados cree que existen cambios sociales por la construcción y operación del proyecto hidroeléctrico. Sin embargo, en torno a esta pregunta se hizo un especial discernimiento para verificar la diferencia entre las comunidades río arriba y río abajo, las comunidades río abajo después de generación hidroeléctrica observan más impactos con 89.4%, y los resultados aguas arriba son 65.8%.

Asimismo, en la pregunta 21, alrededor de (58.5 + 29) **87.5%\*** están insatisfechos con los cambios realizados con la construcción de Coca Codo Sinclair.

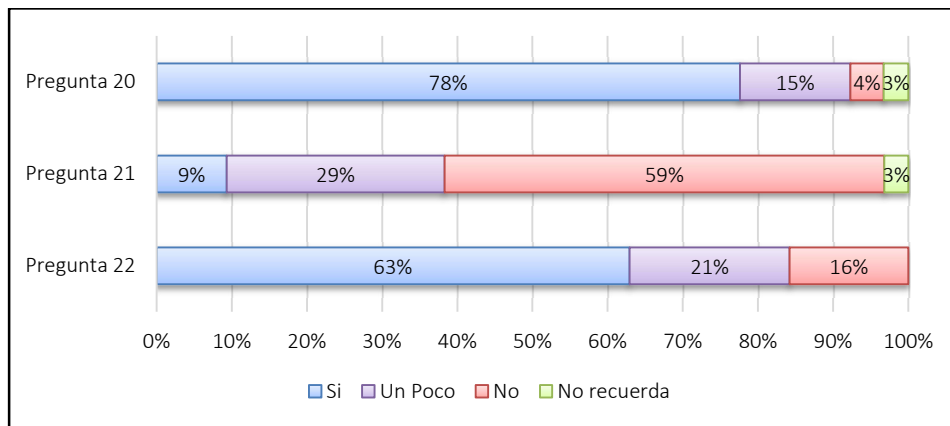


Ilustración 23. Parámetros sociales

Por tanto, al promediar las dos respuestas 20 y 21 (77.6 + 87.5), se interpreta que el **83%\*** de la población percibe cambios desacreditando la infraestructura hidroeléctrica realizada en la zona oriental ecuatoriana con este megaproyecto. Por otro lado, los resultados de la pregunta 22, el 63% de los encuestados conocen personas que se mudaron o cambiaron de ciudad debido a la construcción de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.

### Aspectos ambientales

Se levantó información sobre la observación actual del río, animales y cantidad de peces como aspectos ambientales, los resultados son.

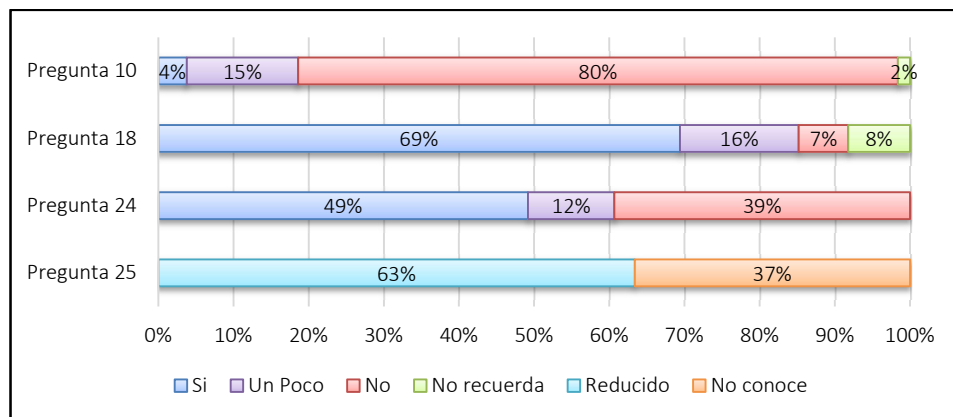


Ilustración 24. Aspectos ambientales

Sobre la pregunta 10 el 79.8% de los encuestados perciben modificaciones ambientales donde se construyó Coca Codo Sinclair; la pregunta 18, corrobora estos resultados con el 69% de respuestas donde determinan que la construcción de la hidroeléctrica cambió el río Coca-Quijos y el bosque.

Promediando las dos respuestas de la pregunta 10 y 18 (79.8 + 69.4), se interpreta que el **74.6%\*** de los pobladores creen que existen modificaciones ambientales y biodiversas tanto al río, como al bosque donde se construyó la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Por otro lado, la pregunta 24 mostró que el 49% de las familiares pescan, cazan en el río o alrededores de la Coca Codo Sinclair, y en torno a estos resultados, en

la pregunta 25, el 63% de los encuestados piensa que la productividad pesca disminuyó en desde la operación del proyecto hidroeléctrico. Además, de dichas modificaciones, los encuestados responden que, lo más notorio ambientalmente según selección múltiple en la pregunta 12, es:

Tabla 18. Factores y hallazgos observados por los encuestados

| Causa/Opción verificada                            | Respuestas | Porcentaje  | Acumulada     |
|--|------------|-------------|---------------|
| a) Reducción del caudal de agua del río            | 116        | 25.0%       | 25.0%         |
| e) Reducción de peces en el río                    | 76         | 16.4%       | 41.4%         |
| h) Erosión de suelos                               | 76         | 16.4%       | 57.8%         |
| d) Desaparición o alejamiento de animales          | 68         | 14.7%       | 72.5%         |
| c) Muerte de especies del lugar                    | 45         | 9.7%        | <b>82.2%*</b> |
| g) Cambio de lluvia o estaciones a lo largo de año | 40         | 8.6%        | 90.8%         |
| f) Sequía en partes aledañas al bosque o represa   | 37         | 8.0%        | 98.8%         |
| b) Aumento del caudal de agua del río              | 6          | 1.3%        | 100%          |
| <b>Total</b>                                       | <b>464</b> | <b>100%</b> | -             |

Seguido de manera grafica las respuestas seleccionadas por parte de las observaciones ambientales, de las cuales en la tabulación acumulada, los factores representativos con un **82%\*** de respuestas, los pobladores perciben que la hidroeléctrica reduce el caudal del río y por relación directa los peces, existe erosión por el cambio de uso de suelo, desaparición de animales y muerte de especies del lugar.

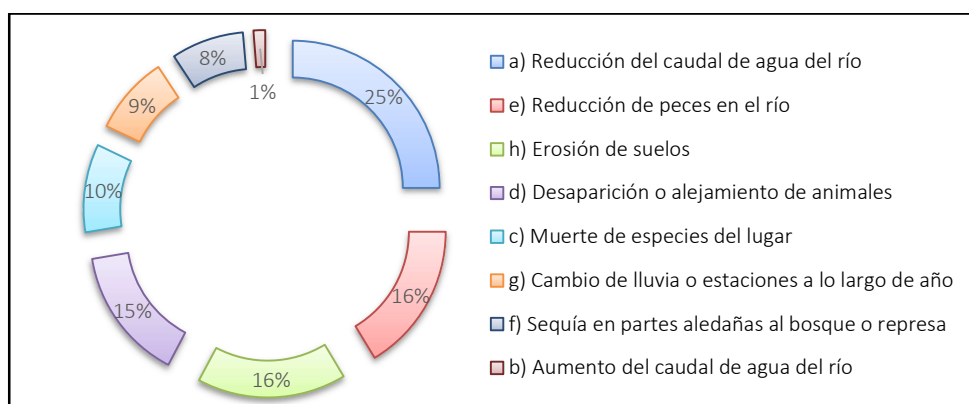


Ilustración 25. Observaciones negativas ambientales (12)

### Percepciones adicionales

Finalmente, después de las preguntas de opción múltiple, se investigó de manera voluntaria la concepción que tienen por la construcción y operación de Coca Codo Sinclair mediante la pregunta 26, se recolectó 81 respuestas de las cuales un **79%\*** son consideraciones negativas es decir 64 respuestas, 5 recomendaciones que representan el 6%, y 12 consideraciones positivas que representa el 15% de las percepciones. Además, para determinar las consideraciones negativas, se unifican los criterios que representan las siguientes ideas, entre paréntesis se mencionan las respuestas divididas por los encuestados.

Tabla 19. Factores y hallazgos negativos observados por los encuestados

| Ítem | Criterio       | Respuesta   |
|------|----------------|---|
| 1    | Trabajo        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Brinda trabajo a personal de la zona en la construcción, pero, se convirtió en una fuente de trabajo inestable de la cual ahora se observan las consecuencias (3),</li> <li>– Falta de fuentes de empleo en el área, solo se construyó un proyecto que daña el ecosistema (4).</li> </ul>  |
| 2    | Medio ambiente | <ul style="list-style-type: none"> <li>– A raíz de la construcción de la hidroeléctrica se generó un impacto ambiental a la cascada de San Rafael considerada un atractivo natural y una de las cascadas más grandes del Ecuador (4),</li> <li>– Existe descontento de la población porque se usa el agua, modifica ecosistemas y no se tiene gran compensación en la provincia del Napo y Sucumbíos (3),</li> <li>– La hidroeléctrica afecto vida silvestre y acuática de manera agresiva, además, movilizó mucha gente de los alrededores (2),</li> <li>– El caudal del río se observa bastante disminuido, existe alteración en el ecosistema terrestre y biodiversidad (5),</li> <li>– La pesca bajo, los animales desaparecieron cerca al embalse compensador e hidroeléctrica (3).</li> </ul> |
| 3    | Construcción   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aguas arriba de las obras de captación, se inunda y hay personas que no son tomadas en cuenta para su compensación, ya que sus terrenos son ahogados por la crecida del espejo de agua (3),</li> <li>– Coca Codo Sinclair es una obra sobrevalorada, muy cara con altos impactos que afecto los ríos quijos, coca y sub cuencas (6),</li> <li>– <b>No debe existir dicha Hidroeléctrica (3).</b></li> </ul>  |
| 4    | Uso de suelo   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se cambió terrenos vírgenes por apertura de vías, ejecutando una gran infraestructura, pero con poca socialización de beneficios e impactos (4),</li> <li>– Actualmente existen daños pronunciados en las montañas y carreteras por el cambio de uso de suelo (5).</li> </ul>  |
| 5    | Gobierno       | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Todo fue en beneficio del gobierno saliente que gestionó semejante obra para no beneficiar a la población cercana (4),</li> <li>– Pocas ventajas a la zona, pero muchas afectaciones (6).</li> </ul>   |
| 6    | Turismo        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Impacto visual por alteración paisajística, no se tomó en cuenta el factor turístico ya que destruyó un gran atractivo que era el río, e imposibilitó, su navegación para turismo de aventura y conservación (5),</li> <li>– Falta de facilidades como libre ingreso a la zona de influencia, represa, y embalse de captación para evacuar turistas que realizan actividades deportivas en el río (4).</li> </ul>  |

Elaboración: El investigador

Como se muestra las respuestas están enmarcadas en las siguientes cantidades que se ordenan de mayor a menor.

Tabla 20. Factores negativos consolidados de los encuestados

| Ítem        | Criterio       | Respuestas | Porcentaje  |
|-------------|----------------|------------|-------------|
| 1           | Medio ambiente | 17         | 27%         |
| 2           | Construcción   | 12         | 19%         |
| 3           | Gobierno       | 10         | 16%         |
| 4           | Uso de suelo   | 9          | 14%         |
| 5           | Turismo        | 9          | 14%         |
| 6           | Trabajo        | 7          | 11%         |
| <b>SUMA</b> |                | <b>64</b>  | <b>100%</b> |

Por otra parte, también se tienen recomendaciones y consideraciones positivas mencionadas por los encuestados sumadas en paréntesis, las cuales suman de manera conjunta los argumentos resultantes.

Recomendaciones (5):

- El gobierno debe reducir los impuestos básicos a los moradores de la zona donde se construyó la obra por el uso del agua y bosque (3),
- Se debe organizar un estudio de los impactos positivos y negativos que generó la construcción y durante el tiempo de operación de la hidroeléctrica. Este estudio debe ser socializado a las poblaciones aledañas y publicado para futuras referencias y posibles correcciones que deben realizarse de ser el caso (2).

Observaciones positivas (12):

- Instalaciones deportivas para uso general (1),
- Apoyaron en la construcción de escuelas (1),
- Soporte para finalizar parques en construcción (1),
- Obra que apoya el desarrollo del país con energía (2),
- Dotación de equipos informáticos y libros en la biblioteca de Chaco y Lumbaqui (1),
- Formación básica con algunos cursos de agroindustria para personas interesadas de área (2),
- Donación de 4 buses para movilizar a los estudiantes que tempranamente van a escuelas y colegios (2),
- Vías y carreteras secundarias para el movimiento de los pobladores, así como trasladar el material y equipos en la construcción de la central y embalse compensador (2).

## Discusión

Coca Codo Sinclair es una hidroeléctrica a gran escala con un embalse compensador, presa y túnel de conducción de agua a través de las montañas, lo que simboliza para el Ecuador un proyecto ambicioso, complicado en construcción y costoso (Ilustración 16), por consecuencia requiere de un análisis específico (Poveda-Burgos et al., 2017).

Según un estudio meteorológico e hidrológico en la cuenca del río Coca realizado por la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en el año 2018, se manifestó que el cambio y cobertura en el uso del suelo debido al desarrollo de la hidroeléctrica afecta directamente los flujos hídricos, observando un incremento en los flujos máximos en 9% y una disminución en los mínimos hasta 12% (Torres et al., 2018). Si bien el caudal del río Coca se relaciona directamente con múltiples variables como lluvia, precipitación, escorrentía, temperatura, época del año, etc., es variable para predecir su comportamiento futuro (Alvarez-Chiriboga, 2020). Sin embargo, los encuestados exponen que la observación de impactos es negativa en torno a estos cinco años (2016 - 2021) de operación del proyecto hidroeléctrico.

Por otro lado, comparando la percepción de los encuestados alrededor de CCS, en Colombia, estudios señalan que los proyectos hidroeléctricos raramente son impulsados por las poblaciones rurales de estas zonas debido a los cambios que implican porque en general, estos efectos ocurren en áreas urbanas remotas (Calderón et al., 2014). Resultados similares, como en Ecuador con esta encuesta que las comunidades apreciaron que Coca Codo Sinclair cambió las condiciones naturales sin considerar las necesidades sociales.

En India, se realizó una encuesta de 140 participantes sobre los impactos de los proyectos hidroeléctricos en el valle del río Bhagirathi. Entre los efectos adversos se encuentran la disminución de la flora, la fauna y la agricultura y el aumento de la contaminación del agua por la extracción de arena y piedra en los lechos de los ríos. Por el contrario, los beneficios percibidos son una mejor conectividad vial, transporte y turismo. La impresión principal es que los proyectos hidroeléctricos no son deseables en el área de estudio debido a las modificaciones que provocan en las áreas circundantes (Negi & Punetha, 2017).

En Brasil, se realizó una encuesta social a una población reasentada durante la construcción de la represa de Belo Monte en la Amazonía; se encuestaron 269 hogares residentes en Jatoba cerca del proyecto. Los resultados sugieren que una ligera mayoría siente que vale la pena el costo de la planta hidroeléctrica. Sin embargo, este apoyo disminuye a medida que aumentan los impactos percibidos (De Queiroz et al., 2019; Mayer et al., 2021). Brasil es una buena comparación con Ecuador debido a que los dos países poseen un clima tropical similar, condiciones sociales parecidas y cercanía entre los dos, es concluyente que los dos países observan que las condiciones y biodiversidad de la zona son diferentes luego de la construcción de centrales hidroeléctricas.

En Laos en el sudeste asiático, se ejecutó una encuesta social a 160 hogares en cuatro aldeas. Se encontró

que los proyectos hidroeléctricos influyeron en las comunidades, al examinar los impactos sociales de la construcción y gestión de embalses en las comunidades ubicadas aguas abajo de cuatro hidroeléctricas. Los resultados muestran que las centrales hidroeléctricas tuvieron impactos profundos en los medios de vida de los hogares, y la visibilidad de la comunidad es que la energía hidroeléctrica degrada el capital natural, reduciendo la naturaleza y productividad pesquera, estableciendo observaciones más negativas que positivas, es decir hallazgos similares que en Coca Codo Sinclair en Ecuador (Sivongxay et al., 2017; X. Zhang et al., 2018).

En Austria, la hidroelectricidad representa el 65.7% de la generación nacional desarrollada; por ello, expertos debaten sobre el futuro de esta fuente renovable, estableciendo limitaciones. Según una encuesta ejecutada, los resultados indican que existen perspectivas económicas complicadas e impactos ambientales y sociales para la población cercana a los proyectos hidroeléctricos (Wagner et al., 2015). Datos cotejados según el levantamiento en las comunidades de, El Chaco, San Luis, San Carlos y Lumbaqui, es concluyente que, si no se evalúan los impactos de la central Coca Codo Sinclair con información actualizada, existe el riesgo de amplificar los efectos sobre los ecosistemas, micro cuencas o microclimas donde se establece esta hidroeléctrica.

Como resultado de la encuesta y en comparación con los estudios citados, los proyectos hidroeléctricos de gran escala tienen impactos negativos en todo el mundo, al cambiar el caudal natural de los ríos afectando los ecosistemas, dañando el medio ambiente y trasladando personas de sus lugares de origen (Tarroja et al., 2019).

#### 5.1.1 Conclusiones de las encuestas en comunidades

Conforme a las encuestas ejecutadas cerca a la hidroeléctrica más grande del Ecuador, se obtuvo 183 respuestas recolectadas de 51% hombres y 49% mujeres, la edad principal de la población del área fue 30-39 años representando un 36%, seguido de 40-49 años con 22%. Asimismo, se observa que el 72% de la población vive alrededor de diez años o más en la zona. De ahí que, es preocupante que el 88%\* (preg. 21) de los encuestados muestran que no tienen satisfacción con los cambios sociales realizados por la hidroeléctrica en las provincias del Napo y Sucumbíos, y se recibió el comentario negativo que no debería existir la central Coca Codo Sinclair, comprobando una de las hipótesis planteadas:

- *“H1: El análisis de la producción hidroeléctrica resulta fundamental para considerar la dimensión de sostenibilidad en torno a la expansión energética e infraestructuras a gran escala”*

El proyecto hidroeléctrico más representativo del Ecuador se ubica en el cauce del río Coca, de los resultados, el **82%\*** (preg. 12) de los factores negativos ambientales observados es que la hidroeléctrica reduce las fuentes de alimentación minimizando los peces y alejando los animales debido a que el caudal hídrico disminuye por represar el agua, produce erosión por el cambio de uso de suelo y genera la muerte de especies en una población vulnerable por su ubicación lejana a grandes capitales, con trabajo limitado,



donde su fauna y flora es frágil, pero amplia.

De los encuestados, también se menciona que, la hidroelectricidad tiene el potencial de ser un empleador importante en la fase de construcción, pero, reducido en la operación con beneficios financieros que los miembros de las comunidades relacionaron como empleo. Y, la visibilidad general de las comunidades es que la hidroenergía degrada el capital natural de los ecosistemas, alterando el cauce natural de los ríos, estableciendo más impactos negativos en **79%\*** (preg. 26) que positivos según observación de los pobladores. Por otra parte, los encuestados perciben un 15% de resultados positivos como soporte para construcciones de canchas, parques, donación de buses para estudiantes, y desarrollo de vías secundarias.

Además, el **76%\*** (preg. 9) de encuestados piensan que no se generaron, o solo se realizaron de manera parcial, planes sociales, ambientales o culturales para remediar la intervención agresiva que causa la construcción y operación de la hidroeléctrica, demostrando inconformidad, por lo cual, el **83%\*** (preg. 20-21) de la población observa cambios e insatisfacción por la infraestructura de la central edificada en la zona oriental ecuatoriana con esta mega obra.

Es concluyente que, los proyectos hidroeléctricos en pocas ocasiones son propiciados por poblaciones de esas áreas debido a los cambios que implican (Turner, Jia, et al., 2017); dichos datos son correspondidos según la encuesta de las comunidades de San Luis, San Carlos, Lumbaqui y El Chaco, es así que, la hidroelectricidad es una fuente de producción de energía renovable, pero, no un proyecto hídrico sostenible en el tiempo. Se recomienda analizar integralmente la relación social, cultural, climática y ambiental de esta central que usa el recurso hídrico intensamente, donde el **75%\*** (preg. 10-18) de pobladores perciben modificaciones (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Barros-Enriquez, et al., 2022).

**Nota 5.** Memorias de Congreso. ISSN 2706-3674 (Digital Proceedings), July 24 – 28, 2022. 3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo para ponencia de un Congreso Internacional como muestra el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Barros-Enriquez, et al., 2022). A Perception of the Largest Hydropower Project in Ecuador (Coca Codo Sinclair). Organized by Centre for Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), in São Paulo, Brazil.

## 5.2 Análisis físico químico del recurso hídrico en proyectos hidroeléctricos

La pérdida de calidad de agua en la producción hidroeléctrica por cambios físicos, químicos y biológicos deben analizarse para justificar planes de sostenibilidad hídrica, en este sentido, para verificar dicha variación, a continuación, se exponen resultados de pruebas ejecutadas, se tomó **diez (10)** muestras en **cinco (5)** proyectos hidroeléctricos de Argentina, Uruguay y Ecuador.

### Metodología

En este estudio se aplica un análisis cuantitativo de tres parámetros físicos y ocho químicos, estudiando las

características del agua en la producción hidroeléctrica a través de la tabulación de datos y herramientas estadísticas para determinar los valores más representativos. Las muestras de agua se tomaron superficialmente; la recolección fue a las diez (10) am cuando había un equilibrio ambiental de temperatura (Cárdenas et al., 2021). Para la toma de muestras se usaron guantes para evitar la migración de contaminantes o bacterias. Además, las muestras se recogen hasta veinte (20) centímetros dentro de los ríos con pipetas para tomar dos (2) litros de cada una en un recipiente de plástico limpio.

Luego, las muestras de agua se colocaron en un recipiente en condiciones ambientales para que no cambiaran de temperatura hasta el día siguiente para ser entregadas al laboratorio. Entre los once (11) parámetros medidos en la **Tabla 21** se muestran las unidades basadas en el sistema internacional.

Tabla 21. Parámetros a medir en muestras de agua

| No. | Parámetro                 | Unidad            | Tipo de parámetro |
|-----|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 1   | pH                        | Unidades estándar | Químico           |
| 2   | Dureza total              | mg/l              | Químico           |
| 3   | Calcio                    | mg/l              | Químico           |
| 4   | Magnesio                  | mg/l              | Químico           |
| 5   | Sodio                     | mg/l              | Químico           |
| 6   | Bicarbonatos              | mg/l              | Químico           |
| 7   | Cloruros                  | mg/l              | Químico           |
| 8   | Sulfatos                  | mg/l              | Químico           |
| 9   | Sólidos totales           | mg/l              | Físico            |
| 10  | Sólidos disueltos totales | mg/l              | Físico            |
| 11  | Sólidos suspendidos       | mg/l              | Físico            |

Fuente:(Ministry of the Environment and Water of Ecuador, 2017).

El período de recolección de muestras fue de junio a diciembre de 2021 a los cinco (5) proyectos hidroeléctricos, uno en la frontera de Argentina y Uruguay y el resto en Ecuador como se muestra en la Ilustración 26.



Ilustración 26. Proyectos hidroeléctricos en Ecuador, Uruguay y Argentina para análisis  
Elaboración: El investigador. Fuente: (Open Street Map, 2022).

Una parte de la metodología consistió en visitas a los proyectos hidroeléctricos y comunidad para verificar el entorno, infraestructura, toma de muestras de agua y levantamiento de información para facilitar los elementos de investigación, actividad que se realizó con la ayuda de GPS para calcular la ubicación exacta, proceso que siguió las siguientes condiciones.

- a) Se tomó una primera muestra, ubicada un (1) kilómetro antes de ingresar el agua del recurso a las turbinas de generación en presas, embalses o agua circulante (agua arriba), y,
- b) La segunda toma se genera un (1) kilómetro después del paso de las centrales hidroeléctricas, lo que significa que se capta el agua de salida (agua abajo).

A continuación, una imagen de la metodología utilizada.



Ilustración 27. Ejemplo de muestreo en hidroeléctrica Hidroagoyan - Ecuador  
Elaboración: El investigador. Fuente:(Merino, 2021).

Como se mencionó, se tomaron superficialmente dos (2) muestras de agua para cada proyecto

hidroeléctrico. Luego, se utilizó la estadística para clasificar la información de mayor a menor relevancia y para reconocer los ítems u observaciones más críticos (Noblecilla-Alburque, 2020). Los cinco proyectos hidroeléctricos seleccionados fueron por la facilidad de tomar muestras de agua. Además, Salto Grande y Coca Codo Sinclair son plantas representativas en cada uno de los países con más de 1,000 [MW] de capacidad de producción.

Asimismo, las pruebas de agua se pensaron para descubrir las implicaciones del desarrollo de infraestructuras hidroeléctricas entre ecosistemas naturales (Naranjo-Silva & Alvarez del Castillo, 2022). A continuación, las especificaciones de cada proyecto hidroeléctrico con datos como país, capacidad, tipo de central, y otra información en la Tabla 22, es importante mencionar que todos los proyectos analizados son centrales con embalse de recuperación de agua como una de las infraestructuras con mayores cambios relacionados.

Tabla 22. Características de las centrales hidroeléctricas analizadas

| Parámetro  | Salto Grande <sup>a</sup> | Hidroagoyan <sup>b</sup> | Minas San Francisco <sup>c</sup> | Baba <sup>b</sup>   | Coca Codo Sinclair <sup>b</sup>                  |
|--|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|--|
| País   | Argentina & Uruguay       | Ecuador                  | Ecuador                          | Ecuador             | Ecuador  |
| Potencia [MW]  | 1,900                     | 156                      | 270                              | 42                  | 1,500  |
| Energía [GWh/año]  | 6,700                     | 1,000                    | 1,003                            | 161                 | 8,734  |
| Tipo central   | Embalse                   | Embalse                  | Embalse                          | Embalse             | Embalse  |
| Volumen de capacidad total en embalse [hm <sup>3</sup> ] | 5,000 hm <sup>3</sup>     | 760 hm <sup>3</sup>      | 140 hm <sup>3</sup>              | 100 hm <sup>3</sup> | 800 hm <sup>3</sup>                              |
| Superficie embalse [km <sup>2</sup> ]                    | 783 km <sup>2</sup>       | 237 km <sup>2</sup>      | 436 km <sup>2</sup>              | 11 km <sup>2</sup>  | 3,600 km <sup>2</sup> con el embalse compensador |
| Turbinas   | 14 Kaplan                 | 2 Francis                | 3 Pelton                         | 2 Kaplan            | 8 Pelton   |
| Año de inauguración                                      | 1979                      | 1996                     | 2019                             | 2013                | 2016   |
| Años de operación [No. /2023]                            | 44                        | 27                       | 4                                | 10                  | 7  |
| Altura de caída [m]                                      | 65                        | 35                       | 43                               | 27                  | 620  |
| M.S.N.M. (Altura proyecto)                               | 70                        | 1,651                    | 1,710                            | 95                  | 1,240  |

Elaboración: El investigador. Fuente: a. (Salto Grande - Binational Corporation, 2014); b. (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2018); c. (Lombardi, 2017).

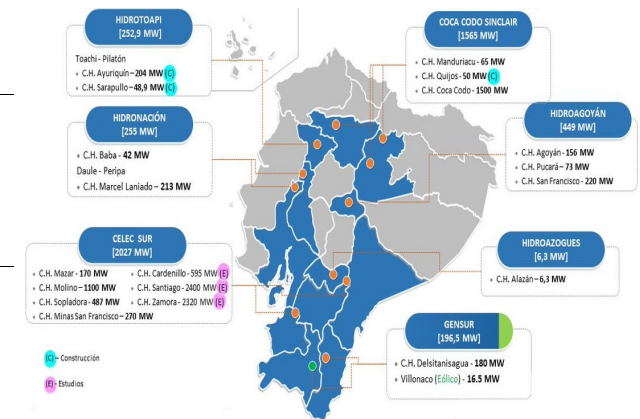
En el caso del proyecto Salto Grande está ubicado en el río Uruguay, entre Argentina y Uruguay, y brinda un interesante escenario de estudio porque el proyecto incluye energía para ambos países, afectando cambios similares en las características del agua (Gattás et al., 2018).

Adicional, los proyectos estudiados son relevantes para la literatura actual porque brinda una percepción a los formuladores de políticas energéticas para mejorar las condiciones sociales, económicas y ambientales en futuros desarrollos hidroeléctricos. Seguido, se muestran dos tablas, la primera con la

codificación de las muestras recolectadas en origen y, ubicación. Además, en la segunda tabla se presentan los resultados de laboratorio medidos.

Tabla 23. Muestras recolectadas de agua

| País                             | Río           | Proyecto | Denominación muestral | Lugar                                 | Observación de la toma                | Tipo de clima       | Mapa  |
|----------------------------------|---------------|----------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---|
| Argentina & Uruguay <sup>a</sup> | Uruguay       | 1        | Salto Grande          | A1                                    | Antes de la hidroeléctrica            | Represa             | Zona de transición subtropical sin estación seca, característico de la región noreste de Argentina, templado pampeano, el clima posee una temperatura media anual de 18.7° [C]. |
|                                  |               |          |                       | A2                                    | Posterior a la generación del embalse | Salto Grande        |   |
| Ecuador <sup>b</sup>             | Pastaza       | 2        | Hidroagoyan           | E1                                    | Antes de la hidroeléctrica            | Represa             | Región interandina del Ecuador muy próxima al centro geométrico y a las faldas del volcán Tungurahua, cuenta con un clima lluvioso tropical de 19° [C]                          |
|                                  |               |          |                       | E2                                    | Posterior a la generación del embalse | Hidroagoyan         |   |
|                                  | Jubones       | 3        | Minas San Francisco   | E3                                    | Antes de la hidroeléctrica            | Represa             | En la región subtropical cercana a los bosques de clima lluvioso, la temperatura promedio es de 19.5° [C].  |
|                                  |               |          |                       |                                       | Posterior a la generación del embalse | Minas San Francisco |   |
|                                  | Baba          | 4        | Baba                  | E4                                    | Antes de la hidroeléctrica            | Represa             | Centro-norte de la región litoral del Ecuador, con un clima lluvioso tropical de 27° [C] promedio.  |
|                                  |               |          |                       | E5                                    | Posterior a la generación del embalse | Baba                |   |
|                                  | Quijos - Coca | 5        | Coca Codo Sinclair    | E6                                    | Antes de la hidroeléctrica            | Represa             | Se localiza al norte de la Región Amazónica del Ecuador, con un clima tropical lluvioso de 18° [C] promedio.  |
| E7                               |               |          |                       | Posterior a la generación del embalse | Coca Codo Sinclair                    |                     |   |



Fuente: a. (Salto Grande - Binational Corporation, 2014); b. (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2013, 2018).

Tabla 24. Resultados físico químico de contraste del recurso hídrico

| Código de Proyectos/ Muestras |                           |        | Salto Grande |           | Hidroagoyán |           | Minas San Francisco |           | Baba       |           | Coca Codo Sinclair |           |
|-------------------------------|---------------------------|--------|--------------|-----------|-------------|-----------|---------------------|-----------|------------|-----------|--------------------|-----------|
|                               |                           |        | A1           | A2        | E1          | E2        | E3                  | E4        | E5         | E6        | E7                 | E8        |
| No.                           | Parámetro                 | Unidad | Río arriba   | Río abajo | Río arriba  | Río abajo | Río arriba          | Río abajo | Río arriba | Río abajo | Río arriba         | Río abajo |
| 1                             | pH                        | -      | 7.0          | 6.3       | 6.8         | 6.5       | 7.3                 | 6.8       | 7.1        | 7.0       | 8.0                | 6.3       |
| 2                             | Bicarbonatos              | mg/l   | 29.1         | 49,9      | 169.8       | 33.2      | 59.5                | 138.5     | 47.7       | 47,9      | 61,9               | 151.7     |
| 3                             | Calcio                    | mg/l   | 5.1          | 11.8      | 32.1        | 4.0       | 7.2                 | 22.8      | 8.3        | 8.0       | 18.2               | 26.3      |
| 4                             | Cloruros                  | mg/l   | 5.8          | 9.6       | 17.8        | 4.2       | 6.9                 | 15.5      | 6.9        | 6.1       | 7.7                | 23.3      |
| 5                             | Magnesio                  | mg/l   | 4.7          | 5.3       | 16.8        | 0.7       | 8.7                 | 13.9      | 0.5        | 0.3       | 2.1                | 14.7      |
| 6                             | Sodio                     | mg/l   | 3.0          | 5.0       | 37.0        | 2.0       | 8.0                 | 25,0      | 3.0        | 5.0       | 4.0                | 19.0      |
| 7                             | Sulfatos                  | mg/l   | 15.2         | 14.5      | 44.2        | 14.2      | 19.6                | 46.4      | 5.6        | 4.2       | 15.3               | 37.6      |
| 8                             | Sólidos suspendidos       | mg/l   | 132.0        | 120.0     | 64.0        | 32,0      | 114.0               | 43.0      | 29,0       | 20.0      | 44.0               | 31.0      |
| 9                             | Sólidos disueltos totales | mg/l   | 69.0         | 40,0      | 206.0       | 84.0      | 245.0               | 19.0      | 59.0       | 38.0      | 176.0              | 72.0      |
| 10                            | Dureza total              | mg/l   | 31.8         | 51.0      | 149.6       | 12.8      | 189.0               | 114.3     | 26.7       | 21.4      | 54.2               | 26.1      |
| 11                            | Solidos totales           | mg/l   | 182.0        | 156.0     | 290.0       | 56,0      | 120.0               | 50.0      | 68.0       | 60.0      | 248.0              | 120.0     |

Elaboración: El investigador. Fuente: (LABOLAB, 2020).

Nota: Río Arriba = Antes de pasar el agua = Entrada a las turbinas = Aguas arriba de la hidroeléctrica (presa)  
Río Abajo = Después de pasar el agua por los sistemas = Salida del agua por las turbinas = Aguas abajo

Por otra parte, seguidas imágenes ilustrativas de los lugares y causas hídricas donde se generó la toma de las muestras de agua de cada proyecto hidroeléctrico:



Ilustración 28. Central hidroeléctrica Salto Grande - Argentina & Uruguay  
Fuente: (Andreotti, 2014).



Ilustración 29. Central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair - Ecuador  
Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2018).



Ilustración 30. Embalse compensador Coca Codo Sinclair – Ecuador  
Fuente: El Investigador





Ilustración 31. Represa y Central de la hidroeléctrica Hidroagoyan - Ecuador

Fuente: El Investigador



Ilustración 32. Hidroeléctrica Baba - Ecuador

Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2018).

Como se presenta en la Tabla 23, los cinco proyectos hidroeléctricos son establecidos en áreas tropicales con temperaturas de 18 a 27° C y están en regiones amazónicas donde los recursos hídricos tienen caudales importantes para construir centrales hidroeléctricas (Tupiño Salinas et al., 2019). Además, con estos valores presentados se generan dos tipos de tabulaciones para definir diferencias a los datos físicos y químicos de las tomas, a continuación, se especifica el cálculo:

$$T1 = |\text{Agua entrada} - \text{Agua turbinada}| \quad \text{Ecuación 4}$$

Los resultados de la Tabla 24 fueron determinados en laboratorio en base a los estándares categorizados del Sistema de Acreditación Ecuatoriano bajo los lineamientos de la norma ISO 17025 para ensayos en condiciones constantes a temperaturas de 24° [C] y 37% de humedad relativa. La comparación tomó los diez parámetros en las mismas unidades (miligramos por litro), excluyendo el ph (LABOLAB, 2020).

## Resultados

Como se mencionó, se tabula los parámetros para verificar cambios en las muestras de agua, calculando el cambio promedio y porcentual por parámetro con los datos de entrada y salida. Además, se agrega el límite de datos permisibles para el agua del río en condiciones naturales, de acuerdo con la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente del Ecuador, se tomó esta normativa porque Ecuador tiene la mayor cantidad de muestras en el estudio.

Tabla 25. Tabulación diferencial de los datos recolectados

| Parámetro                 | Unidad | Promedio Entrada | Promedio Salida | Cambio porcentual (Salida vs. Entrada) | Máximo permitido |
|---------------------------|--------|------------------|-----------------|--|------------------|
| Cloruros                  | mg/l   | 9.0              | 11.7            | 30.4%                                  | 150              |
| Sulfatos                  | mg/l   | 20.0             | 23.4            | 17.0%                                  | 200              |
| Bicarbonatos              | mg/l   | 73.6             | 84.2            | 14.4%                                  | <b>18</b>        |
| Magnesio                  | mg/l   | 6.6              | 7.0             | 6.4%                                   | 30               |
| Calcio                    | mg/l   | 14.2             | 14.6            | 2.7%                                   | 100              |
| Sodio                     | mg/l   | 11.0             | 11.2            | 1.8%                                   | 50               |
| Sólidos suspendidos       | mg/l   | 76.6             | 49.2            | -35.8%                                 | 180              |
| Dureza total              | mg/l   | 90.3             | 45.1            | -50.0%                                 | 300              |
| Sólidos totales           | mg/l   | 181.6            | 88.4            | -51.3%                                 | 1000             |
| Sólidos disueltos totales | mg/l   | 151.0            | 50.6            | -66.5%                                 | 350              |

Elaboración: El investigador

De las muestras, algunos parámetros muestran una variación positiva que significa que el promedio de cada medición en la estructura hidroeléctrica aumenta aguas abajo (salida de turbinas); además, algunos valores son negativos, es decir aguas arriba en el embalse, los parámetros son mayores.

Además, al hacer un cambio a valor absoluto a las tabulaciones se verifican las características del agua más modificados como los sólidos disueltos totales (67 %), los sólidos totales (51 %) y la dureza (50 %) son los tres resultados principales con el cambio significativo. Además, los bicarbonatos son el único parámetro que superó el límite máximo permisible. Adicionalmente, agrupando los datos promedio (mayor a menor), se toman los detalles en valor absoluto para encontrar las incidencias a verificar que más se destacan (Tabla 26).

Tabla 26. Diferencia por parámetro de salida y entrada en orden descendente

| No. | Parámetro                 | Diferencia [mg/l]<br>(Entrada - Salida) | Diferencia porcentual [%] | Diferencia acumulada [%] |
|-----|---------------------------|---|---------------------------|--------------------------|
| 1   | Sólidos disueltos totales | 100.40                                  | 35.37%                    | 35.4%                    |
| 2   | Sólidos totales           | 93.20                                   | 32.83%                    | 68%                      |
| 3   | Dureza total              | 45.15                                   | 15.90%                    | 84%                      |
| 4   | Sólidos suspendidos       | 27.40                                   | 9.65%                     | 94%                      |
| 5   | Bicarbonatos              | 10.61                                   | 3.74%                     | 97%                      |
| 6   | Sulfatos                  | 3.39                                    | 1.19%                     | 99%                      |
| 7   | Cloruros                  | 2.73                                    | 0.96%                     | 100%                     |
| 8   | Magnesio                  | 0.42                                    | 0.15%                     | 100%                     |
| 9   | Calcio                    | 0.38                                    | 0.13%                     | 100%                     |
| 10  | Sodio                     | 0.20                                    | 0.07%                     | 100%                     |
|     | Suma                      | 283.88                                  | 100%                      | -                        |

Elaboración: El investigador

### Discusión

Según los análisis realizados de Argentina, Uruguay y Ecuador, antes y después de los equipos de generación hidroeléctrica, el agua de entrada tiene un pH neutro y presenta diferencias en las características del agua. Sin embargo, se interpreta que la calidad del agua es buena porque no excede los límites permisibles de las aguas naturales, no contamina el ambiente, sin embargo, el agua se utiliza para generar energía, se estanca en represas.

Las principales discrepancias según la diferencia porcentual de la Tabla 26, son los Sólidos Totales Disueltos con 35.4%, Sólidos Totales con 32.8% y Dureza Total con 15.9% del promedio global por el agua utilizada en la generación hidroeléctrica.

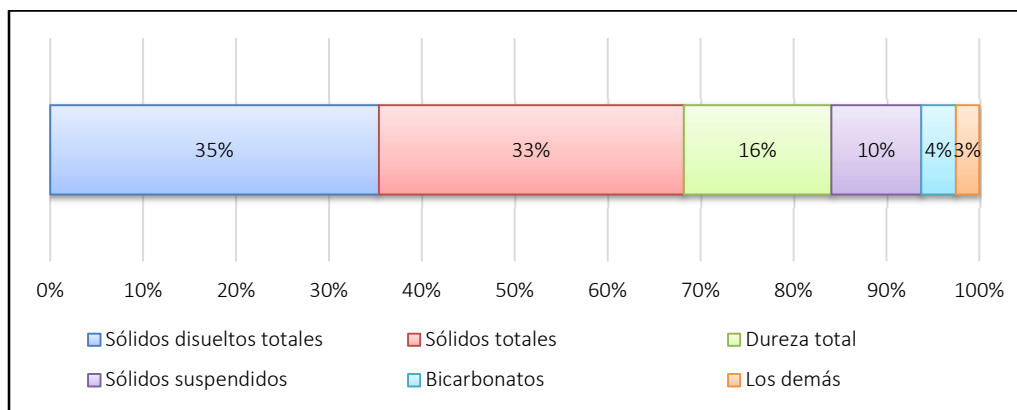


Ilustración 33. Parámetros principales con desviaciones

Elaboración: El investigador

Los parámetros medidos muestran que los diversos tipos de sólidos se presentan aguas arriba a diferencia

de aguas abajo se debe al estancamiento del agua que genera material en suspensión. Además, la presencia de material en suspensión impide el paso de la luz como indicador negativo de las características del agua; evidencia falta de oxígeno (Reisancho & Rivera, 2018). Por otro lado, el magnesio y los cloruros muestran que el parámetro de dureza total se incrementa al momento de embalsar el recurso natural.

Relacionando los hallazgos, Hartmann (2020) menciona que se han realizado muy pocos estudios que evalúen los posibles cambios en el agua de los ríos al desarrollar proyectos hidroeléctricos, y los realizados sugieren que las divergencias en el volumen de entrada influirán significativamente en los proyectos con represas porque las especies mueren y la materia orgánica se prolifera (Hartmann, 2020).

Además, Winemiller (2016) encuentra que la cantidad de tiempo que un recurso hídrico está represado cambia la calidad del agua en un estudio para equilibrar la energía hidroeléctrica y biodiversidad en los ríos Amazonas, Congo y Mekong se menciona que muchos proyectos se construirán para 2030, alrededor de 324 en la región Amazónica, 13 en el Congo y 98 en el Mekong. El estudio recomienda que el beneficio de un mayor suministro de energía basado en hidroelectricidad no debe superar los costos de pesca, agricultura y pérdidas en las poblaciones rurales del Amazonas, Congo y Mekong, por lo cual, es fundamental mejorar la forma en que se evalúan y ubican las represas (Winemiller et al., 2016; Zhong et al., 2019).

Otra comparación surge de Gnatyshyna (2020) que investiga impactos de la hidroelectricidad en la vida acuática, específicamente del molusco (unio tumidus) en ríos de Ucrania utilizando marcadores bioquímicos con pruebas de eco-toxicidad. Las muestras analizaron 11 indicadores y, como resultado de la falta de investigación, las pruebas realizadas detectaron que existen niveles insuficientes de proteína en el recurso hídrico para la generación hidroeléctrica, a diferencia de aguas en condiciones naturales (Gnatyshyna et al., 2020). La evaluación de Ucrania, como Ecuador, Argentina y Uruguay, muestran un impacto ambiental en el agua utilizada para la producción de energía y la necesidad de promover políticas hidrodinámicas para evitar daños a ecosistemas.

Eloranta (2018) estudió la variación ambiental en Noruega por el desarrollo hidroeléctrico; el análisis detalla los impactos en las poblaciones de peces de los embalses, especialmente en la trucha marrón presente en 69 de los embalses de estudio. Los resultados mostraron la necesidad de comprender cómo la energía hidroeléctrica modifica los ecosistemas, las características bióticas y abióticas de los embalses a partir del tamaño y condición de la densidad de la trucha, que en la actualidad se reduce alrededor del 5% de la densidad poblacional. Los resultados demuestran que el desarrollo hidroeléctrico modifica fuertemente los sistemas ambientales locales, la comunidad biótica cambia los ecosistemas y altera las características de los recursos hídricos (Eloranta et al., 2018; Sivongxay et al., 2017).

Cabrera (2021) investigó la composición y distribución de la comunidad de macroinvertebrados a lo largo de dos ríos (Coca y Aguarico) en la Amazonía ecuatoriana. La prueba se realizó en 15 lugares y los macroinvertebrados se utilizaron para relacionar la calidad del agua. Los resultados sugieren que la

diversidad de macroinvertebrados es generalmente escasa. Sin embargo, fue abundante en sitios sin represas, lo que demuestra que los proyectos hidroeléctricos cambiaron los ecosistemas naturales. Finalmente, de los hallazgos se sugiere llenar los vacíos de conocimiento relacionados con bio evaluaciones en los proyectos hidroeléctricos (Cabrera et al., 2021). Como se encontró en este estudio, las muestras exponen cambios en algunos parámetros químicos y físicos; por lo tanto, la gestión ambiental adecuada es imperativa en los ecosistemas acuáticos tropicales para reducir los impactos, ya que las represas hidroeléctricas alteran la naturaleza del agua.

Según Oviedo (2018) en un estudio de impactos hidroeléctricos en los ecosistemas, concluye que en los proyectos con embalses se generan varios efectos negativos, como la descomposición de la materia orgánica que favorece la generación de gases de efecto invernadero como el metano, además desarrolla la concentración de macronutrientes en el agua estancada, aumentando la producción de fitoplancton, reduciendo la concentración de oxígeno disuelto y calidad del agua (Oviedo-Ocaña, 2018; Qin et al., 2020).

En general, la transferencia de tecnología hidroeléctrica es un proceso técnico e implica una práctica política que a veces no es sostenible por el medio ambiente (Guerra et al., 2019). Con los datos de los estudios, se abre la discusión del desarrollo hidroeléctrico que trae beneficios, pero conlleva impactos ambientales y sociales inevitables (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021a); por lo tanto, en torno a los diferentes estudios citados, es necesario exponer, si es relativamente necesario construir hidroeléctricas con represas porque se demostró que modifican las condiciones naturales del agua.

Finalmente, una brecha de este estudio es que toma una pequeña comparación de estudio con diez muestras en cinco proyectos hidroeléctricos, lo que brinda una gran oportunidad para desarrollar más comparaciones. Por ejemplo, hoy en día en Ecuador hay 71 centrales hidroeléctricas en todo el país (CELEC, 2020). La novedad del presente trabajo es el análisis de las características del agua por parte del agua de embalse, destacándose la presencia de sólidos a la entrada de las turbinas como nuevo conocimiento obtenido de este estudio.

### **5.2.1 Conclusiones de las muestras de agua**

Conforme los análisis ejecutados en el agua dulce de Argentina, Uruguay y Ecuador, antes y después del paso hidroeléctrico, las muestras presentan un pH neutro y exponen diferencia en varios parámetros analizados, de ahí que, se comprueba una de las hipótesis planteadas:

- *“H2: Existe diferencia en las características y calidad del recurso hídrico por el paso de agua antes y después de una hidroeléctrica en equipos de generación”*

Este estudio concluyó a partir de las diez muestras que las divergencias de los parámetros medidos son variables, y algunos rangos muestran desviaciones marcadas, por ejemplo, sólidos disueltos totales (35%), sólidos totales (33%) y dureza (16%) como se indica la Ilustración 33.

Existen diferencias entre las pruebas de aguas (arriba vs. abajo) en las cinco hidroeléctricas (Salto Grande, Hidroagoyan, Represas Baba, Minas San Francisco y Coca Codo Sinclair) debido a que los proyectos con represas estancan el agua aumentando el desarrollo de los sólidos, comprobándose que la expansión de las infraestructuras extensivas, como represas, genera la presencia de materia en suspensión, frente al agua de salida en la descarga, estos materiales son arcilla, limo, materia orgánica, descomposición vegetal y cuerpos vivos como algas, caracoles y plantas flotantes que producen opacidad, como razón de la diferencia de color en las muestras.

De las muestras recolectadas, se interpreta que los proyectos hidroeléctricos con acumulación de agua (presas) modifican las condiciones ambientales, relacionando impactos a la acumulación de agua en embalses y variaciones hidrológicas e inundaciones de terrenos aguas arriba de las centrales que modifican las características naturales.

Se recomienda implementar planes mensuales para verificar las condiciones del agua y ecosistemas, monitoreando el comportamiento del clima para emitir mejoras o arreglos continuamente para todos los proyectos hidroeléctricos (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Barros-Enrique, et al., 2022).

Futuras líneas de estudio pueden comparar y analizar las mejoras en el uso eficiente del agua que requiere la generación y así mitigar impactos intangibles pasados por alto, como cambios ambientales y modificación del agua. Adicional otra línea es analizar las características biológicas de la calidad del agua en proyectos hidroeléctricos, como el aumento de algas y cianobacterias como resultado observado del cambio climático, temperaturas más altas, mayor carga de nutrientes y eventos extremos de escorrentía (Naranjo-Silva, Rivera-Gonzalez, et al., 2022).

**Nota 6.** Analysis of Water Characteristics by the Hydropower Use (Up-Stream and Downstream): A Case of Study at Ecuador, Argentina, and Uruguay.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Rivera-Gonzalez, et al., 2022). Analysis of Water Characteristics by the Hydropower Use (Up-Stream and Downstream): A Case of Study at Ecuador, Argentina, and Uruguay. *Journal of Sustainable Development*, 15(4), 71. <https://doi.org/10.5539/jsd.v15n4p71>

**Nota 7.** A physical-chemical study of water resources in 5 hydropower projects.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo científico como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Barros-Enrique, et al., 2022). A physical-chemical study of water resources in 5 hydropower projects. *Brazilian Journal of Development*, 8(11), 73168–73185. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n11-158>

### 5.3 Análisis del Ecuador (Variables relacionadas a la hidroelectricidad)

El Ecuador es un pequeño país de Sudamérica caracterizado por una singular topografía, diversidad de zonas climáticas y prolífica población de especies vegetales y animales, según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador la riqueza biológica se refleja en una amplia gama de organismos, y el 10% de las especies de plantas vasculares del mundo se encuentran en un área que apenas representa el 2% de la superficie total de la Tierra (Guilcatoma-Aimacaña, 2010; Mena-Vasconez, 2018).

En Ecuador, desde hace 15 años se desarrollan grandes infraestructuras hidroeléctricas por las condiciones tropicales con fuertes corrientes hídricas, pero, hasta qué punto es realmente sostenible este sobre uso de agua, según la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA por sus siglas en inglés), el Ecuador ocupó el tercer lugar después de China y Brasil para países que agregaron nueva capacidad en el año 2016 (International Hydropower Association, 2018b). Además, con corte 2020, el Ecuador generó el 80% de toda la energía mediante hidroelectricidad (CELEC, 2020). A continuación, la ilustración de los proyectos hidroeléctricos en las principales cuencas hídricas del país para referenciar este tipo de obras:

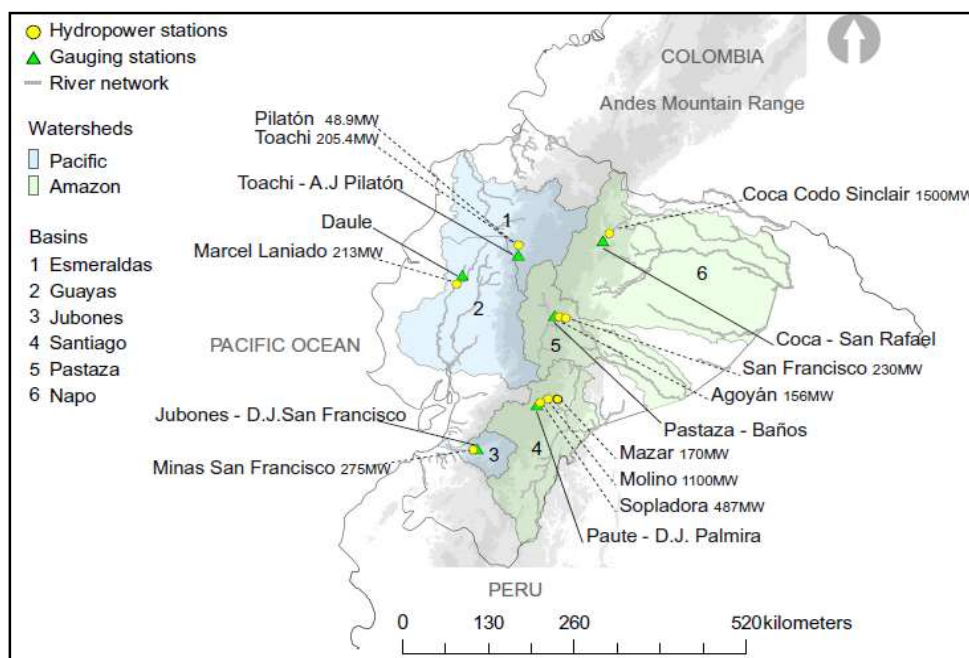


Ilustración 34. Principales cuencas y estaciones hidroeléctricas de Ecuador

Fuente: (Carvajal et al., 2017).

Por otra parte, datos del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables del Ecuador en su Plan Maestro del Electricidad 2027 establecen que, la hidroelectricidad en el país tiene en 11 cuencas hidrográficas, un Potencial Técnico factible de 31,000 [MW], y un Potencial Económico factible en 22,000 [MW] (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2019).

En este contexto, el potencial aprovechado corresponde a la capacidad hidroeléctrica instalada de 5,107 [MW] al 2021 de potencia efectiva en un total de 71 centrales hidroeléctricas. Con ello, el porcentaje del

Potencial económicamente factible aprovechado es 23.21%; y el porcentaje del Potencial económicamente por aprovechar asciende al 76.79% (International Hydropower Association, 2022).

Con estos antecedentes se abre una discusión de la hidroelectricidad en el Ecuador, y para robustecer los hallazgos, se consultó información a las entidades encargadas de la formulación de políticas en control energético, ambiental, climatológico e hidrológico siguientes:

- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables del Ecuador (MERNR),
- Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador (INABIO),
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI),
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE).

Con las entidades definidas e información recibida del Ecuador, seguido, se tabula, discute y comparará con otros países la información del uso promedio de agua, factor de potencia, costo de las últimas centrales, entre otros datos.

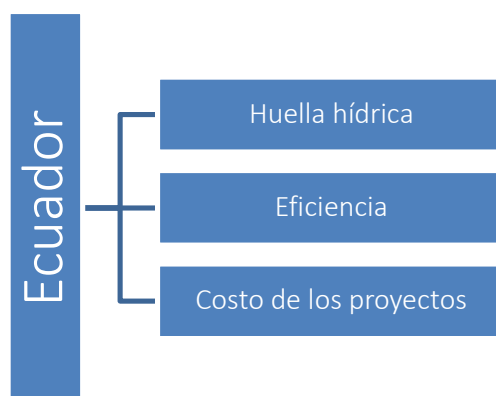


Ilustración 35. Análisis para el Ecuador

### 5.3.1. Huella hídrica (Uso de agua por kWh)

Como primer punto se tiene información de la Corporación Eléctrica del Ecuador E.P. (CELEC) entidad adscrita al Ministerio de Energía, los datos del uso de agua son de 10 centrales hidroeléctricas que se ordenan alfabéticamente e indica el requerimiento hídrico bruto por generación de energía (kWh).

Tabla 27. Potencia y uso bruto promedio de agua en las hidroeléctricas del Ecuador

| Nro. | Central Hidroeléctrica | Tipo de central | Potencia [MW] | Uso bruto de agua [litros/kWh] |
|------|------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|
| 1    | Agoyan                 | Embalse         | 156           | 223.1                          |
| 2    | Baba                   | Multipropósito  | 42            | 1,425.1                        |
| 3    | Coca Codo Sinclair     | Embalse         | 1,500         | 65.8                           |
| 4    | Manduriacu             | Embalse         | 60            | 857.8                          |
| 5    | Minas San Francisco    | Embalse         | 270           | 140.9                          |
| 6    | Paute Mazar            | Embalse         | 170           | 236.7                          |



|                 |                 |                                |              |              |
|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------|--------------|
| <b>7</b>        | Paute Molino    | Embalse                        | 1,100        | 27           |
| <b>8</b>        | Paute Sopladora | Cascada Canal de Molino        | 487          | 66.9         |
| <b>9</b>        | Pucara          | Embalse                        | 73           | 60.6         |
| <b>10</b>       | San Francisco   | Cascada por canal desde Agoyan | 270          | 162.8        |
| Total           |                 | -                              | 4,128        | 3,266.70     |
| <b>Promedio</b> |                 | -                              | <b>412.8</b> | <b>326.7</b> |

Elaboración: El Investigador. Nota. Período 2014 – 2019

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Como muestra la Tabla 27, se tienen datos del uso bruto hídrico por kWh, pero es necesario integrar el criterio del uso neto de agua o huella hídrica, concepto que se calcula mediante varias teorías que parten desde el uso bruto como requerimiento general para generar energía, pero, la huella hídrica es el uso hídrico para hidrogenerar que contempla pérdidas de evapotranspiración tanto antes de llenar los embalses como posterior, y que dependen de la ubicación de cada proyecto.

- Según Tor Haakon Bakken, Anund Killingtveit y Knut Alfredsen, en un artículo científico de revisión global establece que los valores netos (huella hídrica) en promedio son menor en un 40% de los valores brutos debido a las estimaciones de las metodologías diversas de evaporación y por naturaleza, específica de cada sitio donde se ubican los proyectos hidroeléctricos (Bakken et al., 2017).
- Según Laura Scherer, el uso neto hídrico es aproximadamente 40% menor que el uso bruto de agua debido a la evapotranspiración de la superficie donde se instalan las hidroeléctricas que varía y que generalmente son áreas tropicales con altos indicadores de humedad (Scherer & Pfister, 2016).
- Según Haakon Bakken en otro análisis en los casos que se calculan las estimaciones de uso bruto hídrico, los valores netos están en el rango menor de aproximadamente 12 – 60% (promedio 36%) del bruto hidroeléctrico (Bakken et al., 2013).

Con estos antecedentes, el valor promedio de los estudios arroja 38% (40%, 12%, 60%, 40%), al respecto, de manera conservadora se define este valor útil en relación del uso bruto y neto, estimación que corresponde a los ciclos naturales de cobertura terrestre, y ciclo hidrológico, por lo tanto, la huella hídrica hidroeléctrica teórica para Ecuador sería:

Tabla 28. Uso neto hidroeléctrico en centrales hidroeléctricas de Ecuador

| <b>Nro.</b> | <b>Central Hidroeléctrica</b> | <b>Uso bruto de agua [litros/kWh]</b> | <b>Uso neto de agua [litros/kWh] menor en 38%</b> |
|-------------|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| <b>1</b>    | Agoyan                        | 223.1                                 | 138.3   |
| <b>2</b>    | Baba                          | 1,425.1                               | 883.6   |
| <b>3</b>    | Coca Codo                     | 65.8                                  | 40.8  |
| <b>4</b>    | Manduriacu                    | 857.8                                 | 531.8   |
| <b>5</b>    | Minas San Francisco           | 140.9                                 | 87.4  |
| <b>6</b>    | Paute Mazar                   | 236.7                                 | 146.8   |

|                 |                 |              |              |
|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| 7               | Paute Molino    | 27           | 16.7         |
| 8               | Paute Sopladora | 66.9         | 41.5         |
| 9               | Pucara          | 60.6         | 37.6         |
| 10              | San Francisco   | 162.8        | 100.9        |
| <b>Promedio</b> |                 | <b>326.7</b> | <b>202.5</b> |

Elaboración: El Investigador. Nota. Período 2014 – 2019

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Como se muestra para la potencia promedio hidroeléctrica de 327 [MW] se requiere alrededor de 202.5 [litros/kWh] = 0.202 [m<sup>3</sup>/kWh] = 56.25 [m<sup>3</sup>/GJ] netos según datos de las 10 centrales, indicador relevante de mencionar y comparar con estudios de otros países. De manera ilustrativa seguido la imagen de los 10 proyectos hidroeléctricos estudiados en el Ecuador.



Ilustración 36. Principales centrales hidroeléctricas de Ecuador

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Open Street Map, 2022).

Por otra parte, como segundo análisis, se ordenan los datos por representatividad hidroeléctrica, verificando el mayor uso hídrico de los proyectos, obteniendo en frecuencia acumulada, el siguiente orden:

Tabla 29. Uso promedio neto de agua en las hidroeléctricas del Ecuador

| Central Hidroeléctrica | Potencia [MW] | Uso neto promedio [litros/kWh] | Uso neto promedio [m <sup>3</sup> /kWh] | Uso neto promedio [m <sup>3</sup> /GJ] | Frecuencia [%] | Frecuencia acumulada [%] | Pareto |
|------------------------|---------------|--------------------------------|---|--|----------------|--------------------------|--------|
| Baba                   | 42            | 883.56                         | 0.884                                   | 245.44                                 | 43.6%          | 43.6%                    | 80%    |
| Manduriacu             | 60            | 531.84                         | 0.532                                   | 147.73                                 | 26.2%          | 69.8%                    |        |
| Paute Mazar            | <b>170</b>    | 146.75                         | 0.147                                   | 40.77                                  | 7.2%           | 77.1%                    |        |
| Agoyan                 | 156           | 138.32                         | 0.138                                   | 38.42                                  | 6.8%           | 83.9%                    |        |

|                     |              |                 |              |              |             |       |             |
|---------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------|-------------|
| San Francisco       | 270          | 100.94          | 0.101        | 28.04        | 4.9%        | 88.9% |             |
| Minas San Francisco | 270          | 87.36           | 0.087        | 24.27        | 4.3%        | 93.2% |             |
| Paute Sopladora     | 487          | 41.48           | 0.041        | 11.52        | 2.1%        | 95.3% | 20%         |
| Coca Codo Sinclair  | 1,500        | 40.80           | 0.041        | 11.33        | 2.0%        | 97.3% |             |
| Pucara              | 73           | 37.57           | 0.038        | 10.44        | 1.8%        | 99.2% |             |
| Paute Molino        | 1,100        | 16.74           | 0.017        | 4.65         | 0.8%        | 100%  |             |
| Total ( $\Sigma$ )  | <b>4,128</b> | <b>2,025.35</b> | <b>2.025</b> | 562.50       | <b>100%</b> | -     | <b>100%</b> |
| Promedio            |              | <b>202.5</b>    | <b>0.202</b> | <b>56.25</b> |             |       |             |

Elaboración: El Investigador. Nota. Período 2014 – 2019

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Como dato importante, estos 10 proyectos hidroeléctricos suman una potencia de 4,128 [MW] del total de 5,107 [MW] de generación reportada en Ecuador en el año 2021, es decir se tiene datos del 80.8% de la capacidad hidroeléctrica (International Hydropower Association, 2022).

## Discusión

En esta parte se genera una comparación de varios estudios y teorías que relacionan la huella hídrica desde el uso bruto de agua por generar hidroelectricidad. Por ejemplo, Diana Robescu en el año 2019 estudió varios proyectos hidroeléctricos en diversas regiones a nivel mundial, el análisis contiene tres enfoques diferentes que cuantifican la huella hídrica del embalse, uso neto de agua y balance hídrico, estableciendo que la huella hídrica está en el orden siguiente:

Tabla 30. Uso promedio de agua en diversas estaciones

| Nro. | Proyecto              | País          | Potencia [MW] | Evaporación [mm/año] | Uso neto de agua [m <sup>3</sup> /GJ] |
|------|-----------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1    | Kulekhami             | Nepal         | 60            | 1,574                | 47.0                                  |
| 2    | Fortuna               | Panamá        | 300           | 2,251                | 4.30                                  |
| 3    | Vidaru                | Rumania       | 220           | 1,136                | 4.00                                  |
| 4    | Waitaki               | Nueva Zelanda | 105           | 1,153                | 3.98                                  |
| 5    | Playas                | Colombia      | 204           | 1,663                | 3.60                                  |
| 6    | Arapuni               | Nueva Zelanda | 196.6         | 844                  | 2.57                                  |
| 7    | Chivor (La Esmeralda) | Colombia      | 1,008         | 1,607                | 1.70                                  |
|      | <b>Promedio</b>       |               | <b>299.1</b>  | <b>1,461.1</b>       | <b>9.6</b>                            |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Robescu & Bondrea, 2019).

Laura Scherer y otros autores en el año 2016, en una evaluación global de la huella hídrica hidroeléctrica detallan cálculos en varios proyectos a lo largo del mundo, el análisis comprendió datos de alrededor de 1,500 centrales que cubren el 43% de la generación hidroeléctrica mundial en 108 países con centrales que

producen desde 76 [MWh] hasta 92 [MWh], del estudio los investigadores calcularon la huella hídrica promedio en **38.9** [m<sup>3</sup>/GJ] (Scherer & Pfister, 2016).

Leenes Gerbers menciona que, independientemente del método de cálculo de la huella hídrica en las hidroeléctricas del mundo, en **Nueva Zelanda** encontró que la huella hídrica determinada es **22** [m<sup>3</sup>/GJ] dividiendo la evaporación global de los reservorios de agua superficial por la generación hidroeléctrica global (Gerbers-Leenes et al., 2009).

Adicional, en un estudio de Scherer y Pfister al 2016, estudiaron 7 centrales globalmente para diferentes países, las cuales representan los datos de huella hídrica siguiente.

Tabla 31. Uso promedio de agua de centrales hidroeléctricas globales

| Nro.            | Proyecto        | País              | Potencia [MW] | Uso neto de agua [m <sup>3</sup> /GJ] | Uso neto de agua [m <sup>3</sup> /kWh] |
|-----------------|-----------------|-------------------|---------------|---------------------------------------|--|
| 1               | Cahora Bassa    | Mozambique        | 2,075         | 75.9                                  | 0.273                                  |
| 2               | Davis Bor       | Estados Unidos    | 251           | 63.1                                  | 0.227                                  |
| 3               | Churchill Falls | Canadá            | 5,429         | 10.1                                  | 0.036                                  |
| 4               | Tres Gargantas  | China             | 14,000        | 4.88                                  | 0.018                                  |
| 5               | Itaipu          | Brasil - Paraguay | 22,500        | 4.11                                  | 0.015                                  |
| 6               | Nurek           | Tayikistán        | 3,003         | 2.58                                  | 0.009                                  |
| 7               | Manapouri       | Nueva Zelanda     | 850           | 2.57                                  | 0.009                                  |
| <b>Promedio</b> |                 |                   | <b>6,076</b>  | <b>23.32</b>                          | <b>0.084</b>                           |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Scherer & Pfister, 2016).

Mekonnen y Hoekstra en otro análisis de la huella hídrica de 35 centrales hidroeléctricas en los 5 continentes, calculan en **68** [m<sup>3</sup>/GJ] el promedio, los proyectos analizados gráficamente se muestran a continuación (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

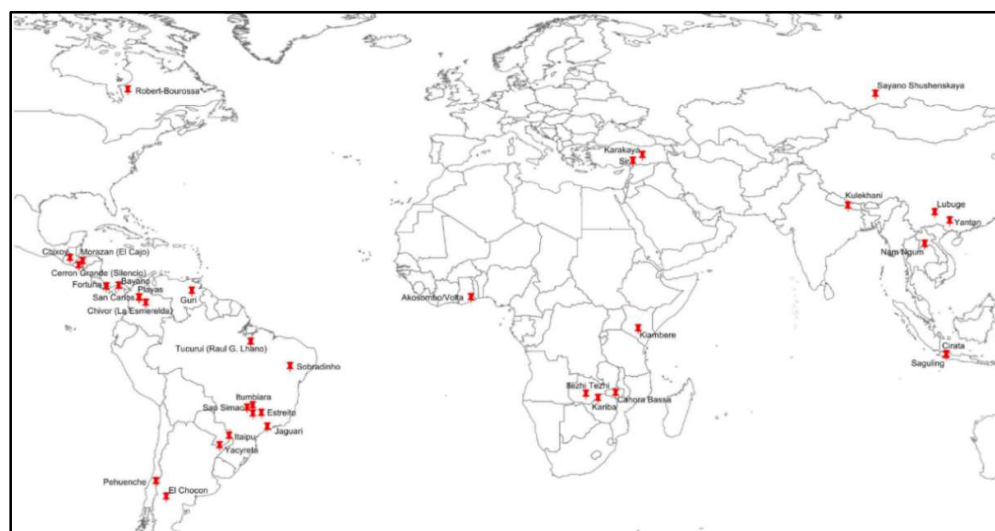


Ilustración 37. Proyectos hidroeléctricos analizados

Fuente: (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

Por otra parte, según Stephan Pfister en un análisis del año 2020 de la huella de escasez de agua de la energía hidroeléctrica (WSFP por sus siglas en inglés), selecciona un método de evaluación de impacto aplicado a 1,473 plantas hidroeléctricas que cubren 100 países calculando en **70.6** [m<sup>3</sup>/GJ] la huella hídrica promedio de dichas centrales (Pfister et al., 2020).

Lian Sun, en un estudio de la cuenca Jinsha, cuenca con el mayor potencial hidroeléctrico en el suroeste de China que comprende los ríos Yalong y Jinsha donde existen varias presas grandes construidas como por ejemplo el proyecto Ertan. El análisis establece que la huella hídrica en la hidroeléctrica Ertan es **16.5** [m<sup>3</sup>/GJ] (Sun et al., 2021).

Clívia Dias Coelho por otra parte, genera una comparación de la huella hídrica en la cuenca del río Tocantins de Brasil donde se ubican dos centrales hidroeléctricas (Tucuruí y Lajeado), el investigador genera tres escenarios de huella hídrica, pero, se toma el segundo que considera mayor información como el cambio en la evaporación causado por la construcción del reservorio, los resultados fueron 26 [m<sup>3</sup>/GJ] para Tucuruí, y para Lajeado 48 [m<sup>3</sup>/GJ], teniendo un promedio de **37** [m<sup>3</sup>/GJ] para el caudal Tocantins (Coelho et al., 2017).

Tor Bakken según un estudio de la huella hídrica para 7 proyectos hidroeléctricos de Etiopía y Noruega promedia en **10.4** [m<sup>3</sup>/GJ] el uso requerido, de lo cual se desprende y define los siguientes valores específicos:

Tabla 32. Uso promedio de agua en Etiopía y Noruega

| Nro.            | Proyecto  | País    | Producción anual [GWh/año] | Evaporación [mm/año] | Uso neto de agua [m <sup>3</sup> /kWh] | Uso neto de agua [m <sup>3</sup> /GJ] |
|-----------------|-----------|---------|----------------------------|----------------------|--|---------------------------------------|
| 1               | Ghibe I   | Etiopía | 722                        | 1,611                | 0.0692                                 | 19.28                                 |
| 2               | Logna     | Noruega | 105                        | 450                  | 0.0571                                 | 15.86                                 |
| 3               | Smeland   | Noruega | 119                        | 450                  | 0.0504                                 | 14.10                                 |
| 4               | Ghibe II  | Etiopía | 722                        | 1,611                | 0.0305                                 | 8.47                                  |
| 5               | Skjerka   | Noruega | 612                        | 450                  | 0.0266                                 | 7.39                                  |
| 6               | Laudal    | Noruega | 146                        | 450                  | 0.0145                                 | 4.03                                  |
| 7               | Haverstad | Noruega | 282                        | 450                  | 0.0075                                 | 2.08                                  |
| <b>Promedio</b> |           |         | <b>331</b>                 | <b>643.5</b>         | <b>0.039</b>                           | <b>10.4</b>                           |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Bakken et al., 2013).

Alena Lohrmann analiza la transición hacia un sistema de energía en base a tecnologías limpias como la hidroelectricidad, en el estudio determina la demanda de agua de algunos países de Europa incluyendo la huella hídrica, calculando la huella de los siguientes 29 países (Lohrmann et al., 2021).

Tabla 33. Huella hídrica de la hidroelectricidad en Europa

| Nro.  | País  | Uso neto de agua [m³/kWh] | Uso neto de agua [m³/GJ] |
|-------|---|---------------------------|--------------------------|
| 1     | Noruega   | 0.0155                    | 4.30                     |
| 2     | Islandia  | 0.0132                    | 3.66                     |
| 3-4   | Suiza y Liechtenstein                               | 0.0102                    | 2.83                     |
| 5-6   | Hungría y Austria                                   | 0.0086                    | 2.38                     |
| 7     | Suecia  | 0.0077                    | 2.13                     |
| 8-13  | Croacia, Eslovenia, Bosnia, Serbia, Kosovo, Albania | 0.0069                    | 1.91                     |
| 14-15 | Turquía y Chipre                                    | 0.0052                    | 1.44                     |
| 16-18 | Francia, Mónaco y Andorra                           | 0.0042                    | 1.16                     |
| 19    | Finlandia   | 0.0042                    | 1.16                     |
| 20-22 | Bulgaria, Grecia y Rumania                          | 0.0039                    | 1.08                     |
| 23-25 | Portugal, España y Gibraltar                        | 0.0037                    | 1.03                     |
| 26-27 | Republica Checa y Eslovaquia                        | 0.0037                    | 1.03                     |
| 28-29 | Ucrania y Moldavia                                  | 0.0028                    | 0.77                     |
|       | <b>Promedio</b>                                     | <b>0.0069</b>             | <b>1.91</b>              |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Lohrmann et al., 2021).

Resumiendo, los datos, cálculos y detalles investigativos, se tiene que la huella hídrica por la generación hidroeléctrica según 10 estudios diferentes está en el orden descendente siguiente:

Tabla 34. Resumen global de la huella hídrica hidroeléctrica

| Nro. | País                                      | Autor                  | Año de estudio | Huella Hídrica           |                           |
|------|---|------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|
|      |   |                        |                | Uso neto de agua [m³/GJ] | Uso neto de agua [m³/kWh] |
| 1    | Europa: 29 países                         | Alena Lohrmann         | 2021           | 1.91                     | 0.007                     |
| 2    | Global: 7 centrales (Nepal, Panamá, etc.) | Diana Robescu          | 2019           | 9.59                     | 0.034                     |
| 3    | Etiopia y Noruega                         | Tor Haakon Bakken      | 2013           | 10.40                    | 0.039                     |
| 4    | China: Hidroeléctrica Ertan               | Lian Sun               | 2021           | 16.50                    | 0.059                     |
| 5    | Nueva Zelanda                             | Leenes Gerbers         | 2009           | 22.00                    | 0.079                     |
| 6    | Global: 7 proyectos hidroeléctricos       | Scherer & Fitcher      | 2012           | 23.32                    | 0.084                     |
| 7    | Brasil: Cuenca del río Tocantins          | Clívia Dias Coelho     | 2017           | 37.00                    | 0.133                     |
| 8    | Global: 1,500 proyectos hidroeléctricos   | Laura Scherer          | 2016           | 38.90                    | 0.140                     |
| 9    | Global: 35 proyectos hidroeléctricos      | Mekonnen & Hoekstra    | 2012           | 68.00                    | 0.224                     |
| 10   | Global: 1,473 proyectos hidroeléctricos   | Stephan Pfister        | 2020           | 70.60                    | 0.254                     |
|      | <b>Promedio</b>                           |                        |                | <b>29.88</b>             | <b>0.105</b>              |
| 11   | Ecuador: 10 proyectos hidroeléctricos     | CELEC/ El Investigador | 2023           | <b>56.25</b>             | <b>0.202</b>              |

$$\text{Relación Huella Hídrica} = \frac{\text{Hidroeléctricas}_{\text{GLOBAL}}}{\text{Hidroeléctricas}_{\text{Ecuador (10 centrales)}}}$$

Ecuación 5

$$\text{Relación}_{\text{Huella Hídrica}} = \frac{29.88}{56.25} \times 100\%$$

$$\text{Relación}_{\text{Huella Hídrica}} = 56.33 \%$$

$$\text{Diferencia} = 100\% - \text{Relación}_{\text{Huella Hídrica}}$$

$$\text{Diferencia} = 100\% - 56.33\%$$

$$\text{Diferencia} = 43.66\%$$

**Ecuación 6**

Del cálculo teórico se interpreta que el promedio del Ecuador tiene un 56% de incremento respecto a los 10 estudios nombrados que implican miles de proyectos y caudales globales analizados, representado que los valores tienen un 44% de aumento por el sobre uso neto de agua.

Además, por otra parte, se debería considerar si del promedio global de huella hídrica está en 29.88 [m<sup>3</sup>/GJ] según el cálculo de la Tabla 37, a este promedio de varios proyectos, a criterio se acepta un máximo adicional del 30% dando un valor de **39** [m<sup>3</sup>/GJ] como consumo que se recomienda que un proyecto deberá usar para generar la hidroelectricidad.

## Discusión

En Noruega, según Martin Dorber y otros autores determinaron que valores altos de uso de agua (huella hídrica) para generar hidroelectricidad establece la muerte de especies y biodiversidad acuática, calculando en Noruega que debido al despliegue hidroeléctrico se perdió alrededor del 12.92% de biodiversidad en las 5 regiones que se encuentra dividido el país (Dorber et al., 2019).

Según el análisis en Europa de Alena Lohrmann, la transición hacia un sistema de hidroelectricidad 100% renovable para resolver el nexo agua-energía, disminuiría hasta un 28.3% el flujo de agua disponible en Europa para el 2050, en comparación con el nivel hídrico del 2015 como año base del cálculo. Y concluye que el despliegue de tecnologías como la hidroelectricidad impone presión adicional sobre los ecosistemas acuáticos y la demanda de agua de algunos países de Europa donde ya se indican debates sobre la sostenibilidad de los escenarios futuros (Lohrmann et al., 2021).

Michelle Van Vliet proyecta disminuciones en la capacidad utilizable de energía hidroeléctrica media global entre el 0.4% al 6.1% para la década de 2080 debido a reducciones hídricas en Estados Unidos, Europa, Asia Oriental, América del Sur, África del Sur y Australia donde se programan fuertes aumentos de temperatura combinados con reducciones del flujo medio anual de agua (M. Van Vliet et al., 2016).

Con estos antecedentes, se muestra que el sobre uso hídrico en las hidroeléctricas causa inestabilidad a los ecosistemas, además, una diferencia marcada entre el cálculo teórico ejecutado para el Ecuador con los valores globales, sin embargo, difiere debido a los datos específicos de cada hidroeléctrica por el área del reservorio, evapotranspiración del lugar específico (antes y después), altura del proyecto, así también características orográficas e hidrográficas y variables cambiantes como el clima que causan ineficiencia.

## Conclusiones

Conforme a la comparación y cálculos ejecutados de la huella hídrica de los proyectos, es concluyente que existen impactos enmascarados por la producción hidroeléctrica, y que su estructura de generación no es sostenible debido a la gran cantidad de recurso hídrico que se requiere por cada kWh de generación, relacionándose a una de las hipótesis planteadas:

- *“H3: La sostenibilidad debe considerar el uso consciente hídrico en la producción hidroeléctrica teniendo en cuenta las expectativas de los diferentes actores que intervienen en su desarrollo”*

La huella hídrica hidroeléctrica (uso neto) promedio en 10 análisis diferentes globales citados de miles de proyectos hidroeléctricos estudiados y un sin número de caudales es  $29.8 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{GJ}} \right]$ . A este promedio, a criterio se acepta un máximo adicional del 30% dando un valor de  $39 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{GJ}} \right]$  como consumo que se recomienda que un proyecto deberá usar para generar la hidroelectricidad.

Se calculó teóricamente la huella hídrica promedio para 10 proyectos hidroeléctricos del Ecuador en  $56.25 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{GJ}} \right]$  para las centrales Agoyan, Baba, Coca Codo, Manduriacu, Minas San Francisco, Paute Mazar, Paute Molino, Paute Sopladora, Pucara, y San Francisco.

Relacionando el análisis de Ecuador con los estudios globales referenciados, se obtiene que la huella hídrica teórica es alta, con un incremento del 43.6% de los proyectos analizados debido a que las centrales hidroeléctricas del país tienen reservorios demasiados grandes en relación a la capacidad energética, como por ejemplo Manduriacu, Paute Mazar y Agoyan, o como Baba que es un embalse multipropósito de baja potencia de generación.

El desarrollo de proyectos hidroeléctricos trae beneficios, pero conlleva impactos inevitables; por ello, se recomienda que estas afecciones se evalúen con estudios detallados basados en criterios de sostenibilidad (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021a).

### 5.3.2. Eficiencia (Factor de planta o potencia)

Es importante estudiar la eficiencia de las centrales hidroeléctricas debido a que se debe conocer cómo se comportan, es por esto que para estandarizar el término factor de potencia o factor de planta, a lo largo del documento, se define como una medida de la **eficiencia** de un sistema eléctrico porque representa el rendimiento y uso de energía para transformar en esfuerzo. Bajo estos antecedentes, la Corporación Eléctrica del Ecuador dentro de la información de los proyectos hidroeléctricos, define el factor de potencia reportado por las empresas generadoras eléctricas en el cuadro siguiente:



Tabla 35. Factor de potencia de las centrales hidroeléctricas en Ecuador

| Nro.            | Proyecto            | Potencia [MW] | Año 2017   | Año 2018   | Año 2019   | Año 2020   | Promedio   |
|-----------------|---------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1               | Agoyan              | 156           | 70%        | 67%        | 72%        | 69%        | 70%        |
| 2               | Baba                | 42            | 36%        | 29%        | 41%        | 46%        | 38%        |
| 3               | Coca Codo           | 1500          | 45%        | 48%        | 49%        | 52%        | 48%        |
| 4               | Manduriacu          | 60            | 64%        | 56%        | 64%        | 67%        | 63%        |
| 5               | Minas San Francisco | 270           | -          | -          | 43%        | 42%        | 43%        |
| 6               | Paute Mazar         | 170           | 48%        | 46%        | 52%        | 45%        | 48%        |
| 7               | Paute Molino        | 1100          | 48%        | 51%        | 58%        | 54%        | 53%        |
| 8               | Paute Sopladora     | 487           | 52%        | 50%        | 56%        | 57%        | 54%        |
| 9               | Pucara              | 73            | 31%        | 33%        | 39%        | 38%        | 35%        |
| 10              | San Francisco       | 270           | 52%        | 41%        | 55%        | 67%        | 54%        |
| <b>Promedio</b> |                     |               | <b>50%</b> | <b>47%</b> | <b>53%</b> | <b>54%</b> | <b>50%</b> |

Elaboración: El Investigador. Nota. Período 2017 – 2020

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Es decir que, el factor de potencia promedio es  $F.P = [0.50]$ , en una potencia hidroeléctrica de 327 [MW], representando:

E: Energía [TWh]

P: Potencia [MW]

F.P.: Factor de potencia

$$F.P. = \frac{E}{P \times 8760 \text{ [hr]}} = 0.50 \quad \text{Ecuación 7}$$

Adicionalmente, con los datos de la Tabla 9, del Capítulo II de los 20 proyectos hidroeléctricos más representativos a nivel mundial, se determinó el factor de potencia en [0.53], a continuación, se contrasta con la tabulación del Ecuador, por lo cual:

$$F.P._{\text{ECUADOR}} = 0.50$$

$$F.P._{\text{GLOBAL}} = 0.53$$

$$\text{Relación F. P.} = \frac{F.P._{\text{ECUADOR}} (10 \text{ centrales})}{F.P._{\text{GLOBAL}} (20 \text{ centrales})} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Relación F. P.} = \frac{0.50}{0.53} \times 100\%$$

$$\text{Relación F. P.} = 94.3\%$$

Interpretando los resultados de los 20 proyectos más grandes globalmente, versus el factor de potencia de las 10 centrales de Ecuador, se tiene 94% de similitud de estos valores, pero, según Anund Killingtveit,

estadísticamente las hidroeléctricas tienen desde el 55% hasta un 90% de eficiencia promedio, a diferencia del 50% de Ecuador (Killingtveit, 2019). Con estos datos, seguido se ordena la información de los proyectos más eficientes en el Ecuador, de lo cual:

Tabla 36. Factor de planta ordenado de las hidroeléctricas en Ecuador

| Central Hidroeléctrica | Potencia [MW]    | Promedio 2017 a 2020 | Frecuencia [%] | Frecuencia Acumulada [%] | Pareto     |
|------------------------|------------------|----------------------|----------------|--------------------------|------------|
| Agoyan                 | 156              | 70%                  | 13.77%         | 13.77%                   |            |
| Manduriacu             | 60               | 63%                  | 12.41%         | 26.18%                   |            |
| San Francisco          | 270              | 54%                  | 10.67%         | 36.85%                   |            |
| Paute Sopladora        | 487              | 54%                  | 10.67%         | 47.52%                   | <b>80%</b> |
| Paute Molino           | 1,100            | 53%                  | 10.45%         | 57.96%                   |            |
| Coca Codo Sinclair     | 1,500            | 48%                  | 9.60%          | 67.57%                   |            |
| Paute Mazar            | 170              | 48%                  | 9.47%          | 77.03%                   |            |
| Minas San Francisco    | 270              | 43%                  | 8.46%          | 85.49%                   |            |
| Baba                   | 42               | 38%                  | 7.53%          | 93.02%                   | <b>20%</b> |
| Pucara                 | 73               | 35%                  | 6.98%          | 100%                     |            |
| -                      | <b>Total (Σ)</b> | -                    | <b>100%</b>    | -                        | -          |

Elaboración: El Investigador. Nota. Período 2017 – 2020

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Como se observa, entre el 80% de los datos, el factor de potencia parte desde el 70% hasta el 48%, además, el proyecto Coca Codo Sinclair demuestra un factor de planta reportado por la Corporación Eléctrica del Ecuador en 48% para el período 2017 al 2020.

Por otra parte, datos de la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional del Ecuador (NDC por sus siglas en inglés) del año 2019, en un análisis del comportamiento histórico de la precipitación y temperatura media para el período de referencia 1960 – 2015 determinó variaciones importantes en el orden siguiente.

Tabla 37. Variaciones de temperatura y precipitación en Ecuador

| Nro.     | Región          | Precipitación [%] | Temperatura Media [°C] |
|----------|-----------------|-------------------|------------------------|
| <b>1</b> | Costa           | +33%              | +0.6 °C                |
| <b>2</b> | Sierra          | +13%              | +1.1 °C                |
| <b>3</b> | Amazonia        | -1%               | +0.9 °C                |
|          | <b>Promedio</b> | +15%              | +0.86 °C               |

Fuente: (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2019).

Las tendencias establecen que el cambio climático es un problema mundial y Ecuador no está ajeno, las lluvias se incrementaron en la Costa, 33%; Sierra, 13%, y solo en la Amazonía hubo una reducción del 1% de las precipitaciones (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2019). Con

este análisis de los aspectos variables por el clima cambiante es pertinente aclarar que, la energía hidroeléctrica depende de la disponibilidad de recursos naturales y su interacción como precipitación para desempeñar un papel fundamental en la esorrentía de los caudales y ciclo natural hídrico (M. T. H. van Vliet et al., 2016).

## Discusión

Como se observa en la Tabla 35, los datos de factor de planta de las hidroeléctricas se muestran de manera variable y se requiere de mayores estudios para ajustar la potencia de estas centrales a un valor eficiente en consideración con las variaciones determinadas por el Ministerio de Ambiente y Agua de Ecuador en la primera NDC.

Según información de la Agencia Internacional de las Energías Renovables entre 2010 y 2020, el factor de planta promedio global para las hidroeléctricas varió de 51% en 2015 al 46% en 2020, demostrando que esta renovable está perdiendo eficiencia. Además, pese a que la energía hidroeléctrica es una tecnología madura y la más utilizada entre las renovables, su participación mundial ha disminuido lentamente, de hecho, la intervención de la hidroelectricidad entre las renovables se redujo del 72% en 2010 (881 GW) al 41% en 2020 (1153 GW) excluida la hidroeléctrica de bombeo, pese al aumentado de proyectos instalados (International Renewable Energy Agency, 2021). Seguido el análisis que IRENA detalla por región y tres países específicos:

Tabla 38. Factor de planta hidroeléctrica globalmente

| Promedio (%)    |                      | Grandes hidroeléctricas |              | Pequeñas hidroeléctricas |              |
|-----------------|----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Nro.            | Región               | 2010-2015               | 2016-2020    | 2010-2015                | 2016-2020    |
| 1               | África               | 47                      | 55           | 56                       | 55           |
| 2               | Brasil               | 61                      | 45           | 63                       | 56           |
| 3               | América Central      | 48                      | 53           | 59                       | -            |
| 4               | China                | 45                      | 47           | 46                       | 38           |
| 5               | Eurasia              | 43                      | 42           | 58                       | 61           |
| 6               | Europa               | 41                      | 33           | 48                       | 44           |
| 7               | India                | 47                      | 42           | 50                       | 57           |
| 8               | Otras partes de Asia | 46                      | 50           | 80                       | 54           |
| 9               | Sur América          | 62                      | 60           | 65                       | -            |
| <b>Promedio</b> |                      | <b>48.89</b>            | <b>47.44</b> | <b>58.33</b>             | <b>52.14</b> |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (International Renewable Energy Agency, 2021)

La Agencia Internacional de las Energías Renovables clasifica los proyectos como pequeños a los menores de 10 [MW] de capacidad, y grandes los que proporcionan más de 10 [MW]. Seguido el resumen comparativo para conocer la variación:

Tabla 39. Factor de planta hidroeléctrico promedio (2010-2015 versus 2016-2020)

| Nro. | Promedio                 | 2010-2015 | 2016-2020 | Variación |
|------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | Grandes hidroeléctricas  | 48.89     | 47.44     | - 3.0%    |
| 2    | Pequeñas hidroeléctricas | 58.33     | 52.14     | - 11.9%   |
|      | Promedio                 |           |           | -7.46%    |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (International Renewable Energy Agency, 2021)

Según IRENA en el análisis por tamaño de proyecto, el factor de planta promedio para grandes centrales varió en -3% relacionando al período 2010-2015, versus el 2016-2020, adicional para pequeñas centrales hidroeléctricas se redujo un -12%, lo que promedia alrededor del -7.4%.

## Conclusiones

El promedio del factor de planta para el período 2017 – 2020 del Ecuador es del 50%, y a lo largo de este tiempo no demuestra una tendencia estable. Según estos datos y estudios de la NDC, se dilucida que las hidroeléctricas de Ecuador gestionan valores de factor de potencia desperdiciada y existen afectaciones cada vez más marcadas como, estacionalidad local que varía el potencial hidroeléctrico, variación de precipitación, cambios de temperatura y modificación de estaciones climáticas a nivel global.

La Agencia Internacional de las Energías Renovables en la comparación de la Tabla 39 define una variación del factor de planta entre períodos 2010-2015 en contraste con el 2016-2020, reduciendo en -3% para pequeña escala, y -11.9% para proyectos de gran escala hidroeléctrica, es decir que los proyectos mayores a 10 [MW] demuestran mayores reducciones e incertidumbre.

## Comparación Eficiencia versus Huella Hídrica

Por otra parte, con los datos del factor de potencia y huella hídrica de las hidroeléctricas del Ecuador se integran las dos tabulaciones en frecuencia absoluta para determinar incidencias. Pero es importante mencionar que en el caso de la huella hídrica se ponen los datos de mayor a menor uso de agua, sin embargo, para el caso de factor de potencia que representa eficiencia se ponen los datos de menor a mayor, debido a que significa un orden desde menor rendimiento hasta el proyecto más eficiente.

Tabla 40. Factor de planta y uso de agua en las hidroeléctricas de Ecuador

|   | Huella hídrica [m³/GJ] | Central Hidroeléctrica | Frecuencia |        | Central Hidroeléctrica | Factor de potencia [%] |
|---|------------------------|------------------------|------------|--------|------------------------|------------------------|
|   |                        |                        | F1         | F2     |                        |                        |
| + | 245.44                 | Baba                   | 43.63%     | 6.95%  | Pucara                 | 35%                    |
|   | 147.73                 | Manduriacu             | 26.26%     | 7.15%  | Baba                   | 38%                    |
| - | 40.77                  | Paute Mazar            | 7.25%      | 8.70%  | Minas San Francisco    | 43%                    |
|   | 38.42                  | Agoyan                 | 6.83%      | 9.58%  | Paute Mazar            | 48%                    |
|   | 28.04                  | San Francisco          | 4.98%      | 9.85%  | Coca Codo Sinclair     | 48%                    |
|   | 24.27                  | Minas San Francisco    | 4.31%      | 9.99%  | Paute Molino           | 53%                    |
|   | 11.52                  | Paute Sopladora        | 2.05%      | 10.59% | Paute Sopladora        | 54%                    |

|       |                    |       |        |               |     |
|-------|--------------------|-------|--------|---------------|-----|
| 11.33 | Coca Codo Sinclair | 2.01% | 10.66% | San Francisco | 54% |
| 10.44 | Pucara             | 1.86% | 12.42% | Manduriacu    | 63% |
| 4.65  | Paute Molino       | 0.83% | 14.10% | Agoyan        | 70% |

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020). Nota: Minas San Francisco no dispone de sistema hidrometeorológico al igual que Pucara. Sopladora no tiene embalse se encuentra interconectada a Molino como una central de paso. Y, San Francisco es una central en cascada de Agoyán. Análisis del período 2017 – 2020.

Según los datos de los proyectos que más agua utilizan (huella hídrica), y menor factor de potencia tienen de manera relacionada son:

- Baba en la provincia de Los Ríos, proyecto de tipo multipropósito por la contención de agua en inundaciones, contiene un área de reservorio amplia, pero de baja capacidad con 42 [MW] y de la cual ahora los pobladores hablan que hay una escasez de peces, daños en cultivos, y migración de población ancestral provocando cambios irreversibles (Mongabay, 2018).
- Paute Mazar en la provincia de Azogues, proyecto con embalse, durante el año 2014, el aporte de la central hidroeléctrica al Sistema Nacional Interconectado fue de 752 [GWh], es decir el 3.5 % de la demanda total del país, siendo el mes de julio la máxima producción con 98 [GWh]. Pero de igual manera que el anterior proyecto solo tiene una capacidad de 170 [MW].
- Minas San Francisco en la provincia de Azuay de capacidad de 270 [MW], es un proyecto con embalse de mediana capacidad, pero su consumo alto difiere por el diseño con él que fue generado el proyecto. La presa es de tipo gravedad, construida en hormigón de 80 [m] de altura desde la cimentación.

Con las incidencias, se encontró de primera mano tres (3) centrales coincidentes entre los valores negativamente más notables, se recomienda analizar estos proyectos hidroeléctricos para plantear mejoras tanto en la eficiencia de los mismos, como en el uso representativo de agua que requieren para generar energía, y de los cuales existen impactos intangibles que deberán ser analizados en detalle para emitir propuestas según cada central.

### 5.3.3. Costo de centrales hidroeléctricas

Se tiene el valor de los últimos proyectos hidroeléctricos en Ecuador que se construyeron, con los cuales, la matriz energética aumento el porcentaje de energía renovable desde esta fuente; según información de la Corporación Eléctrica del Ecuador, los montos de inversión en dólares son:

Tabla 41. Costo e inversión de centrales hidroeléctricas en Ecuador

| Nro. | Central Hidroeléctrica | Potencia [MW] | Nro. de unidades [No.] | Inversión [USD] | Costo por kilovatio [USD/KW] | Costo promedio por unidad generadora [USD/U] |
|------|------------------------|---------------|------------------------|-----------------|------------------------------|--|
| 1    | Coca Codo Sinclair     | 1,500         | 8                      | 2,850,966,262   | 1,900                        | 356,370,783                                  |
| 2    | Sopladora              | 487           | 3                      | 962,846,620     | 1,977                        | 320,948,873                                  |

|                 |                     |            |          |                      |               |                    |
|-----------------|---------------------|------------|----------|----------------------|---------------|--------------------|
| 3               | Minas San Francisco | 270        | 3        | 662,480,054          | 2,453         | 220,826,685        |
| 4               | Delsintagua         | 180        | 3        | 334,843,245          | 1,860         | 111,614,415        |
| 5               | Manduriacu          | 60         | 2        | 227,389,966          | 3,789         | 113,694,983        |
| <b>Promedio</b> |                     | <b>499</b> | <b>4</b> | <b>1,007,705,229</b> | <b>2,396*</b> | <b>224,691,148</b> |

Elaboración: el Investigador. Nota. Período 2014 – 2019

Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

La información promedio de los últimos cinco (5) proyectos hidroeléctricos inaugurados en el período del 2015 al 2019 de la Corporación Eléctrica del Ecuador establece que, para 4 unidades generadoras con potencia promedio de 499 [MW], el costo es extremadamente alto de más de mil millones de dólares, lo cual, no considera los impactos ambientales, sociales y técnicos desarrollados intangiblemente.

Acto seguido, se genera una relación entre el costo y beneficio energético, donde se tiene:

$$\text{Relación C/B} = \frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio energético}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Relación } \frac{C}{B} \text{ promedio} = \frac{1,007,705,229 \text{ USD}}{499 \text{ MW}}$$

$$\text{Relación } \frac{C}{B} \text{ promedio} = 2,019,449 \frac{\text{USD}}{\text{MW}}$$

$$\text{Relación } \frac{C}{B} \text{ promedio} = 2,019.4 \frac{\text{USD}}{\text{KW}}$$

Es decir, cada mega vatio [MW] de potencia hidroeléctrica instalada en el Ecuador cuesta alrededor de 2 millones de dólares americanos, valor excesivo, si se toma en cuenta los agresivos cambios en los ecosistemas.

### Discusión

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables en su análisis de costo de las energías renovables del 2020, la hidroelectricidad depende de varios factores como tamaño de cada proyecto y tipo de central, pero en el 2020, el costo de instalación promedio global de los proyectos hidroeléctricos aumentó a 1,870 [USD/kW], un 9% más que en 2019. Además, el costo total de instalación promedio global en 2020 fue el valor más alto registrado desde 2010 como muestra la Ilustración 38 (International Renewable Energy Agency, 2021).

El aumento del costo de la hidroelectricidad explica el despliegue de capacidad instalada en otros países o regiones con costos de instalación promedio más altos. En Turquía, por ejemplo, se agregaron 2.5 [GW] en 2020, mientras que también hubo una mayor proporción de implementación en Eurasia y Asia en comparación con el 2019 (International Renewable Energy Agency, 2021). Seguido la ilustración de los costos promedio calculados desde el 2010 al 2020 de la hidroelectricidad.



Ilustración 38. Costo promedio de instalación hidroeléctrica por KW

Fuente: (International Renewable Energy Agency, 2021).

De la Ilustración 38, los costos totales de instalación para la mayoría de los proyectos hidroeléctricos desarrollados entre 2010 y 2020 oscilan entre un mínimo de alrededor de 600 [USD/kW] y un máximo de alrededor de 4,500 [USD/kW].

Sin embargo, no es raro encontrar proyectos fuera de este rango, por ejemplo, agregar capacidad hidroeléctrica a una presa existente que se construyó para otros fines puede tener costos bajos en 450 [USD/kW], mientras que los sitios remotos, con una infraestructura deficiente y ubicados lejos de las redes de transmisión existentes, pueden costar significativamente 4,500 [USD/kW], debido a los mayores costos logísticos, de ingeniería civil y conexión a la red (International Renewable Energy Agency, 2020a). En este sentido en la **Tabla 42** el detalle específico por rango de capacidad de cada proyecto hidroeléctrico.

Tabla 42. Inversión promedio y por percentil en relación a la capacidad específica

| Nro. | Capacidad [MW]  | Promedio 2020 [USD/kW] | 5% Percentil 2020 [USD/kW] | Nro. | Capacidad [MW] | Promedio 2020 [USD/kW] | 5% Percentil 2020 [USD/kW] |
|------|-----------------|------------------------|----------------------------|------|----------------|------------------------|----------------------------|
| 1    | 0-50            | 1,518                  | 807                        | 2    | 51-100         | 1,728                  | 836                        |
| 3    | 101-150         | 1,685                  | 890                        | 4    | 151-200        | 1,656                  | 805                        |
| 5    | 201-250         | 1,730                  | 886                        | 6    | 251-300        | 2,022                  | 789                        |
| 7    | 301-350         | 1,927                  | 896                        | 8    | 351-400        | 1,632                  | 652                        |
| 9    | 401-450         | 1,925                  | 1,155                      | 10   | 451-500        | 1,472                  | 918                        |
| 11   | 501-550         | 1,467                  | 1,074                      | 12   | 551-600        | 1,817                  | 1,296                      |
| 13   | 601-650         | 1,401                  | 1,034                      | 14   | 651-700        | 1,928                  | 743                        |
| 15   | 701-750         | 1,392                  | 933                        | 16   | 751-800        | 1,519                  | 1,034                      |
| 17   | 801-850         | 1,769                  | 1,137                      | 18   | 851-900        | 1,368                  | 8,261                      |
| 19   | 901 en adelante | 1,063                  | 635                        | -    | -              | -                      | -                          |

Entre 2010 y 2020, el costo total promedio ponderado global de la instalación de nuevas centrales hidroeléctricas aumentó de 1,249 [USD/kW] a 1,870 [USD/kW], el incremento año tras año es impulsado por el desarrollo hidroeléctrico en diferentes regiones y cambios en los costos específicos del proyecto (International Renewable Energy Agency, 2021). En la Tabla 43 siguiente la comparación por capacidad a suministrar de cada proyecto del Ecuador versus el promedio global.

Tabla 43. Comparación de costos de las centrales hidroeléctricas en Ecuador

| Nro. | Central Hidroeléctrica | Capacidad [MW] | Inversión [USD] | Costo por kilovatio Ecuador [USD/KW] | Costo por tamaño según IRENA [USD/KW] | Variación Porcentual (Ecuador/Promedio) IRENA |
|------|------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1    | Coca Codo Sinclair     | 1,500          | 2,850,966,262   | 1,901                                | 1,063                                 | +79%  |
| 2    | Sopladora              | 487            | 962,846,620     | 1,977                                | 1,472                                 | +34%  |
| 3    | Minas San Francisco    | 270            | 662,480,054     | 2,454                                | 2,022                                 | +21%  |
| 4    | Delsintagua            | 180            | 334,843,245     | 1,860                                | 1,656                                 | +12%  |
| 5    | Manduriacu             | 60             | 227,389,966     | 3,790                                | 1,728                                 | +119%   |
|      |                        |                |                 |                                      | <b>Promedio</b>                       | +53%  |

Como muestra la Tabla 43 comparativa en el Ecuador, los costos tienen un incremento bastante representativo en comparación al promedio que globalmente IRENA determinó para el año 2020, los cálculos se hicieron en base al tamaño de proyecto desarrollado. Adicional, como segundo cálculo seguido se promedia el costo de los 5 proyectos del país a una potencia media (Tabla 41).

Tabla 44. Comparación costo y potencia promedio de las 5 hidroeléctricas en Ecuador

| Potencia promedio [MW] | Inversión promedio [USD] | Costo por kilovatio Ecuador [USD/KW] | Costo por tamaño según IRENA [USD/KW] | Variación (Ecuador/Promedio) |
|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 499                    | 1,007,705,229            | 2,396 <sup>a</sup>                   | 1,472                                 | +63%                         |

Las variaciones de costos de Ecuador versus el promedio global tienen divergencias considerables, se concluye que, antes de pensar en una mega construcción con miles de dólares de inversión, y de millones de litros de agua contenida en represas, es necesario fomentar el análisis climático, energético y ambiental para responder las restricciones de edificar proyectos hidroeléctricos con embalses.

## Conclusiones

Según datos de inversión de las últimas 5 centrales hidroeléctricas del Ecuador inauguradas en el período 2015 – 2019 los costos calculados por capacidad son más altos del promedio global, específicamente para Coca Codo Sinclair se tiene un 79% de incremento, 34% para Sopladora, 21% para Minas San Francisco, 12% para Delsintagua y 119% para la central Manduriacu.

Los costos de inversión hidroeléctrica analizados en Ecuador establecen montos y criterios sumamente



altos en un 53% promedio de las centrales, costos que no determinan las afectaciones por el sobre uso del agua, deterioro de causas hídricas y condiciones naturales del planeta.

El costo promedio global para centrales hidroeléctricas calculado por la Agencia Internacional de las Energías Renovables en el 2020 fue 1,870 [USD/kWh], en el caso promedio de capacidad de 499 [MW] el Ecuador tiene un costo de 2,396 [USD/kWh], e IRENA determina 1,472 [USD/kWh] para el rango de centrales (451-500 MW), indicando un sobre valor del 63% comparativamente.

Antes de pensar en una mega construcción hidroeléctrica es necesario analizar ese desarrollo futuro a gran escala con decisiones más acertadas de la eficiencia real de los proyectos y fomentar en los próximos años el adelanto de otras fuentes de energía no convencionales como la eólica, geotérmica y solar foto voltaica para mitigar los impactos sociales y ambientales (Alarcon, 2019).

Si bien la Agencia Internacional de las Energías Renovables determina un costo altamente variable debido a las características de cada proyecto, en el caso de Ecuador los 5 proyectos analizados tienen diferencias de incremento desde el 12% hasta el 119% (Naranjo-Silva, Punina, et al., 2022).

**Nota 8.** Comparative cost per kilowatt of the latest hydropower projects in Ecuador

Del presente apartado se ejecutó un Artículo como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Punina, et al., 2022). Costo comparativo por kilovatio de los últimos proyectos hidroeléctricos en Ecuador. Revista InGenio, 5(1), 22–34. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i1.473>

## 5.4 Modelación proyectada y planificación hidroeléctrica para Ecuador

### a) Modelación por líneas evolutivas

A nivel mundial, todavía hay alrededor del 22% de los hogares sin acceso a la electricidad, según la Agencia Internacional de Energía, esto representaba 1,500 millones de personas que vivían en áreas remotas que a menudo eran difíciles de conectar a las redes nacionales o regionales en 2008. En los países en desarrollo, se estima que el 85% de la población vive en áreas rurales, en su mayoría periurbanas y rurales remotas (Berga, 2016; International Energy Agency, 2010).

Sin embargo, el potencial hidroeléctrico aún está subutilizado, con datos de producción de la Asociación Internacional de la Hidroelectricidad se determinó que falta construir el 74% del potencial en las regiones en desarrollo. Incluso con el avance continuo durante los últimos diez años (principalmente en Asia y América Latina), la mayor parte de la capacidad hidroeléctrica global no se desarrolló (International Hydropower Association, 2018b). Por ejemplo, en 2021, la generación global hidroeléctrica fue de 4,252 [TWh], pero el potencial técnico global es aproximadamente tres veces y media esa cantidad, alrededor de 14,680 [TWh] (International Hydropower Association, 2021).

Desafortunadamente, existe un desafío que debe abordarse junto con tratar de reintroducir las energías renovables y, en particular, la hidroeléctrica. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático

(IPCC por sus siglas en inglés), el cambio climático y los gases de efecto invernadero están atrapando el calor, acelerando el nivel de calentamiento global de manera agresiva y reduciendo el agua requerida para el ciclo hidrológico constante necesario para la vida (Jabbari & Nazemi, 2019; M. M. Uamusse et al., 2020).

El cambio climático ha sido uno de los estímulos centrales que marcan a las sociedades cambiar la forma en que utilizan los recursos naturales sensibles a las variaciones climáticas (Shove, 2010). La sociedad se adapta a los cambios cuando es necesario para sobrevivir, y los patrones de consumo de la mayoría de los recursos naturales dejan de considerarse sostenibles si no se adoptan nuevos modos de vida (Antwi & Sedegah, 2018).

Así, con la promoción de la hidroelectricidad y tomando precauciones ante los impactos del cambio climático, en 2019 el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador presentó la Primera Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés) como una herramienta para orientar la aplicación de las acciones a nivel sectorial y local que propicien la reducción de gases de efecto invernadero, así como el aumento de la capacidad adaptativa frente al cambio climático en sectores priorizados, incluido el sector energético (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2019).

Por otra parte, en 2020 se emitió el Plan de Implementación de la Primera Contribución Nacional Determinada donde se expuso que existen impactos relacionados con eventos extremos históricos relacionados con lluvias que provocarían un área inundable del 15.9% de la superficie nacional (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2020). Es así que, aprovechando la hidrografía del país, el Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador determinó que en base a inversiones de renovables y específicamente en hidroeléctricas, se tendrá la siguiente tendencia para la iniciativa incondicional del sector energético.

Tabla 45. Primera estrategia del sector energético de la NDC del Ecuador

| Iniciativa                            | Escenario     | Descripción   | Potencial de reducción de GEI en 2025 [Gg.CO2 eq/año] | Estado                                |
|---------------------------------------|---------------|---|---|---------------------------------------|
| Desarrollos centrales hidroeléctricas | Incondicional | Uso hidroeléctrico para la generación de electricidad en 2,275 [MW] | 6,000   | En implementación o en funcionamiento |

Fuente: (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2020)

De dicha estrategia, se consideró el potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por el desplazamiento del diésel utilizado en la generación termoeléctrica por plantas hidroeléctricas que corresponden a inversiones desde 2010 hasta noviembre de 2018 (Proyectos Emblemáticos – Tabla 46) y que entrarán a operación entre 2020 y 2025, seguido los proyectos en mención.

Tabla 46. Proyectos hidroeléctricos emblemáticos determinados en la NDC Ecuador

| Nro.                | Proyecto            | Capacidad [MW] | Ubicación            | Estado                            |
|---------------------|---------------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1                   | Coca Codo Sinclair  | 1,500          | Napo y Sucumbíos     | En operaciones, noviembre de 2016 |
| 2                   | Minas San Francisco | 275            | Azuay y El Oro       | En operaciones, enero de 2019     |
| 3                   | Toachi Pilatón      | 255            | Santo Domingo        | En pruebas de operación           |
| 4                   | Delsitanisagua      | 180            | Zamora Chinchipe     | En operaciones, diciembre de 2018 |
| 5                   | Manduriacu          | 65             | Pichincha e Imbabura | En operaciones, marzo de 2015     |
| <b>[MW] Totales</b> |                     | <b>2,275</b>   | -                    | -                                 |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Ministry of the Environment and Water of Ecuador, 2017)

De acuerdo al Plan de Implementación de la Primera Contribución Nacional Determinada del Ecuador, el país es susceptible a los efectos del cambio climático y se encuentra amenazado por sus condiciones sociales, ambientales y técnicas por las cada vez más frecuentes e intensas lluvias y temperaturas extremas.

Al respecto, este apartado presenta datos históricos de energía hidroeléctrica de Ecuador con el objetivo de analizar la tendencia futura del desarrollo hidroeléctrico en cinco plantas emblemáticas (Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilatón, y Delsintagua) referente a la implementación de la Contribución Nacional Determinada de este país latinoamericano en el sector energético en conformidad a la primera estrategia del escenario incondicional.

### Metodología

La metodología de este apartado es exploratoria, recolectando información y procesándola sobre el tema específico del desarrollo hidroeléctrico en el Ecuador, y presenta con dos enfoques cualitativo y cuantitativo. La parte cualitativa brinda nociones y definiciones del desarrollo hidroeléctrico del Ecuador y las perspectivas futuras. En la parte cuantitativa se recuperan los datos de producción de energía de los últimos veinte años de 20 centrales hidroeléctricas determinando indicadores en la producción de energía para proyectar este porcentaje en las cinco centrales emblemáticas contempladas.

Para la proyección, se generó una diferencia porcentual de los últimos 20 años, conociendo la producción de las centrales hidroeléctricas en funcionamiento, dividiendo los datos de energía en períodos de 10 años, buscando una relación media (aumento o disminución) de 2000-2010 y 2010-2020, calculando las discrepancias entre estos dos períodos.

Además, para proyectar de forma conservadora los escenarios, se usan las definiciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático que mencionan que el cambio climático tiene fluctuaciones relacionadas con líneas de evolución divididas y establecidas en cuatro grupos (A1, A2, B1 y B2). La línea A presenta un escenario pesimista donde las emisiones se mantienen o aumentan en el futuro. La línea de evolución B representa un escenario optimista en el que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Arango-Aramburo et al., 2019; IPCC et al., 2007). En este contexto, seguido

los escenarios del IPCC seleccionados en grupos para proyectar el análisis.

Tabla 47. Escenarios de cambio climático según el IPCC.

| Línea de Evolución | Descripción   | Indicador   |
|--------------------|---|---|
| A1.                | De acuerdo con esta familia evolutiva, el mundo experimentará un rápido crecimiento económico, y la población mundial alcanzará su punto máximo a mediados de siglo y disminuirá después de la rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Como resultado, hay varias características que incluyen el desarrollo de capacidades, la interacción cultural y social, y una reducción en las diferencias en el ingreso per cápita entre regiones.  | Es la línea evolutiva futura más agresiva de los cambios mundiales, donde cualquier proyección y tendencia se aceptan en un 80% de los cambios.                           |
| A2.                | Este escenario describe un mundo muy variado, siendo las características más distintivas la autosuficiencia y preservación de las entidades locales. A pesar del hecho de que los patrones entre regiones convergen lentamente, ha habido un aumento continuo en la población mundial. El enfoque del desarrollo económico está en las regiones y no en los países, el ingreso per cápita es lo que más importa.  | El crecimiento económico y el cambio tecnológico son fragmentados y más lentos que en otras líneas evolutivas.  |
| B1.                | B1 describe un mundo convergente con la misma población global alcanzando su punto máximo alrededor de mediados de siglo y cayendo después de eso, como A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas orientadas hacia los servicios e información, acompañadas de un uso menos intensivo de materiales por la introducción de tecnologías limpias. Las soluciones globales son dirigidas a la sostenibilidad económica, social y ambiental y una mayor igualdad son dominantes, pero en ausencia de iniciativas climáticas. | La línea evolutiva media se basa en aspectos ecológicos; cualquier proyección y tendencia se aceptan al 50% de los cambios.   |
| B2.                | Los escenarios B2 describen un mundo donde las soluciones locales dominan la sostenibilidad económica, social y ambiental. En comparación con B1 y A1, su población está creciendo a un ritmo más lento, su desarrollo económico está en un nivel intermedio y su desarrollo tecnológico variado. Hay un énfasis en la preservación del medio ambiente, pero se centra principalmente en los niveles locales y regionales para lograr la igualdad social.   | Esta línea evolutiva es la más conservadora con aspectos ecológicos y uso de los recursos de manera sustentable, las proyecciones se reconocen en un 30% de desviaciones. |

Fuente: (Arango-Aramburo et al., 2019; IPCC et al., 2007; IPCC -ONU, 2019).

En la metodología, se tomó las líneas A1, B1 y B2 como aspectos de evolución realistas para los escenarios futuros porque las proyecciones dependiendo de la región evolucionan con cambios graduales, acelerados en algunos sectores, y lentos en otros, además de criterios de crecimiento económico dividido marcados por países desarrollados y parcialmente por países en desarrollo. Adicional, el porcentaje de variación definido son suposiciones de la investigación a criterio propio con los datos de referencia del Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

Sobre la base, en ambos enfoques de la metodología, la investigación se centra en el aporte energético que tendrán los cinco proyectos, los cuales aportarán al sistema eléctrico interconectado del Ecuador 2,275 [MW] por lo cual se proyecta la capacidad futura al 2050 (CELEC, 2020).

## Resultados

Como menciona la metodología, primero se entiende el comportamiento de las centrales en los últimos 20 años y posterior analizar la producción hidroeléctrica futura, al respecto, se usó datos del Ministerio de Energía de Ecuador de 20 proyectos tabulando la energía generada. Además se obtiene una tendencia

energética dividiendo en períodos de diez años promedios entre 2000-2010 y 2010-2020 para buscar la producción de energía (amplificada o reducida) alrededor de estos años.

Tabla 48. Producción de energía hidroeléctrica en Ecuador [MWh].

| Nro. | Proyecto hidroeléctrico | 2000 [MWh]      | 2010 [MWh] | 2020 [MWh] | Tendencia 1<br>2000-2010 | Tendencia 2<br>2010-2020 | Diferencia media<br>Tendencia (1-2) |        |
|------|-------------------------|-----------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------|
| 1    | Agoyán                  | 1,022,213       | 914,900    | 946,800    | -11.7%                   | 3.4%                     | -4.2%                               |        |
| 2    | Alao                    | 78,328          | 80,300     | 80,688     | 2.5%                     | 0.5%                     | 1.5%                                |        |
| 3    | Ambi                    | 25,323          | 26,400     | 34,283     | 4.1%                     | 23.0%                    | 13.5%                               |        |
| 4    | Carlos Mora             | 15,850          | 15,600     | 15,000     | -1.6%                    | -4.0%                    | -2.8%                               |        |
| 5    | Chillos                 | 15,268          | 12,510     | 13,894     | -22.0%                   | 10.0%                    | -6.0%                               |        |
| 6    | Cumbayá                 | 180,626         | 140,570    | 117,393    | -28.5%                   | -19.7%                   | -24.1%                              |        |
| 7    | El Estado               | 8,541           | 7,230      | 9,479      | -18.1%                   | 23.7%                    | 2.8%                                |        |
| 8    | Guangopolo              | 92,596          | 65,330     | 57,093     | -41.7%                   | -14.4%                   | -28.1%                              |        |
| 9    | Iluchi 1                | 20,598          | 17,930     | 21,771     | -14.9%                   | 17.6%                    | 1.4%                                |        |
| 10   | Iluchi 2                | 26,414          | 20,840     | 26,104     | -26.7%                   | 20.2%                    | -3.3%                               |        |
| 11   | Marcel Lanido           | 547,409         | 773,790    | 878,780    | 29.3%                    | 11.9%                    | 20.6%                               |        |
| 12   | Nayón                   | 164,948         | 115,460    | 104,726    | -42.9%                   | -10.2%                   | -26.6%                              |        |
| 13   | Paschocha               | 32,897          | 23,900     | 22,839     | -37.6%                   | -4.6%                    | -21.1%                              |        |
| 14   | Paute                   | 4,865,426       | 4,048,760  | 3,842,160  | -20.2%                   | -5.4%                    | -12.8%                              |        |
| 15   | Península               | 15791           | 10,020     | 12,405     | -57.6%                   | 19.2%                    | -19.2%                              |        |
| 16   | Pucará                  | 224,653         | 141,940    | 234,720    | -58.3%                   | 39.5%                    | -9.4%                               |        |
| 17   | Río Blanco              | 17,493          | 20,860     | 8,892      | 16.1%                    | -134.6%                  | -59.2%                              |        |
| 18   | San Miguel de Car       | 20,395          | 17,740     | 3,728      | -15.0%                   | -375.9%                  | -195.4%                             |        |
| 19   | Saucay                  | 118,108         | 101,670    | 115,530    | -16.2%                   | 12.0%                    | -2.1%                               |        |
| 20   | Sayamin                 | 94,941          | 71,560     | 90,650     | -32.7%                   | 21.1%                    | -5.8%                               |        |
|      |                         | <b>Promedio</b> |            |            |                          |                          |                                     | -19.0% |

Elaboración: El investigador. Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Los resultados son parte de las variaciones que reducen la eficiencia energética de cada proyecto, tal como analizó el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador en la Contribución Nacional Determinada que menciona que el cambio climático es una gran amenaza para los sistemas energéticos (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2020). Los resultados de la tabulación entre los dos períodos arrojan una reducción global de generación hidroeléctrica del 19%, porcentaje que en 20 años se proyectará a la capacidad de las hidroeléctricas emblemáticas.

Además, la media total supone cada año una reducción energética del 0.95% en la producción hidroeléctrica (20 años). Por lo tanto, para los proyectos que operen hasta el 2025 según la Contribución Nacional Determinada, se proyecta una futura disminución con la tendencia calculada. Además, según la información de temperatura y precipitación, las tendencias oficiales establecen que el cambio climático es un problema mundial, y el Ecuador no lo desconoce. Al período de referencia 1960 – 2015, las lluvias aumentaron en la Costa en un 33%; Sierra en un 13 %, y solo en la Amazonía hubo una reducción del 1 %

en las precipitaciones donde antes las lluvias eran comunes (Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador, 2019; Naranjo-Silva, Punina, et al., 2022).

Como se mencionó de los 4 escenarios se tomó los 3 principales con los cuales la tendencia se proyecta, no se seleccionó el escenario A2 debido a que se verificó que es un escenario difícil de cumplir, en contraste, las rutas A1, B1 y B2 en el Sexto Informe de Evaluación son las más evaluadas por la facilidad de unir con otros modelos, suposiciones y fuerzas impulsoras, por ejemplo con Rutas de Concentración Representativa y Niveles de Calentamiento Global (GWL por sus siglas en inglés) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Como resultado, haciendo una reducción lineal con los diferentes escenarios se proyecta una capacidad al año 2050 para los proyectos emblemáticos, llamados emblemáticos por la capacidad que cambiará de manera notable el aumento de la hidroelectricidad en la matriz energética del Ecuador.

Tabla 49. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario A1.

| Período   | Coca Codo Sinclair | Minas San Francisco | Toachi Pilatón | Delsintagua | Manduriacu | Capacidad total ( $\Sigma$ ) en [MW] |
|-----------|--------------------|---------------------|----------------|-------------|------------|--------------------------------------|
| 2023-2030 | 1,420              | 260                 | 241            | 170         | 62         | 2,154                                |
| 2030-2040 | 1,312              | 241                 | 223            | 157         | 57         | 1,990                                |
| 2040-2050 | 1,213              | 222                 | 206            | 146         | 53         | <b>1,839</b>                         |

Elaboración: El investigador

Además, para las otras proyecciones, se genera un escenario solo la reducción del 50% de la tendencia lo que representa 0.48% para la línea de tendencia B2, y el 30% simboliza el 0.29% de la reducción de cada año para la línea de tendencia B1. Esta definición se relaciona desde las vías de representación concentradas que O'Neill especificó como indicadores del Sexto Informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (O'Neill et al., 2014), lo que muestra cálculos que determina las siguientes series:

Tabla 50. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario B1.

| Período   | Coca Codo Sinclair | Minas San Francisco | Toachi Pilatón | Delsintagua | Manduriacu | Capacidad total ( $\Sigma$ ) en [MW] |
|-----------|--------------------|---------------------|----------------|-------------|------------|--------------------------------------|
| 2023-2030 | 1,450              | 266                 | 247            | 174         | 63         | 2,199                                |
| 2030-2040 | 1,381              | 253                 | 235            | 166         | 60         | 2,095                                |
| 2040-2050 | 1,316              | 241                 | 224            | 158         | 57         | <b>1,995</b>                         |

Elaboración: El investigador

Tabla 51. Capacidad proyectada en MW al 2050 de hidroeléctricas emblemáticas – Escenario B2.

| Período   | Coca Codo Sinclair | Minas San Francisco | Toachi Pilatón | Delsintagua | Manduriacu | Capacidad total ( $\Sigma$ ) en [MW] |
|-----------|--------------------|---------------------|----------------|-------------|------------|--------------------------------------|
| 2023-2030 | 1,470              | 270                 | 250            | 176         | 64         | 2,230                                |
| 2030-2040 | 1,428              | 262                 | 243            | 171         | 62         | 2,166                                |
| 2040-2050 | 1,387              | 254                 | 236            | 166         | 60         | <b>2,104</b>                         |

Elaboración: El investigador

Por otro lado, la concepción de los proyectos emblemáticos significa que estas centrales hidroeléctricas cambiarán drásticamente la matriz energética de Ecuador por su capacidad de integrar energías limpias.

Pero, también se presentan como las mayores construcciones e inversiones en infraestructura de los últimos años del país (Vaca-Jiménez et al., 2019). Con los antecedentes del desarrollo hidroeléctrico en el escenario energético incondicional de la primera estrategia energética del Plan de Implementación de la NDC del Ecuador merece un análisis del cumplimiento de esta iniciativa.

## **Discusión**

Como muestran los resultados, en los cinco proyectos establecidos como emblemáticos por Ecuador en la Primera Contribución Nacional Determinada, el mayor problema es la demora en la ejecución de las obras; algunas de estas centrales ya funcionan, pero no están al 100% de su capacidad. Además, los resultados de los 20 proyectos hidroeléctricos analizados en funcionamiento (2000 - 2020) muestran una tendencia de reducción, lo cual permite proyectar la capacidad estipulada inicialmente de las centrales: Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilatón y Delsintagua.

Es pertinente mencionar que hay aspectos variables por el cambio climático, y la energía hidroeléctrica depende de la disponibilidad de los recursos naturales y su interacción con las precipitaciones para jugar un papel fundamental en la esorrentía de los caudales; todos estos aspectos representan un obstáculo para lograr la meta de la NDC del Ecuador con los proyectos hidroeléctricos emblemáticos en Ecuador (Naranjo-Silva & Álvarez del Castillo, 2021a; Villamar et al., 2021).

En general, los resultados de las Tablas 49 a 51 de cada proyección muestran una reducción en la capacidad planeada con las hidroeléctricas. Sin embargo, depende en gran parte del Gobierno Ecuatoriano de ejecutar acciones de mitigación y adaptación de cambio climático en las centras desarrolla y continuamente comprobar las posibles variaciones.

Adicional, a manera comparativa, Van Vliet presenta una evaluación de la vulnerabilidad del sistema mundial de generación de energía hidroeléctrica al cambio climático que afecta los recursos hídricos, probando opciones de adaptación de agua y energía durante el siglo XXI. Mediante el uso de modelos hidrológicos-eléctricos junto con datos de 24,515 plantas hidroeléctricas, mostró reducciones en la capacidad utilizable entre el 61% y el 74 % para las plantas hidroeléctricas globalmente para el escenario de tiempo 2040-2069 debido al cambio climático (M. Van Vliet et al., 2016; M. T. H. van Vliet et al., 2016).

Además, comparando los resultados obtenidos, se tiene la investigación de Carvajal en el año 2019 que demuestra que la energía hidroeléctrica proyecta incertidumbre en el modelo climático global, y para el Ecuador la energía hidroeléctrica variaría entre 53% y 81% para el año 2050, lo que significa que la meta de Primera Contribución Nacional Determinada del Ecuador se lograría sin la distribución de una gran infraestructura hidroeléctrica, sino a través de un grupo energético más diversificado de fuentes (Carvajal et al., 2019; Carvajal & Li, 2019).

En 2005, el Banco Mundial realizó un estudio que examinó los efectos multiplicadores de los grandes proyectos hidroeléctricos en varios países, este informe indicó que la energía hidroeléctrica oscila

variaciones financieras de entre 1.4 y 2.0, lo que significa que, por cada dólar invertido en actividades relacionadas con represar agua, se pueden generar de 40 a 100 centavos necesarios para remediaciones ambientales o sociales indirectamente implicados en la región por cada dólar invertido (Schaeffer et al., 2013). De ahí que se estima que este tipo de energía renovable requeriría mil millones de dólares para compensar el deterioro provocado por el cambio climático en los últimos 18 años de generación hidroeléctrica (Turner, Hejazi, et al., 2017).

Adicional, según los escenarios proyectados por el Banco Interamericano de Desarrollo en muchos países, la energía hidroeléctrica será susceptible a las variaciones climáticas. Perderá eficiencia por el cambio climático, la reducción de los caudales hídricos, y terminará siendo la fuente de abastecimiento secundaria y facilitadora de otras energías renovables, lo que beneficiará tanto ambientalmente como en la reducción de otros impactos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2018).

En todo el mundo, con millones de personas, existen grandes vulnerabilidades a los efectos actuales y esperados del cambio climático que a menudo afectan a los más pobres. El cambio climático afectará las precipitaciones, aumentará el derretimiento de la nieve y los glaciares, cambiará los flujos de evaporación e interrumpirá el ciclo natural del agua, creando una incertidumbre compleja para la gestión de los recursos hídricos y el desarrollo hidroeléctrico (Naranjo-Silva, Rivera-Gonzalez, et al., 2022; X. Zhang et al., 2018).

El cambio climático influye en todas las centrales hidroeléctricas existentes y en los posibles proyectos futuros; por lo tanto, los nuevos proyectos tienen mayor libertad para generar opciones de diseño apegadas a opciones de mitigación climática. Líneas futuras pueden simular el clima y la efectividad relacionada con un entorno cambiante que necesita parámetros de adaptación climática y sostenibilidad (Naranjo-Silva & Quimbita, 2022).

## **Conclusiones**

Los escenarios presentados muestran una reducción lineal denominada A1 que proyecta una capacidad energética de hasta 1,839 MW al 2050, en el escenario medio denominado B1 una capacidad de 1,995 MW, y en el escenario conservador B2 hasta 2,104 MW. Dicha capacidad corresponde a la sumatoria de potencia de los cinco proyectos hidroeléctricos emblemáticos: Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilatón, y Delsintagua que inicialmente se proponían en 2,275 MW. Por lo tanto, la proyección del estudio tiene una reducción porcentual al 2050 del 19%, 12% y 8% de las capacidades a los escenarios A1, B1 y B2 determinados del IPCC respectivamente.

Como tecnología climáticamente sensible, la energía hidroeléctrica contribuye a reducir el cambio climático global. Sin embargo, se vuelve cada vez más ineficiente debido a las variaciones climáticas, que son más prominentes, como se observa en la tendencia de generación de energía de Ecuador durante las últimas dos décadas.

El cambio climático constituye uno de los desafíos más significativos del Ecuador para cumplir con las metas



de la Primera Contribución Nacional Determinada proyectada en el sector energético por producción hidroeléctrica ante la ineficiencia calculada en 19% acentuada en los últimos 20 años, según datos de los 20 proyectos presentados en la Tabla 48.

El plan de implementación de Primera Contribución Nacional Determinada del Ecuador debería actualizarse cada dos años y medio (período medio de cada actualización de la NDC) para controlar el avance, y sensibilidad de fuentes como la energía hidroeléctrica y así conocer la capacidad real de reducción de carbono y eficiencia proyectada.

Con los cálculos de este estudio, los cinco proyectos (Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilatón, y Delsintagua) serán afectados por los impactos del cambio climático según los datos históricos y proyecciones (Naranjo-Silva & Quimbita, 2022).

**Nota 9.** Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador

Del presente apartado se ejecutó un Artículo como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva & Quimbita, 2022). Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador. Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad, 5(Sustainable Management of Water Resources), 1–14. <https://doi.org/10.46380/rias.v5.e268>

#### **b) Modelación por Trayectorias**

Actualmente, la energía hidroeléctrica es la principal fuente de energía renovable; sin embargo, el cambio climático está incrementando la frecuencia de eventos extremos, como inundaciones, sequías, erosión y sedimentación de ríos que generan incertidumbre en cuanto a la generación hidroeléctrica. Por lo tanto, se analizó las proyecciones de cambio climático para los sistemas hidroeléctricos de Ecuador con base en conceptos de las Rutas Socioeconómicas Compartidos (SSP's por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Ecuador es un excelente ejemplo de desarrollo hidroeléctrico porque, en 2020, el 87% de su matriz energética se basó en esta fuente (Naranjo-Silva, Punina, et al., 2022). A pesar de ser un país con abundante agua, factores como el uso excesivo, la distribución desigual y entrega deficiente de las autorizaciones de uso del agua podrían desencadenar conflictos potenciales entre los ciudadanos. Como referencia, el 88% de la población ecuatoriana vive en la cuenca del Pacífico, pero la disponibilidad de agua es limitada en esta zona, con solo el 31% del agua que se encuentra allí (Escribano, 2013; Ponce-Jara et al., 2018).

La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) estableció que, en 2020, había 71 centrales hidroeléctricas en operación con 5,074 MW de capacidad instalada frente a 2,242 MW en 2010 (CELEC, 2020). Por lo tanto, hubo un aumento del 127% en la capacidad hidroeléctrica instalada en 10 años. Por otra parte, se sabe que la generación de energía hidroeléctrica es una de las opciones disponibles de energía baja en carbono; sin embargo, existen problemas emergentes debido a su explotación desorganizada. Así, los problemas

derivados de la generación hidroeléctrica intensa deben ser destacados en el entendido de que los regímenes fluviales se modifican y las percepciones locales de las comunidades cercanas donde se asientan estos proyectos son negativas (Mayeda & Boyd, 2020; Sahu et al., 2020).

Relacionando dichos impactos, a manera global, históricamente, la tasa de eficiencia de las plantas hidroeléctricas se ha reducido entre 4% y 5 % durante los años de sequía en comparación con los valores promedio a largo plazo desde la década de 1980, lo que indica un impacto negativo en la producción hidroeléctrica actual debido a las sequías (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021; IPCC et al., 2007). Por lo tanto, los proyectos hidroeléctricos necesitan mejorar la eficiencia debido a las variaciones meteorológicas cada vez más presentes. Como resultado del cambio climático inducido por el hombre, es más probable que ocurran eventos extremos, lo que resulta en impactos adversos a la naturaleza y personas. Según el IPCC, existe un riesgo muy alto de que el cambio climático afecte aproximadamente a entre 3,300 y 3,600 millones de personas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021; M. M. Uamusse et al., 2020).

La Agencia Internacional de Energías Renovables estableció que, entre 2010 y 2020, el factor de potencia promedio ponderado global para la energía hidroeléctrica pasó del 51 % en 2015 al 46 % en 2020, lo que muestra que la energía hidroeléctrica está perdiendo eficiencia, al 1 % por año debido a los efectos del cambio climático en todo el mundo (International Renewable Energy Agency, 2020a; Sun et al., 2021). Por lo tanto, para estandarizar el término factor de potencia a lo largo de esta proyección, se define como una medida de la eficiencia de un sistema eléctrico porque representa el rendimiento y energía utilizada para transformar la electricidad en esfuerzo (Filho et al., 2017).

El cambio climático plantea un desafío cada vez mayor para la energía hidroeléctrica; un análisis de la Agencia Internacional de Energía en 2020 predijo que, hasta finales de siglo, se prevé que la eficiencia hidroeléctrica en América Latina disminuya en todos los escenarios climáticos posibles (International Energy Agency, 2020). El impacto de los eventos climáticos extremos en la producción de energía hidroeléctrica ha sido documentado en numerosos estudios en el sector energético. Sin embargo, pocos estudios miden las tendencias en esta fuente de producción de energía debido al cambio climático a largo plazo, lo cual es un vacío de conocimiento.

En este contexto, la novedad de este apartado es que se presenta un análisis de la eficiencia de los proyectos hidroeléctricos en un país en desarrollo con poca investigación de esta fuente renovable. Por lo tanto, con el objetivo de analizar las proyecciones de cambio climático para los sistemas hidroeléctricos de Ecuador se toma información de 14 proyectos que estudian escenarios según las Rutas Socioeconómicas Compartidas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

## **Metodología**

Para el análisis se utilizó una metodología cuantitativa mediante una serie de tiempo de entrada del período

de 2010 a 2020 con datos históricos para 14 centrales hidroeléctricas en Ecuador, gestionando datos de factor de potencia de generación histórica para posterior comparar con el estudio de proyección, es decir, se determinó la tendencia, definió un año de base de datos y luego proyectó escenarios hasta 2050.

Para la desviación se calculó durante diez años una tendencia, seguido, se seleccionó un año de inicio, se ingresó los datos en una plataforma de simulación energética (requerimientos de energía, población, PIB, red de energía, capacidad hidroeléctrica), calibramos el modelo con producción hidroeléctrica y datos meteorológicos (temperatura), y finalmente desarrolló un modelo para simular escenarios futuros de producción hidroeléctrica.

Dado que este estudio evaluó los desafíos futuros para el despliegue de hidroelectricidad en diferentes escenarios para comparar sus impactos, se utilizó un modelo de optimización del sistema de energía mediante una plataforma llamada Markal-TIMES. La estructura de la plataforma dependía de la entrada de datos como la distribución demográfica, tecnologías eléctricas, red de energía y datos de salida como los impactos económicos, necesidades de capital y proyecciones energéticas. Markal se utilizó para analizar los datos con perspectivas medioambientales, y los resultados de este examen se utilizaron para explorar vías basadas en escenarios contrastantes de producción y consumo de electricidad (Bongio et al., 2016; Calderón et al., 2014).

El año base seleccionado fue el 2017, cuando el precio promedio de la electricidad en Ecuador facturado a los clientes fue de 9.79 USD¢/kWh, y la demanda nacional de energía fue de 21,831 GWh. De la demanda se cobró una facturación de USD 1,901,334 (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2019; Rivera-González et al., 2020). Este año fue seleccionado por su tendencia energética con una distribución de varias fuentes primarias; también fue un año antes de la pandemia de COVID-19, cuando los valores de consumo se volvieron atípicos para múltiples sectores, lo que dificultó las proyecciones debido a las variaciones.

Además, en el 2017, se agregaron 102 MW de nueva energía, de los cuales el 98% fue hidroeléctrico en Ecuador regulando a los clientes por grupo de consumo de energía: el 88% representa al sector residencial, el 9% al sector comercial y el resto al sector industrial y de alumbrado público (3%). Según información del Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador en 2017 se tenía una población de 16.7 millones de habitantes, con una producción bruta de energía de 20,089 GWh hidroeléctrica (72%), eólica 73 GWh (0.3%), fotovoltaica 37 GWh (0.13 %), 28 GWh de biogás (0.10%), 431 GWh de biomasa (1.5%), y de fuentes térmicas: 4,439 GWh de motores de combustión interna (16%), 1,644 GWh de Turbo-gas (6%), y 1,292 GWh de Turbo-steam (4%) (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017b; Poveda-Burgos et al., 2017).

## **Resultados**

En primer lugar, se calculó la eficiencia energética de los proyectos. De acuerdo con la Agencia de

Regulación y Control de la Energía y los Recursos Naturales No Renovables (entidad adscrita al Ministerio de Energía de Ecuador), los datos de factor de potencia de 14 centrales hidroeléctricas mostraron la tendencia que se detalla a continuación.

Tabla 52. Factor de potencia hidroeléctricas del Ecuador período 2010–2020 [%]

| Proyectos<br>hidroeléctricos | Factor de Potencia (%) |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       | 2010–2015    | 2016–2020    |
|------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|
|                              | 2010                   | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015                     | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  | Promedio     | Promedio     |
| Agoyán                       | 66.95                  | 68.43 | 72.05 | 74.17 | 71.46 | 80.55                    | 72.63 | 70.00 | 65.77 | 71.49 | 69.11 | 72.3         | 69.80        |
| Baba                         | -                      | -     | -     | -     | -     | -                        | 42.50 | 36.00 | 28.25 | 41.00 | 46.02 | -            | 38.75        |
| Coca Codo Sinclair           | -                      | -     | -     | -     | -     | -                        | 48.51 | 45.00 | 46.59 | 48.05 | 51.91 | -            | 48.01        |
| Manduriacu                   | -                      | -     | -     | -     | -     | 42.59                    | 57.04 | 64.35 | 56.00 | 64.05 | 66.57 | 42.6         | 61.60        |
| Marcel Laniado               | 41.47                  | 35.23 | 56.33 | 44.64 | 50.82 | 55.73                    | 60.89 | 58.17 | 48.34 | 63.37 | 46.40 | 47.4         | 55.43        |
| Minas San Francisco          | -                      | -     | -     | -     | -     | -                        | -     | -     | -     | 41.90 | 42.46 | -            | 42.18        |
| Paute Mazar                  | -                      | 63.52 | 65.58 | 43.44 | 50.98 | 55.78                    | 51.13 | 48.44 | 46.37 | 52.21 | 45.14 | 55.9         | 48.66        |
| Paute Molino                 | 42.02                  | 60.70 | 64.25 | 54.43 | 55.73 | 64.39                    | 54.81 | 48.07 | 51.13 | 58.22 | 53.94 | 56.9         | 53.23        |
| Paute Sopladora              | -                      | -     | -     | -     | -     | -                        | 27.65 | 52.11 | 50.04 | 56.38 | 57.41 | -            | 48.72        |
| Pucará                       | -                      | 24.37 | 6.85  | 29.46 | 40.36 | 47.35                    | 43.07 | 31.18 | 33.24 | 39.28 | 37.90 | 29.7         | 36.93        |
| San Francisco                | 56.05                  | 49.05 | 69.81 | 75.10 | 71.50 | 80.03                    | 61.80 | 52.39 | 41.23 | 55.41 | 66.89 | 66.9         | 55.54        |
| Saucay                       | 48.36                  | 68.17 | 66.43 | 54.85 | 56.14 | 67.87                    | 55.47 | 52.58 | 47.73 | 51.49 | 54.28 | 60.3         | 52.31        |
| Sayamirin                    | 56.60                  | 77.22 | 76.53 | 63.43 | 64.35 | 73.85                    | 63.97 | 60.34 | 57.49 | 25.50 | 40.08 | 68.7         | 49.48        |
| Sibimbe                      | 63.26                  | 70.26 | 66.21 | 56.40 | 67.20 | 72.88                    | 67.00 | 67.29 | 54.99 | 64.42 | 66.04 | 66.0         | 63.95        |
| <b>Promedio</b>              |                        |       |       |       |       | <b>53.04<sup>a</sup></b> |       |       |       |       |       | <b>56.67</b> | <b>51.76</b> |

Source: (CELEC, 2020; Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

De la Tabla se observa períodos en los que no hay datos; esto se debe a que los proyectos aún no estaban en operación; como se mencionó, los últimos 13 años fue el período en que la energía hidroeléctrica en Ecuador creció. Por otra parte, se dividen los datos en períodos de 5 años para calcular el promedio. Comparando los períodos 2010-2015 y 2016-2020, se reduce en -4.90% el factor de potencia. Este valor representa una disminución del 9.4% entre los dos períodos; es decir durante estos 10 años, los proyectos hidroeléctricos perdieron un 0.5% de eficiencia anual

Por otra parte, en 2017, la capacidad de generación de Ecuador registró 8,036 MW de potencia nominal y 7,435 MW de potencia efectiva. La potencia nominal de 4,716 MW (58.67%) correspondió a plantas de fuentes renovables y 3,321 MW (41.33%) a fuentes de energía no renovables. De los 4,716 MW de energía renovable, el 96% correspondió a energía hidráulica. Además, en cuanto a la distribución total de energía eléctrica en el país, 104 plantas fueron renovables y 193 térmicas, totalizando 297 proyectos eléctricos distribuidos en 23 provincias. La mayor concentración de energía se encontró en las provincias de Azuay, Napo y Guayas, con plantas de generación predominantemente renovables en las dos primeras. Además,

el factor de potencia o eficiencia promedio de los 14 proyectos para 2017 fue de 52.76 (Hartmann, 2020; Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017b).

Para iniciar la evaluación del modelo en Markal, se comparó la temperatura observada para los períodos de calibración; Seguido en el gráfico, las barras de diferentes colores se refieren al período de tiempo de 1981 a 2017 en seis estaciones hidrológicas en Ecuador: Lumbaqui, Baños, Paute, Sangay, Puerto Ila y Babahoyo (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017a). Estas estaciones meteorológicas están relacionadas con la distribución principal de la producción hidroeléctrica en las provincias de Azuay, Napo, Tungurahua y Cañar en Ecuador, como se representa a continuación.

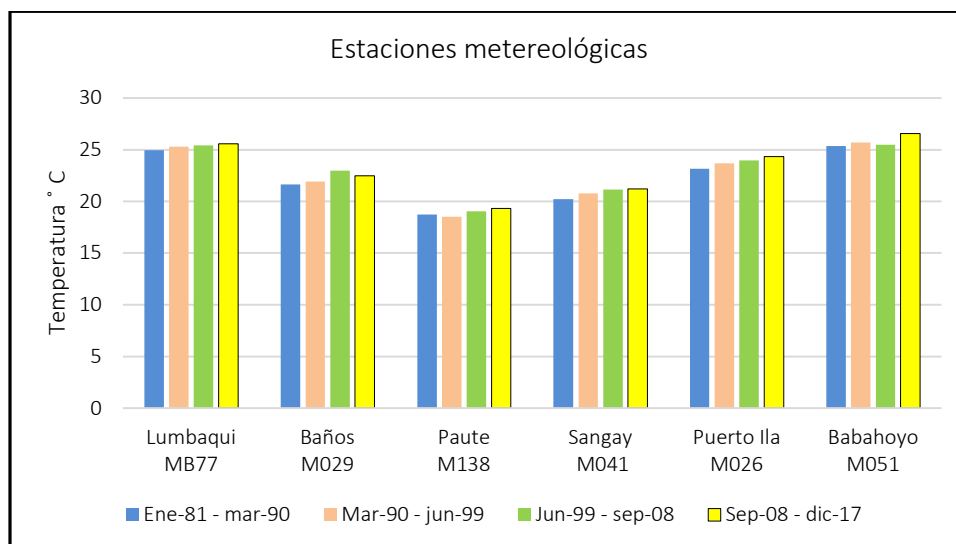


Ilustración 39. Estaciones meteorológicas ecuatorianas

Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017a)

Ecuador tiene una capacidad estratégica para proyectos hidroeléctricos gracias a su clima tropical y afluentes de agua que no varían mucho a lo largo del año; sin embargo, aunque es un clima tropical en las temporadas de verano (junio a septiembre), hubo zonas sin mucha precipitación, afectando la generación hidroeléctrica (Villamar et al., 2021).

Con el modelo se utilizó las estaciones meteorológicas relacionadas con las principales provincias donde se ubican las hidroeléctricas. Los resultados demostraron que la serie simulada coincidió bien con la serie observada, y las estaciones presentaron aumentos de temperatura en 2017. Este fenómeno surgió de la alta intensidad de las actividades humanas en estos lugares donde se construyeron los proyectos hidroeléctricos. Además del año base de datos, la generación hidroeléctrica mensual se representa para calibrar la distribución de energía como indica la Figura seguida (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017a).

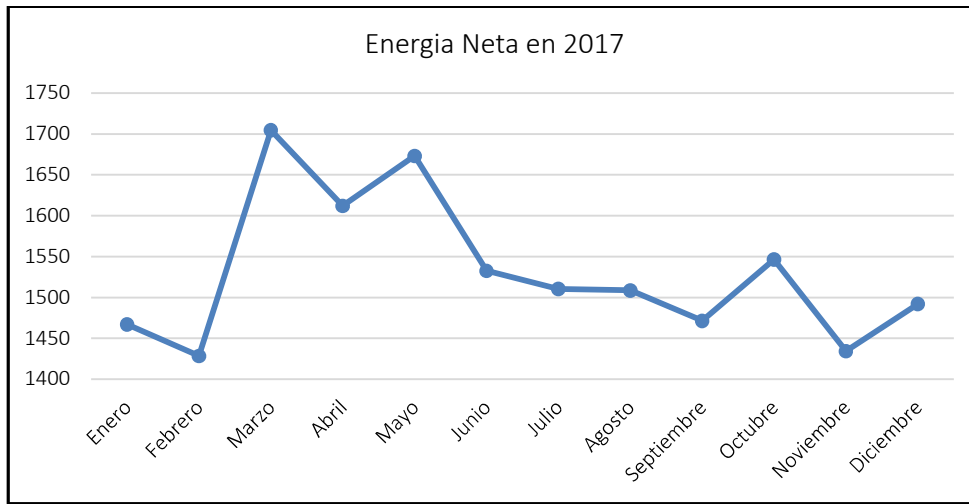


Ilustración 40. Energía hidráulica neta entregada por mes en Ecuador

Fuente: (Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador, 2017a).

Ecuador tiene una capacidad estratégica para proyectos hidroeléctricos gracias a su clima tropical y afluentes de agua que no varían mucho a lo largo del año; sin embargo, como muestra la Ilustración 40, hubo meses con una reducción del potencial. Si bien es un clima tropical en las temporadas de verano (junio-agosto), se presentaron climas sin mucha precipitación, afectando la generación hidroeléctrica (Villamar et al., 2021).

Para la proyección de datos hasta el 2050, los principales impulsores socioeconómicos son la población, la actividad económica y distribución de la red de energía que se traduce en escenarios cuantitativos para derivar un modelo del factor de potencia hidroeléctrica de la energía y emisiones asociadas con las Rutas Socioeconómicas Compartidas como muestra la Figura siguiente.

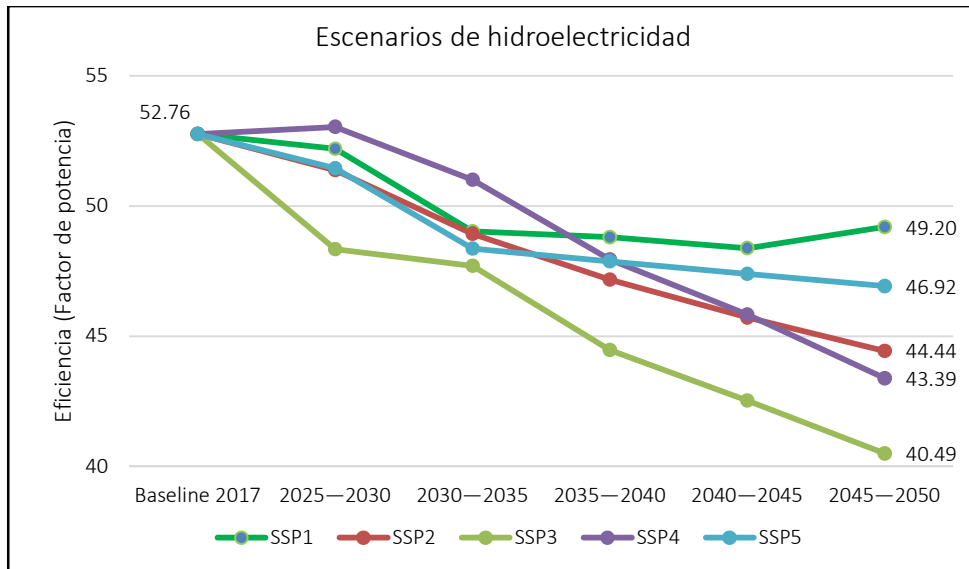


Ilustración 41. Escenarios hidroeléctricos de eficiencia ecuatoriana hasta 2050.

Fuente: (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Rivera-Gonzalez, et al., 2023)

Como resultado del análisis, se seleccionó tres escenarios futuros de eficiencia hidroeléctrica que capturan una variedad de desafíos que deben abordarse, a criterio del investigador de las cinco Rutas Socioeconómicas Compartidas, se seleccionó la proyección SSP2, SSP4 y SSP5, creyendo que estos escenarios tienen una tendencia central relacionada al 2050 porque las características se basaron en el costo de capital que sirve como un factor clave en la ubicación y construcción de las instalaciones. Por otro lado, se eligieron escenarios donde el crecimiento de la población era alto en los países en desarrollo (Choudhury & Dey Choudhury, 2020; Yao et al., 2021).

En contraste, las rutas SSP1 y SPP3 en el Sexto Informe de Evaluación fueron poco evaluadas por la complicación de unir otros modelos, suposiciones y fuerzas motrices, por ejemplo con las Rutas de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés) y Niveles de Calentamiento Global (GWL por sus siglas en inglés) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Las proyecciones representaron una evolución de fluctuaciones relativas por cambios en la tecnología y otra con cambios medianos anclados a un desarrollo sustentable de mediana escala, por lo que, los factores que determinaron el avance del cambio climático se relacionaron con cada escenario, y existía una incertidumbre asociada a la evolución del sistema socioeconómico y meteorológico del Ecuador. Además, los resultados determinaron la variación y diferencia de los escenarios modelados en el software Markal—TIMES como se muestran a continuación.

Tabla 53. Variaciones del factor de potencia ecuatoriano al 2050

| Promedio                                      | 2010–2020          | SPP5<br>Escenario al 2050 | SPP2<br>Escenario al 2050 | SPP4<br>Escenario al 2050 |
|---|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 14 proyectos hidroeléctricos                  | 53.04 <sup>a</sup> | 46.92 (–6.12)             | 44.44 (–8.6)              | 43.39 (–9.65)             |
| Variación %<br>2010–2020 vs. SPP proyecciones | -                  | –11.5%                    | –16.2%                    | –18.2%                    |

Fuente: (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Rivera-Gonzalez, et al., 2023)

## Conclusiones

Para construir los escenarios hidroeléctricos frente al cambio climático en Ecuador, se utilizó la eficiencia histórica de 14 proyectos, se definió el 2017 como año de referencia, y proyectó los criterios del IPCC en las tendencias hidroeléctricas relacionadas con las Rutas Socioeconómicas Compartidas de lo cual, se predice que la eficiencia hidroeléctrica en Ecuador disminuiría considerablemente hasta 2050. En el cálculo, los tres escenarios seleccionados presentaron una reducción: 11.5% en SSP5, 16.2% en SSP2 y 18.2% en SPP4. Por lo tanto, las oportunidades para la producción hidroeléctrica ante el cambio climático son variables en Ecuador, pero los desafíos son amplios.

En Ecuador, del 2010 al 2020, este estudio mostró una eficiencia decreciente de 0.5% anual en los 14 proyectos analizados, con variaciones significativas en sus potencialidades. La generación hidroeléctrica

muestra una sensibilidad variable al cambio climático; esto es importante ya que, en 2020, el 87% de la matriz energética del país dependía de la producción hidroeléctrica.

En Ecuador, la construcción hidroeléctrica rápida y agresiva ha cambiado la matriz energética en los últimos quince años. Aun así, esta producción renovable es vulnerable al cambio climático según los 14 proyectos analizados. Así, antes de considerar la construcción de represas, es necesario explorar la futura eficiencia hidroeléctrica con decisiones más acertadas, impulsando el desarrollo de otras fuentes renovables no convencionales que eviten los efectos del cambio climático en los próximos años.

El presente análisis de escenarios, es solo un ejemplo de un país en desarrollo con un número representativo de proyectos hidroeléctricos; es necesario un análisis de los países con la mayor capacidad hidroeléctrica instalada para determinar el mejor enfoque, utilizando datos de eficiencia, producción de energía y parámetros climáticos para tomar futuras decisiones de inversión (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Rivera-Gonzalez, et al., 2023).

**Nota 10.** Hydropower Scenarios in the Face of Climate Change in Ecuador.

Del presente apartado se ejecutó un Artículo como se muestra en el Anexo nro. 1. (Naranjo-Silva, Punina-Guerrero, Rivera-Gonzalez, et al., 2023). Hydropower Scenarios in the Face of Climate Change in Ecuador. (2023). Sustainability, 15(13), 10160. <https://doi.org/10.3390/su151310160>

## 5.5 Relación entre la Hidroelectricidad y la Sostenibilidad

Como parte del estudio se proponen recomendaciones a varios aspectos técnicos, ambientales, y sociales para diferenciar y mitigar los impactos hidroeléctricos, y su divergencia por evitar el uso de una fuente fósil con planes de mejora y compensación como apoyo de infraestructura básica en comunidades relacionadas, control continuo en la calidad del agua, monitoreo ambiental, entre otras acciones.

Con estos parámetros referenciales, se propone una Guía que se socializará con entidades de control energético, además de proyectar una publicación científica para expandir el estudio que se representa como una investigación para la toma de decisiones. Esta parte de la tesis tiene relación con el Objetivo Específico 2: *“Establecer un instrumento de evaluación de los proyectos hidroeléctricos bajo una dimensión técnica, económica y social buscando la correlación entre ellas”*.

Si bien el sustento es conocer al desarrollo hidroeléctrico, también en conformidad a los hallazgos se desarrolla esta Guía propuesta que se diseña para mejorar los diversos problemas, e impactos que en el Estado del Arte y, problema de investigación se justificó para elaborar mejoras. Por esa razón, el documento propuesto surge como una novedad para la toma de decisiones.



# Investigación para la toma de decisiones: Guía Operacional para el desarrollo Hidroeléctrico Sostenible

## Objetivo

Proponer lineamientos, recomendaciones y acciones para desplegar la hidroelectricidad futura y actual en base a criterios de sostenibilidad, buscando la mitigación de efectos sociales, culturales, técnicos y ambientales que se desenvuelven al usar el medio ambiente, y, específicamente el recurso hídrico.

## Contextualización

El macro ámbito de esta Guía es global debido a que el uso de este instrumento sirve para Estados, Países u Confederaciones que gestionen sistemas energéticos hidroeléctricos o proyecten desarrollarlos.

A nivel meso el documento sirve para Organismos, Ministerios, Secretarías u Entidades de control energético que integren y proyecten sistemas de producción hidroeléctrica en cada país.

A nivel micro para las empresas encargadas de desarrollar infraestructura de este tipo de energía renovable servirá este documento como referencia en material técnica ambiental amigable.



## Ámbito

Aunque algunas tecnologías de generación eléctrica se caracterizan por costos reducidos de producción como el gas natural, otras, como las centrales hidroeléctricas identifican altos costos de inversión que no se estiman adecuadamente con modelos simplificados basados en potencia a subministrarse, carga neta y relación de inversión.

Al respecto, se propone un nuevo enfoque de inversión, en el cual, el desarrollo hidroenergético se divida en diversas variables, por ejemplo, el cambio climático, ítem relevante que tendrá efectos significativos en la generación debido a variantes en la magnitud meteorológica, estacionalidad, humedad, escorrentía de ríos y aumento de la evaporación de efluentes (Cavazzini et al., 2016).

Cabe destacar que el uso de agua para cualquier actividad, entre ellas, la de generación eléctrica, establece fragilidad a los ecosistemas aledaños donde se depende de la adecuada gestión para mitigarlos (Naranjo-

Silva & Álvarez del Castillo, 2021a) y, si no se consideran políticas eficientes de desarrollo hidroeléctrico, la sostenibilidad del recurso natural no se mantendrá en el tiempo, generando escases hídrica a mediano plazo, por consiguiente, se propone una **Guía Operacional** para el desarrollo hidroenergético nuevo o existente.

### **Marco**

El marco justificativo de esta Guía es implementar estrategias globales, normativa por país y mejoras que buscan la mitigar los impactos de la hidroelectricidad y fomentar esta energía renovable de manera sostenible, desarrollando el detalle normativo:

La COP21, o 21ª Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), conocida como Acuerdo de París, llevada a cabo del 30 de noviembre al 11 de diciembre de 2015 comprometió a los líderes mundiales a realizar esfuerzos para estabilizar el clima por debajo de los 2° [C] y limitar a 1.5° [C] el aumento de las temperaturas globales en comparación con niveles preindustriales, lo que significa objetivos ambiciosos para alcanzar emisiones muy bajas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) antes de fin de siglo (Laborde et al., 2020).

- Para implementar este objetivo a largo plazo, los países de todo el mundo presentaron previamente a la COP21 sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) con un plan de reducciones de emisiones para 2025 o 2030, y se actualizarán cada cinco años a partir de 2020. Dichos planes se enmarcan una parte en la reducción de emisiones, y desde el ámbito energético se propone un mayor despliegue hidroeléctrico, como respuesta a la necesidad de desarrollar una economía con bajas emisiones de carbono, pero, que asegure la gestión de recursos hídricos (Díaz et al., 2017).
- En este contexto, analizar sistemas energéticos hidroeléctricos brinda importancia a la mitigación del cambio climático, asegurando que todos alcancen el desarrollo óptimo y balanceado, en consecuencia, en la actualidad, academia e investigadores tienen un papel importante definiendo lineamientos productivos y protegiendo el medio ambiente mediante sistemas seguros y eficientes.

Por otra parte, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) determina 8 sectores prioritarios para trabajar de manera representativa en cambios y mejoras ambientales hasta el 2050, los cuales son:

- Agricultura,
- Asentamientos humanos,
- Soberanía alimenticia,
- Grupos de atención prioritaria,
- **Hídrico,**
- Cambio climático,

- Equidad de género, e,
- Incorporación integral del enfoque de género (Botelho et al., 2017).

Entre los 8 sectores que la ONU define que el sector hídrico representa un área que requiere una cuidadosa atención por su fragilidad y relación directa con humanos, seres vivos y sistemas de riego. Al respecto, es necesario implementar programas de comunicación y fortalecimiento de capacidades que sensibilicen a los actores del sector hídrico y usuarios del agua, sobre los efectos del cambio climático para la industrialización sostenible e inclusiva, uso eficiente de recursos productivos, eficiencia energética y despliegue de energía renovable como la hidroelectricidad (Ministry of the Environment and Water of Ecuador, 2017).

- Con base en la ONU, se sugieren revisar documentos normativos como la Agenda 2030 donde se establece que el patrimonio hídrico debe generar y establecer mecanismos de conservación de fuentes hídricas para asegurar a futuro, agua en cantidad y calidad con el uso responsable en proyectos con infraestructura hidroeléctrica existente o nueva.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en 2019 la Organización de las Naciones Unidas planteo estos objetivos como un modelo para un futuro sostenible para todos. Están interconectados e incluyen los desafíos globales que enfrentamos todos los días, como la pobreza, desigualdad, clima, degradación ambiental, prosperidad, paz y justicia. Para no dejar a nadie atrás, es importante alcanzar estos objetivos para 2030. Tres objetivos importantes a este desarrollo relacionados con este tema de tesis y guía son:

- ODS. 7 - Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. La energía significa desarrollo, es necesaria y su sostenibilidad debe ser asegurada con el cuidado de recursos naturales pertinente en las renovables y no renovables (sistemas de generación eléctrica).
- ODS. 12 - Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. La producción sostenible consiste en fomentar el uso eficiente de recursos y energía, pero sin un análisis adecuado del cual se conozca la afectación por la sobre explotación hidroeléctrica la sostenibilidad pierde fuerza.
- ODS. 13 - Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. El cambio climático afecta a todos los países, produciendo un impacto negativo en su economía, sino se analizan las repercusiones en los proyectos hidroeléctricos que alteran ecosistemas se proyecta un impacto perjudicial para áreas ricas en recursos hídricos, fauna y flora donde existen estas infraestructuras (IPCC -ONU, 2019).

Por otra parte, a nivel regional latinoamericano, por ejemplo en Ecuador, el Gobierno lanzó, en mayo de 2019 el *“El Acuerdo es Ahora”* con la finalidad de gestionar 7 ejes que marcarán la agenda política durante los próximos años, en él, existe el eje de Sostenibilidad y Cambio Climático con el fin de *“Impulsar el desarrollo sostenible a nivel nacional mediante la difusión de los objetivos de adaptación y mitigación al cambio climático plasmados en nuestra Contribución Determinada a Nivel Nacional para garantizar la*

participación de los distintos sectores en su consecución y fortalecer la capacidad nacional de respuesta” (Presidencia de la República del Ecuador, 2019).

- Con este lineamiento en Ecuador se enmarcan análisis de mejora de la energía renovable donde ingresa la hidroelectricidad, si bien el Ecuador genera menos del 0.5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero del cambio climático global, el país se compromete voluntariamente a enfrentar este desafío (Ministry of the Environment and Water of Ecuador, 2017).

En consecuencia, con estos convenios e instrumentos voluntarios por país a favor del ambiente y desarrollo sostenible, se propone una **Guía Operacional para el desarrollo Hidroeléctrico Sostenible** que apoye la toma de decisiones de manera consistente e integrada con beneficios, alertas y recomendaciones técnicas a los diferentes escenarios hidroeléctricos.

### Estructura

La organización de la propuesta de Guía Operacional de manera gráfica es la siguiente:

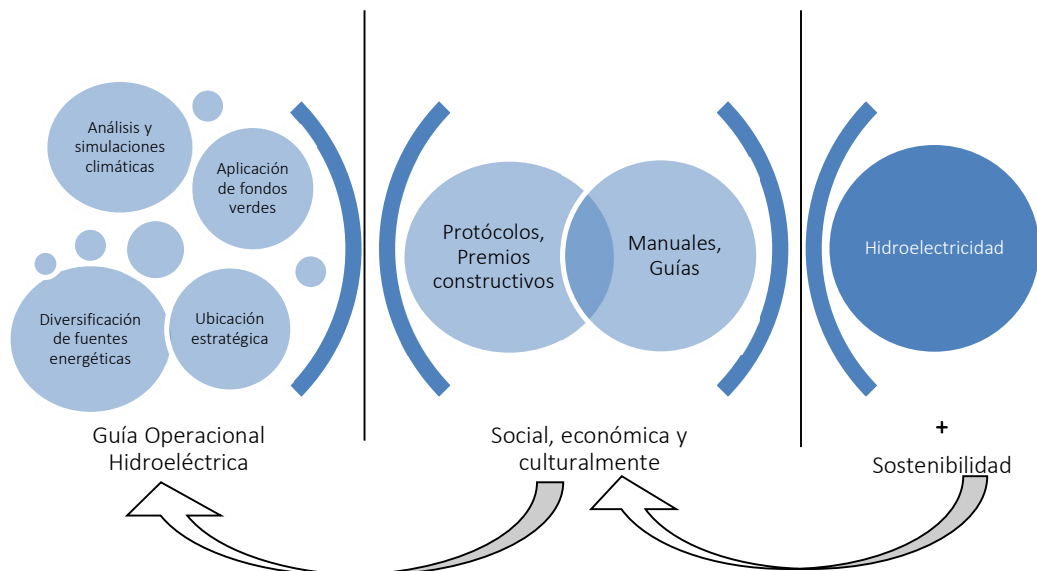


Ilustración 42. Variables de la Guía para el desarrollo Hidroeléctrico Sostenible

Con la Ilustración 42 planteada, se menciona que, existe el criterio equivocado que, al desarrollar un proyecto hidroeléctrico de energía renovable, se relaciona directamente con la sostenibilidad, planteamiento equivocado por las diversas afectaciones que se generan.

Sin embargo, al existir varios instrumentos voluntarios para adoptar criterios de manera social, económica y cultural que apoyan la construcción de proyectos hidroeléctricos, por ejemplo, actualmente existen protocolos, guías, premios, entre otros documentos, como el protocolo de lineamientos de sostenibilidad hidroeléctrica (HSAP) o Premio Blue Planet que genera recomendaciones para la construcción sostenible de centrales apoyando las fases de edificación con criterios de educación, comunicación a pobladores, verificación de salud de trabajadores, entre otros ítems.

Como se muestra la estructura de la Guía Operacional busca un despliegue hidroeléctrico alineado a la sostenibilidad, por lo cual, recomienda, propone y establece acciones a centrales en marcha y proyectadas con el fin de construir un mejor futuro. En cada recomendación, cada variable define una temporalidad para trabajar de la siguiente manera.

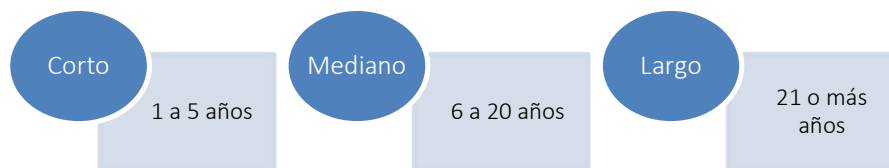


Ilustración 43. Periodicidad de las acciones

Con la temporalidad definida, seguido se indican los parámetros técnicos, ambientales, y sociales, por lo cual seguido la relación con la propuesta:

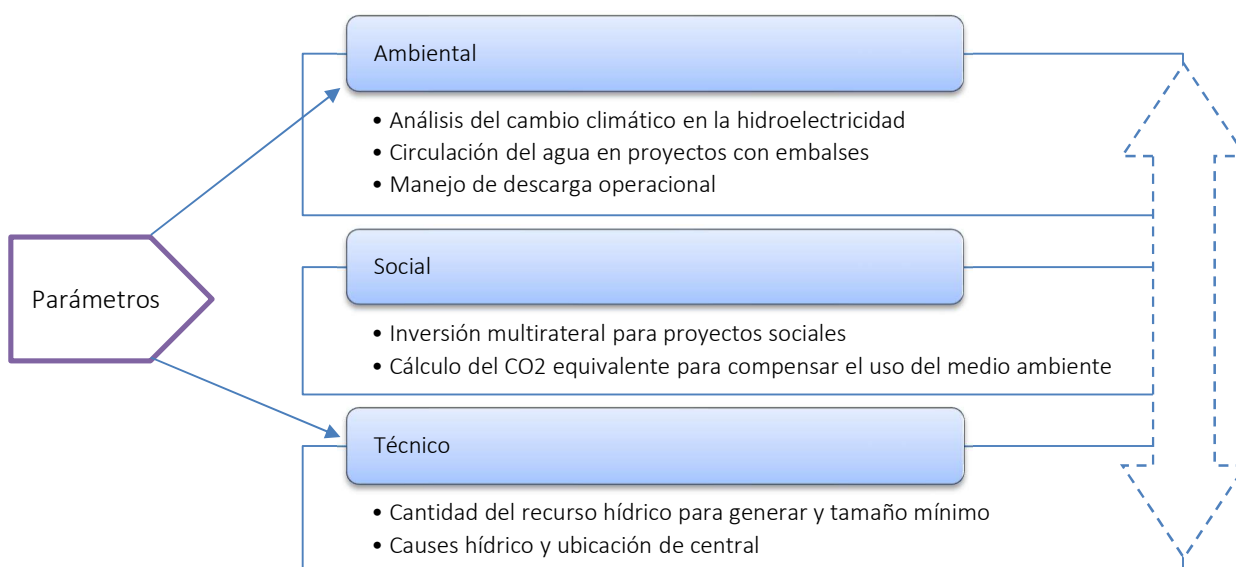


Ilustración 44. Parámetros y variables de la Guía Operacional

Elaboración: El Investigador

Un proyecto eficiente y sostenible debería gestionar al menos 1 criterio de cada tipo de parámetro sea ambiental, social o técnico; es decir al menor establecer 3 de los 7 parámetros que se recomiendan cubriendo un 43% de las condiciones como una Política de desarrollo hidroeléctrico, el justificativo es que de cada tipo de parámetro identificado genera mejoras en al menos un aspecto, robusteciendo las ventajas del desarrollo de infraestructuras hidroeléctricas en lugares sensibles generalmente con flujos y caudales hídricos que requieren de una nueva distribución.

Por otra parte, previo a la definición de cada acápite, se definen las infraestructuras hidroeléctricas por tamaño según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en función de la capacidad estas estructuras, como se muestra a continuación:

Tabla 54. Clasificación por capacidad de cada proyecto hidroeléctrico

| Ítem | Rango [MW]      | Tipo de central |
|------|-----------------|-----------------|
| 1    | ≤ 0.5           | Micro           |
| 2    | 0.60 – 1        | Mini            |
| 3    | 1.1 - 10        | Pequeña         |
| 4    | 11 - 300        | Mediana         |
| 5    | 301 en adelante | Gran            |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Daniel & Gaviria, 2018)

Estas características sirven para enunciar el tamaño como una clasificación para este documento, a continuación, el detalle de con el detalle de cada propuesta específica.

## Recomendaciones

### 1. Análisis del cambio climático en la hidroelectricidad

| Propuesta                          | Parámetro           | Temporalidad                  |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Análisis y simulaciones climáticas | Ambiental & Técnico | Corto, mediano y largo plazo* |

El cambio climático es un ítem relevante en los sistemas energéticos y tendrá efectos significativos en la generación hidroenergética, debido a variantes en la magnitud meteorológica, estacionalidad, escorrentía de ríos y aumento de la evaporación de efluentes que se proyecta y refleja en diversos estudios de los impactos climáticos y reducción del potencial (Bondarenko et al., 2019; Detz & Van Der Zwaan, 2019).

Como resultado del cambio climático inducido por el hombre, es más probable que ocurran eventos extremos, lo que resulta en daños a la naturaleza y personas. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, existe un riesgo muy alto de que el cambio climático perjudique a aproximadamente entre 3,300 y 3,600 millones de personas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

En el caso de la energía hidroeléctrica, se espera que los cambios estacionales en las cuencas dominadas por la nieve provoquen un aumento en el invierno y una disminución de la producción durante los meses de verano. Pero, el derretimiento de los glaciares también influye en los regímenes hidrológicos, el transporte de sedimentos, el movimiento de especies naturales y la disipación de contaminantes de los ríos al océano. Además, la tasa de eficiencia de la planta se ha reducido entre 4 % y 5 % durante los años de sequía en comparación con los valores promedio a largo plazo desde la década de 1980, lo que indica un impacto negativo en la producción hidroeléctrica actual debido a las sequías (Edenhofer et al., 2011; IPCC-IPBES, 2020).

Al respecto, es relevante estudiar y simular la eficiencia donde se ubicará o ubica cada central para conocer los cambios proyectados, y asumir una demanda práctica de la producción hidroeléctrica, cotejando los cálculos teóricos para planear la mejor decisión de inversión, entre estas simulaciones existen modelos

climáticos y de planificación energética desarrollados en plataformas por varias Organizaciones Internacionales.

En tanto, se recomienda que antes de desarrollar una central hidroeléctrica, e incluso en las desarrolladas mediante el apoyo de un técnico especialista, o experto en simulaciones energéticas y climáticas se analice escenarios de planificación energética para saber el contexto proyectado y evitar inversiones ineficientes con factores de planta reducidos, altos costos por infraestructura improductiva o cambios agresivos en el ambiente, y como se mencionó, existen varios programas informáticos, los cuales se dividen en:

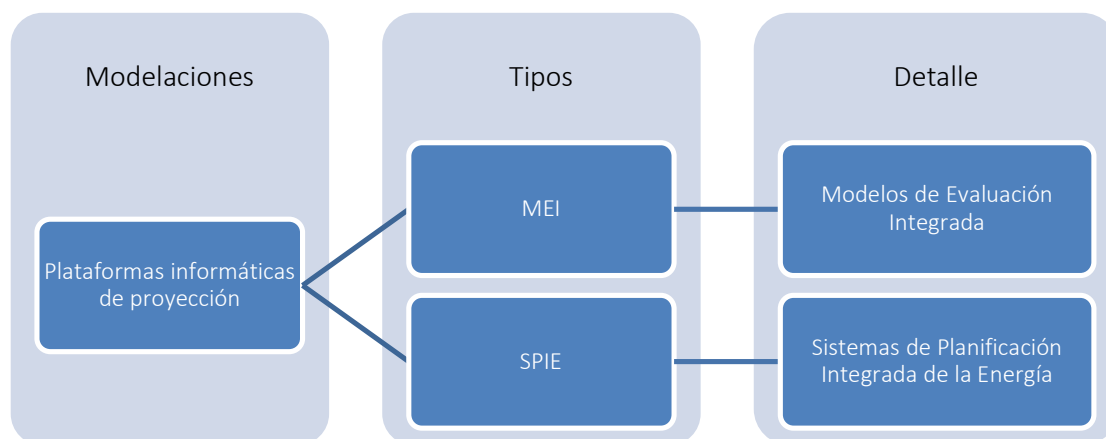


Ilustración 45. Modelos energéticos y sistemas climáticos

Elaboración: El Investigador.

Los Modelos de Evaluación Integrada (MEI) poseen un fundamento matemático que representa interacciones entre diferentes escalas espaciales y temporales, procesos y actividades (IPCC-WGI, 2007). Los MEI proporcionan un esquema para abordar la problemática multidimensional de cambio climático, mediante la generación de escenarios posibles que asistan a la toma de decisiones y evaluación de políticas. Estos modelos son ampliamente utilizados para orientar la política climática y constituyen una de las herramientas disponibles para analizar los sistemas energéticos a nivel global (Carvajal & Li, 2019).

Por otra parte, también existen plataformas que se denominan Sistemas de Planificación de Energía, que representa el análisis sistemático de los factores que influyen en la evolución energética. Facilita la solución de problemas y posibilita el examen de vínculos, la evaluación de las soluciones de compromiso y la comparación de las consecuencias, ayudando así a los países a elaborar una estrategia energética que apoye los objetivos de desarrollo sostenible (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2015).

Es importante aclarar que adicional de uso de las provisiones energéticas en las diversas plataformas, se combinan las proyecciones a escenarios de temperatura (A1-B2), líneas evolutivas de cambio climático donde se marcan marcadas diferencias globales y regionales que dependen de las acciones de los países actualmente denominados Caminos Socioeconómicos Compartidos (SSPs por sus siglas en inglés), Rutas de

Concentración Representativas (RCP por sus siglas en ingles) y otros conceptos generados por el grupo de científicos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

Teniendo en cuenta los dos tipos de plataformas, estas herramientas se relacionan a la prospectiva energética, las opciones brindan especificidades en función de cada investigación, y tiene las siguientes plataformas que tienen más descargas y usuarios según el análisis que Connolly ejecutó (Connolly et al., 2010).



Tabla 55. Modelos de planificación energética y evaluación integrada

| No. | Herramienta informática  | Organización desarrolladora  | Enfoque   |
|-----|--|--|---|
| 1   | Message - Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact     | Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA por sus siglas en inglés) | Calcula escenarios de expansión a largo plazo de menor costo para sistemas de energía.  |
|     | Modelo para alternativas del sistema de suministro de energía y sus impactos ambientales generales |  | Combina tecnologías y combustibles para construir cadenas energéticas, permitiendo mapear los flujos de energía desde la extracción de recursos hasta la demanda.<br><br>Diseña estrategias mediante el análisis de combinaciones de energía óptimas en función de los costos, necesidades de inversión, nueva infraestructura, seguridad del suministro, utilización de recursos, tasa de introducción de nuevas tecnologías y limitaciones ambientales. |
| 2   | The Integrated MARKAL-EFOM System (Times)  | Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés)          | Brinda una concepción de la evolución energética para un período de 40 a 50 años en base a los recursos energéticos renovables, evaluaciones tecnológicas y marco político.   |
|     | Sistema integrado de planificación MARKAL  |  | Utiliza diferentes sistemas relacionados con la energía a nivel de país para representar su evolución generando modelos de abajo hacia arriba con programación lineal optimizado de acuerdo con una serie de restricciones del usuario.<br><br>Usa parámetros como costos de energía, costos de la estación, rendimiento de la planta, etc. para adoptar la tecnología óptima para satisfacer una demanda.  |
| 3   | Leap - Long-range Energy Alternatives Planning   | Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI)                                   | Herramienta de modelado integrado que rastrea el consumo de energía, producción y extracción de recursos en los sectores de una economía durante períodos de pronóstico.  |
|     | Planificación de alternativas energéticas de largo alcance   |  | Planifica sistemas energéticos de manera sostenible con una perspectiva de suministro por fuente, además adopta escalas diferentes, desde ciudades y estados hasta aplicaciones nacionales, regionales y globales a largo plazo.<br><br>Modela y analiza distintos escenarios planteados para cada sector de demanda de energía, además expone escenarios alternativos a largo plazo en base a implicaciones.   |
| 4   | Homer - Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources   | UL Company   | Plataforma que construye micro redes híbridas y sistemas eléctricos conectados.   |
|     | Optimización Híbrida de Múltiples Recursos Energéticos   |  | Proporciona una red que combinan energía tradicional y renovable, almacenamiento y administración de carga, tiene más de 250.000 usuarios en 193 países.<br><br>El sistema fomenta la optimización y viabilidad del diseño de redes energéticas en base a precios de mercado.   |

|   |   |                                |   |
|---|---|--------------------------------|---|
|   |   |                                | Se basa en el mercado y precios de la energía conforme los niveles de demanda.  |
| 5 | Enpep - Energy and Power Evaluation Program<br>Programa de evaluación de energía y potencia | Argonne National<br>Laboratory | Modelo de equilibrio no lineal que empareja la demanda de energía con los recursos y tecnologías disponibles.<br><br>Toma decisiones descentralizando, el sector energético y puede calibrarse según diferentes preferencias de los usuarios y proveedores de energía.  |
| 6 | EnergyPRO<br>Modelización tecno económico de proyectos<br>energéticos                       | EMD International              | Planifica un sistema de generación de energía durante un período prolongado y dentro de limitaciones definidas.<br><br>Código de planificación de generación de energía con evaluaciones comparativas y relacionadas con el desarrollo eléctrico.<br><br>Lleva a cabo la expansión energética teniendo en cuenta la disponibilidad de combustible, recursos y restricciones ambientales.  |
| 7 | RETSscreen<br>Software de planificación energética económica y<br>medioambiental            | Gobierno de Canadá             | Software de gestión de energías limpias para el análisis de viabilidad de proyectos de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración.<br><br>Modelo que establece y analiza diferentes opciones de expansión de la generación y transmisión del sistema eléctrico a mediano y largo plazo.<br><br>Calcula costos totales de inversión y operación, costos operativos de las plantas, costos marginales de operación, balances de energía a nivel anual y mensual.<br><br>Establece beneficios marginales e intercambio de energía entre sistemas interconectados proporcionando criterios para la toma de decisiones. |

Elaboración: El Investigador. Fuente: (Connolly et al., 2010; Rivera González, 2020).

Como se muestra existen varios programas de evaluación energética, donde se busca la inclusión de parámetros de entrada que incluyen información sobre la estructura del sistema eléctrico, estadísticas de energía de un año base para calibrar un modelo en el cual se integre producción eléctrica, niveles de consumo, precios, crecimiento de la demanda de energía, y restricciones para simular escenarios.

El uso de este tipo de herramientas sirve como un modelo de previsión eléctrica y climática siendo una opción para relacionar las actividades de cada país con la matriz energética, además de la Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés) y planes ambientales para tomar decisiones resaltando de manera consistente e integrada los beneficios, costos y compensaciones entre las diferentes políticas climáticas.

Según Luis Berga, las proyecciones de la hidroelectricidad es que se siga desarrollando por las condiciones favorables mundiales, pero hay que tener cuidado con las afectaciones al ambiente, las cuales predicen una variación decreciente proyectada de las plantas en funcionamiento en un 10% en el rol de la hidroelectricidad por la variabilidad climática (Berga, 2016). Adicional por regiones y según diversos estudios:

- Para Europa se estima que el potencial hidroeléctrico disminuirá en un 6% para 2070, y un patrón de disminución del 20% al 50% para los países que están cerca al Mediterráneo (Lehner et al., 2005).
- En el sur de Asia en países como Afganistán, Bangladesh, Bután, India, Nepal y Pakistán, la energía hidroeléctrica está presente con cuencas hidrográficas saturadas, se prevé que la demanda de agua para la producción de cultivos aumente entre un 6 % y un 10 %, pero también se menciona que por cada 1 °C de aumento de la temperatura debido al cambio climático se afectará el desarrollo hidroeléctrico en una relación porcentual similar (Rasul et al., 2019).
- En África, el cambio climático crea un cambio social que muestra un impacto en la generación hidroeléctrica; estudios muestran reducción de hasta un 3% de la hidroelectricidad para 2050. Significa que el continente generaría incapacidad para adaptarse a estos cambios dando lugar a diversas amenazas sociales como, frecuentes sequías, pobreza, enfermedades, hambrunas, conflictos, entre otros. durante el curso del continente (Antwi & Sedegah, 2018; Filho et al., 2017).
- En Ecuador se estima que las hidroeléctricas sufran sensibilidad al cambio climático en el sector energético, se espera que la cantidad total de hidroelectricidad varíe significativamente entre 53% y 81% para el 2050 (Carvajal et al., 2019). Además, en un estudio de las 5 hidroeléctricas emblemáticas prevé que Coca Codo Sinclair, Manduriacu, Minas San Francisco, Toachi Pilatón, y Delsintagua que inicialmente se proyectó por 2,275 [MW] al 2025 tengan una reducción porcentual al 2050 del 19%, 12% y 8% de capacidades a los escenarios IPCC, A1, B1 y B2 respectivamente (Naranjo-Silva & Quimbita, 2022).

Bajo todo este contexto analítico, este primer acápite busca concebir como la hidroelectricidad debe planificarse mediante sistemas energéticos en base a simulaciones y sistemas de proyección anclados a los conceptos que el IPCC desarrolla de manera continua para conocer cómo se comportan los cambios inducidos. Con este análisis en plantas hidroeléctricas en actividad se pueden generar planes de mitigación y adaptación reduciendo los impactos.

## 2. Inversión multilateral eficiente con fondos verdes para proyectos sociales

| Propuesta                   | Parámetro          | Temporalidad            |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|
| Aplicación de fondos verdes | Social & Ambiental | Corto, y mediano plazo* |

Se propone la búsqueda y consecución de inversiones en el desarrollo hidroeléctrico con entidades multilaterales para capturar carbono desde empresas que buscan mitigar o cruzar su ineficiencia de emisiones, así estos fondos, fomentarán mejoras por un tiempo constante mediante instrumentos de seguridad jurídica como contratos fijos plasmados en bonos de carbono u instrumentos de compensación por el cuidado ambiental.

El fin es adoptar fondos concursables introduciendo instrumentos reguladores para estimular el desarrollo de las energías renovables e invertir en certificados verdes para sacar provecho del costo de conexión tecnológica hidroeléctrica para planes de remediación ambiental y social debido al uso de recursos naturales y ecosistemas muchas veces vírgenes.

Se recomienda buscar fondos climáticos y de promoción energética renovable para desarrollar planes de inversión no solo en el proyecto hidroeléctrico, sino, programas de apoyo en las comunidades cercanas y monitoreo del medio ambiente para mitigar afectaciones, siendo un aporte adicional de inversión y soporte a las poblaciones que raramente promocionan o solicitan el desarrollo de estos proyectos en sus cercanías.

Se puede robustecer la captación de este tipo de inversiones proyectando en cada Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés) por país las energías renovables, entre ellas la hidroeléctrica para desplegar, es así que cada país tendrá un marco de cumplimiento internacional sostenible, el cual se apega directo a las necesidades internacionales de cuidado ambiental y así entrar al mercado de carbono o compensación de contaminación.

Por consiguiente, dichos fondos adicional de apoyar la fase de construcción, y operación podrá contener planes específicos ambientales y sociales que de las necesidades en comunidades levantadas son:

- Desarrollar al menos una escuela, colegio o unidad educativa para el fomento académico de la región.
- Contar la extensión que ocupa el proyecto hidroeléctrico y plantar al menos la mitad de área, cuantificando las hectáreas para reforestar, es decir un plan de reforestación por la tala de árboles en el desarrollo de estructuras y vías en lugares aledaños donde exista la capacidad de siembra.

- Socializar los beneficios del proyecto hidroeléctrico para que la población conozca el alcance del desarrollo energético con mesas técnicas, capacitaciones, y seminarios.
- Capacitar a las comunidades sobre agricultura y emprendimiento, para el desarrollo de nuevas actividades del personal vulnerable de la zona.
- Generar mediciones de CO<sup>2</sup> en embalses en el caso de existir este tipo de construcciones para control de posibles gases contaminantes a la atmosfera.
- Desarrollar proyectos de recirculación del recurso represado en hidroeléctricas con embalses para evitar desgaste (Acápite 5 de esta Guía).
- Analizar y controlar la calidad del agua con una periodicidad mínima trimestral para efectuar correcciones en el caso de ser necesarios o acelerar los planes de mejora.

Sobre esta recomendación que busca apoyar social y ambientalmente las localizaciones donde se generan los proyectos hidroeléctricos, es importante que dentro del Ministerio de Ambiente de cada país se destine a formar técnicos que calculen la reducción de CO<sup>2</sup> equivalente por el uso de esta fuente renovable, y así se determine en el tiempo el apoyo ambiental con el fin que con esas mediciones y datos sean concursables de los diversos fondos globales que existen.

### 3. Cálculo del CO<sup>2</sup> equivalente para compensar el uso del medio ambiente

| Propuesta  | Parámetro           | Temporalidad            |
|--|---------------------|-------------------------|
| Fórmula de compensación por el desarrollo hidroeléctrico | Técnico & Ambiental | Corto, y mediano plazo* |

Al calcular la emisión de contaminantes en las centrales hidroeléctricas, se propone restar el valor de emisiones por hidroelectricidad de una fuente fósil que generalmente se convierte en energía térmica obteniendo una diferencia, este valor se traduce a una ganancia monetaria en dólares por el uso de la renovable que se propone al menos un tercio (33%) para planes de remediación ambiental, por el uso agresivo de agua sobre todo en sistemas hidroeléctricos con embalses.

Seguido el detalle en g.CO<sub>2</sub>.eq/kWh por fuente energética calculado en el Informe Especial de Energía Renovable y Mitigación del Cambio Climático (SRREN por sus siglas en inglés) desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

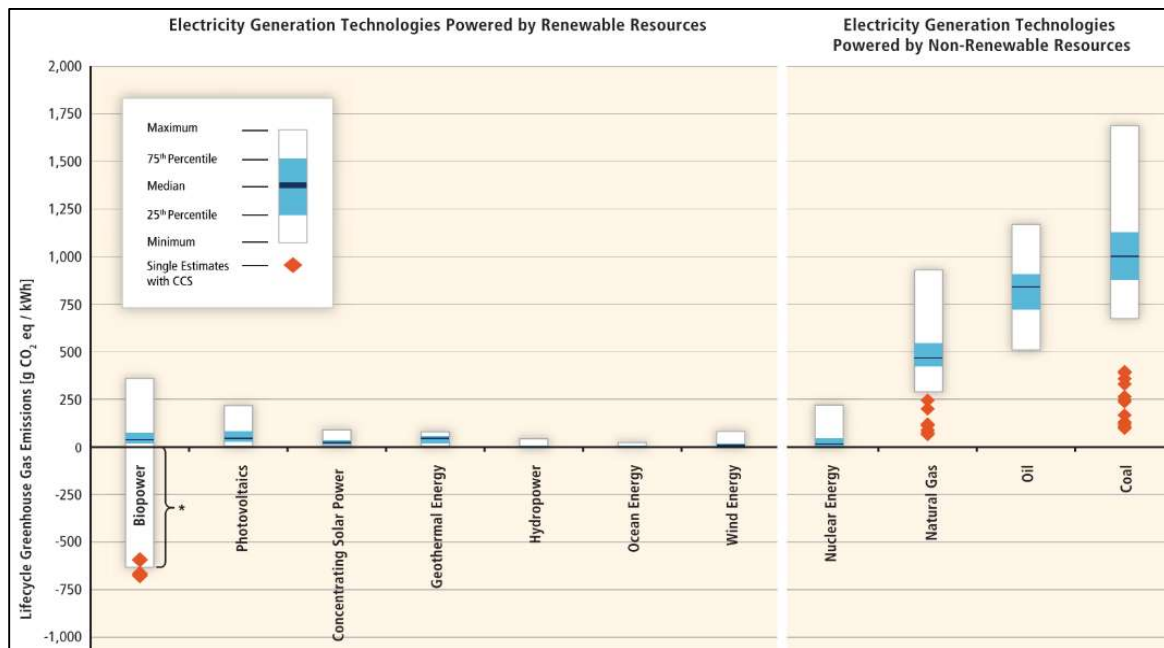


Ilustración 46. Estimación emisiones de GEI durante el ciclo de varias fuentes

Fuente: (Edenhofer et al., 2011). Pág. 31 - SREEN

Bajo la Ilustración precedente, se recomienda usar una tabla comparativa entre el desarrollo de una central hidroeléctrica y una planta térmica promedio para conocer un valor de mitigación equivalente, esta comparación hidroeléctrica se representa por:

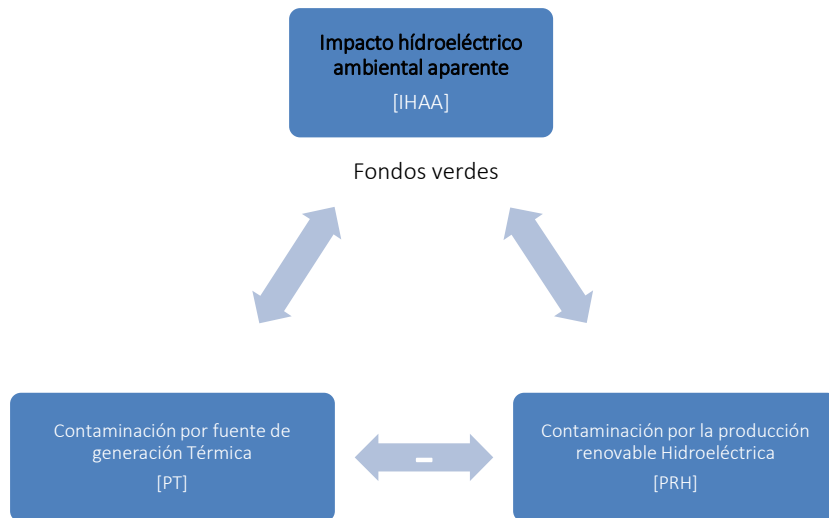


Ilustración 47. Criterios del impacto hidroeléctrico aparente

Elaboración: El Investigador

Bajo la ilustración precedente, a continuación, la fórmula proyectada la cual determine el cálculo de mitigación entre fuentes energéticas.

$$IHAA = PT - PH$$

Ecuación 10

En este contexto, y en base a las fuentes energéticas reportadas se genera una tabla comparativa de potencia de una planta de producción hidroeléctrica en dos tipos (embalse y pasada) menos una térmica de carbón y otras fuentes de referencia. Para determinar la producción energética en KWh se utilizó un factor de potencia de 0.53 como promedio encontrado en la Tabla 9 de las principales centrales hidráulicas, para las renovables eólicas y fotovoltaica de 0.33, y para las térmicas de 0.48, con estos datos se simuló a varias centrales de diversas capacidades de potencia.

Adicional para los cálculos se definió un valor comercial de 25 dólares la Tonelada de CO2 equivalente como la venta de bonos de carbono con un 80% de incertidumbre de este valor por la irregularidad del mercado, por segunda parte para inversión directa se proyecta ejecutar un del 25% al 33% del capital como límite de inversión dependiendo de la ganancia que se obtenga debido a que el mercado de carbono busca mantener la obra en si es decir la infraestructura de la planta, por lo cual, la inversión inicial se cruzaría para estos planes (American Carbon Registry, 2023).A continuación, el cálculo propuesto.

Tabla 56. Comparaciones energéticas

| Ítem | Demanda [MW] | Producción promedio [kWh] |                |                   | Planta térmica (PT) |             | Planta renovable (PR) |              | Planta hidroeléctrica (PRH) |         |
|------|--------------|---------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|---------|
|      |              |                           |                |                   | [g.CO2.equiv/kWh]   |             | [g.CO2.equiv/kWh]     |              | [g.CO2.equiv/kWh]           |         |
|      |              | Hidroeléctrica (0.53)     | Térmica (0.48) | Renovables (0.33) | Carbón              | Gas Natural | Eólica                | Fotovoltaica | Paso                        | Embalse |
| 1    | 100          | 464,280,000               | 420,480,000    | 289,080,000       | 1,000               | 450         | 25                    | 50           | 6                           | 18      |
| 2    | 500          | 2,321,400,000             | 2,102,400,000  | 1,445,400,000     | 1,000               | 450         | 25                    | 50           | 6                           | 18      |
| 3    | 1.000        | 4,642,800,000             | 4,204,800,000  | 2,890,800,000     | 1,000               | 450         | 25                    | 50           | 6                           | 18      |
| 4    | 2.000        | 9,285,600,000             | 8,409,600,000  | 5,781,600,000     | 1,000               | 450         | 25                    | 50           | 6                           | 18      |
| 5    | 3.600        | 16,714,080,000            | 15,137,280,000 | 10,406,880,000    | 1,000               | 450         | 25                    | 50           | 6                           | 18      |

| Ítem | Demanda [MW] | Producción energética [g.CO2.equiv/kWh] |                    |                 |                    |                 |                 | Potencial de Reducción Energética (IHAA) [g.CO2.equiv/kWh] |                              |
|------|--------------|---|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|--|------------------------------|
|      |              | Carbón (PTC)                            | Gas Natural (PTGn) | Eólica (PRE)    | Fotovoltaica (PRF) | Paso (PHP)      | Embalse (PHE)   | Carbón – Paso (PTC - PHP)                                  | Carbón – Embalse (PTC - PHE) |
| 1    | 100          | 420,480,000,000                         | 189,216,000,000    | 7,227,000,000   | 14,454,000,000     | 2,785,680,000   | 8,357,040,000   | 417,694,320,000  | 412,122,960,000              |
| 2    | 500          | 2,102,400,000,000                       | 946,080,000,000    | 36,135,000,000  | 72,270,000,000     | 13,928,400,000  | 41,785,200,000  | 2,088,471,600,000  | 2,060,614,800,000            |
| 3    | 1.000        | 4,204,800,000,000                       | 1,892,160,000,000  | 72,270,000,000  | 144,540,000,000    | 27,856,800,000  | 83,570,400,000  | 4,176,943,200,000  | 4,121,229,600,000            |
| 4    | 2.000        | 8,409,600,000,000                       | 3,784,320,000,000  | 144,540,000,000 | 289,080,000,000    | 55,713,600,000  | 167,140,800,000 | 8,353,886,400,000  | 8,242,459,200,000            |
| 5    | 3.600        | 15,137,280,000,000                      | 6,811,776,000,000  | 260,172,000,000 | 520,344,000,000    | 100,284,480,000 | 300,853,440,000 | 15,036,995,520,000   | 14,836,426,560,000           |

| Demanda [MW] | Ton.CO2eq.KWh (Evitadas) |            | Ganancia Bruta por Hidroeléctrica |               | Ganancia Neta Proyectada [USD] |               | Criterio |
|--------------|--------------------------|------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|----------|
|              | H. Paso                  | H. Embalse | Paso (USD)                        | Embalse (USD) | Paso (USD)                     | Embalse (USD) |          |
| 100          | 417,694                  | 412,123    | 8,876,004                         | 8,757,613     | 2,958,668                      | 2,919,204     | 33%      |
| 500          | 2,088,472                | 2,060,615  | 44,380,022                        | 43,788,065    | 14,793,341                     | 14,596,022    |          |
| 1.000        | 4,176,943                | 4,121,230  | 88,760,043                        | 87,576,129    | 22,190,011                     | 21,894,032    | 25%      |
| 3.600        | 15,036,996               | 14,836,427 | 319,536,155                       | 315,274,064   | 79,884,039                     | 78,818,516    |          |

Elaboración: El Investigador



Este cálculo de CO<sup>2</sup> equivalente se desarrolla debido a que, los impactos sociales también son preocupaciones, especialmente en proyectos hidroeléctricos que requieren la posible reubicación de comunidades y especies, problemas entre países que comparten recursos hídricos, acuerdos nacionales y demandas competitivas entre energía, agua y uso de la tierra (Choudhury & Dey Choudhury, 2020; Madani et al., 2014).

Como se expone, este valor que se evita por usar energía hídrica renovable y no fósil deberá por lo menos ser invertido en planes sociales, técnicos y ambientales del área, por lo tanto, este acápite se relaciona con el punto 2 de la inversión multilateral, y puede ser analizado y comparado para otras fuentes fósiles (diésel, gasolina, bunker, etc.). Además, estructurando desde el inicio de un proyecto esta ganancia de recuperación en generar planes por esta mitigación calculada, servirá como beneficio a las áreas cercanas.

#### 4. Cantidad de recurso hídrico para generar, y tamaño mínimo de proyectos

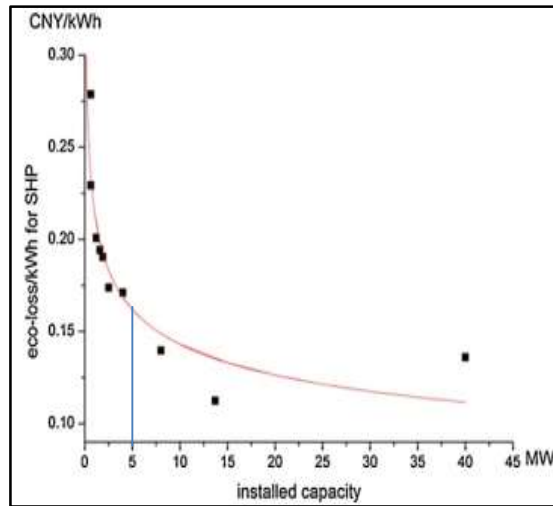
| Propuesta           | Parámetro           | Temporalidad                                |
|---------------------|---------------------|---|
| Uso máximo del agua | Técnico & Ambiental | Corto, y mediano plazo en proyectos nuevos* |

En base al análisis promedio del uso de agua y huella hídrica, se debe conocer el consumo máximo en proyectos hidroeléctricos, se promedió en el orden de 39 [m<sup>3</sup>/GJ] debido a que usar en mayor cantidad de agua para hidrogenerar causa peligro al desarrollo natural de la fauna y flora que se despliega en los ríos y lagos donde se usa el recurso hídrico como se detalla en el acápite 5.3.1.

Se recomienda usar caudales de hasta 39 [m<sup>3</sup>/GJ] en la producción hidroeléctrica para evitar la pérdida bioecológica, este cálculo deber ser ejecutado en las simulaciones de potencia teórica y márgenes de diseño de equipos, sino el sistema termina siendo ineficiente en relación de generación y alto consumo hídrico.

Adicional, en proyectos multipropósito que contienen agua para sistemas de riego y mitigar las inundaciones, la capacidad instalada debe ser mediana, y superior a los 100 [MW] debido a que represar tanta agua desarrolla floración de material solido en suspensión, sedimentos, generación de bacterias y sistemas cinobianos diferentes, haciendo que la eficiencia de la planta sea baja y con mayores afectaciones (Hartmann, 2020; Spalding-Fecher et al., 2016).

Según un modelo de ajuste hidroeléctrico de meta análisis, la capacidad instalada óptima de los proyectos hidroeléctricos debe ser superior a 5 [MW] porque se prevé que el costo de la pérdida ecológica por kWh, posterior a este rango será menor, sin embargo, al reducir la capacidad instalada de cada proyecto hidroeléctrico en menos de 5 [MW], el valor de pérdida ecológica es mayor debido a la relación de la eficiencia de planta y de las necesidades de agua, suelo, área (X. J. Li et al., 2015). Seguido un gráfico del análisis de la relación mencionada.



Fuente: (X. J. Li et al., 2015)

Como se muestra en casos que las presas sean muy pequeñas consumen más tierra, agua y requieren más volumen de almacenamiento por unidad de energía producida que las instalaciones con una capacidad superior a los 5 [MW] (Gleick, 1992). Por otra parte, en las centrales hidroeléctricas muy grandes o grandes de más de 300 [MW] no existe información de una determinada capacidad tope.

**5. No saturar los causes hídricos y ubicación estratégica de la central**

| Propuesta  | Parámetro          | Temporalidad                                |
|--|--------------------|---|
| No desarrollar varios proyectos hidroeléctricos con una misma fuente hídrica o mismo flujo en alrededor de 100 kilómetros de un cauce. | Social & Ambiental | Corto, y mediano plazo*                     |
| Lugar decisivo para evitar inversiones ineficientes  |                    | Corto, y mediano plazo en proyectos nuevos* |

Es importante no saturar la matriz energética de cada país en una sola fuente natural, por lo cual, es necesario impulsar la diversificación de fuentes renovables no tradicionales como la solar, eólica, mareomotriz, etc. (Briones Hidrovo et al., 2017).

Se recomienda eliminar la variabilidad que existe al estresar un solo recurso natural sensible, como el agua dulce, del cual depende la sociedad, agricultura, fauna y flora, por lo cual, tomar una misma corriente para varios proyectos hidroeléctricos causa efectos negativos acumulados y constantes.

A diferencia de los sistema eólicos o solares que se utiliza de manera contante sin mayor afectación al aire o sol respectivamente, el agua cambia sus características (Naranjo-Silva & Quimbita, 2022). Se verifica que en algunos causes hídricos existen varios proyectos consecutivos, por ejemplo, en plantas hidroeléctricas con embalses, luego de varios kilómetros ese flujo es ingresado en centrales de pasada o tipo canal, generando mayor desgaste y estrés hídrico a los caudales.

Según estudios hidrológicos, se necesita dejar correr el agua alrededor de 100 kilómetros de espacio fluvial

para que la fauna y flora se recupere por estancar el agua en represas, por lo cual se plantea esta recomendación (Belay et al., 2020). Por otra parte, el potencial de la energía hidroeléctrica depende de una ubicación específica y si no se selecciona correctamente causa hostilidad al entorno y contrariedad durante la etapa operativa de la planta (Koch et al., 2016).

Debido que la hidroelectricidad siempre es específica, determinada por la combinación de flujo de agua disponible y altura utilizable en cada ubicación, y para calcular el potencial de energía hidroeléctrica en un área amplia (cuenca, región, país), es necesario identificar los sitios factibles donde se encuentre una combinación adecuada de flujo (Q) y altura (H). Bridando resultados generalmente como posible generación de energía anual promedio como “*sitios factibles*” que dependerá de la tecnología, parámetros económicos, preferencias sociales y ambientales, y esto puede cambiar con el tiempo por variables como el cambio climático (Dimova et al., 2014; Killingtveit, 2019).

Una descripción general del potencial hidroeléctrico regional y mundial existente, puede basarse en datos del Atlas Mundial de la Revista Internacional de Energía Hidroeléctrica y Represas (ICOLD por sus siglas en inglés), por ejemplo, en el 2017 se calculó que Asia tiene el 50% de todo el potencial factible hidroenergético, América del Norte y del Sur alrededor del 30%, y Europa y África alrededor del 20%, sobre la consideración de que la escorrentía superficial global anual promedio estimada de 28,000 [km<sup>3</sup>], lo que arroja un potencial teórico para la generación de energía hidroeléctrica. Adicional es importante mencionar que como insumo importante para que exista un flujo constante hídrico el cual se relaciona a lluvias, y seguido directamente a la precipitación se requiere de un mínimo de 1,200 [mm] para asegurar que el proyecto gestionará un flujo que soporte las condiciones, para esto en base a estaciones hidrológicas y meteorológicas se deben establecer los mapas del lugar y así ser asertivos en la construcción de una central (Killingtveit, 2019; Peng et al., 2019).

Al respecto, para generar un proyecto con menor afectación ambiental, social y cultural, se recomienda efectuar la construcción de centrales hidroeléctricas en lugares con un flujo hídrico natural constante y alto, es decir, un caudal representativo donde no se requiera generar caídas adicionales de altura o tuberías de conexión para aumentar la potencia de las turbinas evitando infraestructuras ineficientes, agresivas con el ambiente, fomentando la hidroelectricidad tipo pasada o conducción de canal eliminando la construcción de embalses que modifican las condiciones del agua al represar el recurso.

Complementando es recomendable desarrollar proyectos hidroeléctricos sin embalses, porque es el lugar donde mayormente se cambian las características del recurso hídrico produciendo afectaciones físicas, químicas y biológicas dependiendo del tiempo de permanencia del agua, así como las temperaturas del lugar (Hartmann, 2020).

## 6. Circular el agua en embalses y asegurar la calidad del recurso

| Propuesta  | Parámetro | Temporalidad |
|--|-----------|--------------|
| Calidad del agua en represas con sistemas de circulación | Ambiental | Corto plazo* |

Para proyectos hidroeléctricos con represas de acumulación de agua en funcionamiento, la calidad del agua en reservorios mejora con la incorporación de opciones operativas con equipos mecánicos de circulación de agua. Se propone instalar bombas de recirculación del agua en la barrera de contención de los embalses para mejorar la oxigenación hídrica evitando desgaste molecular hídrico, muerte de especies, formación de algas, sedimentos, limos u organismos ajenos a ese sistema.

Esta opción propone la implementación de tuberías en el fondo del embalse que emitan oxígeno, un concepto simple a manera de oxigenador de una pecera, se instalará en los dos últimos kilómetros del embalse tuberías las cuales por medio de un compresor inyecte oxígeno al lecho hídrico para circular el agua como se indica a continuación.

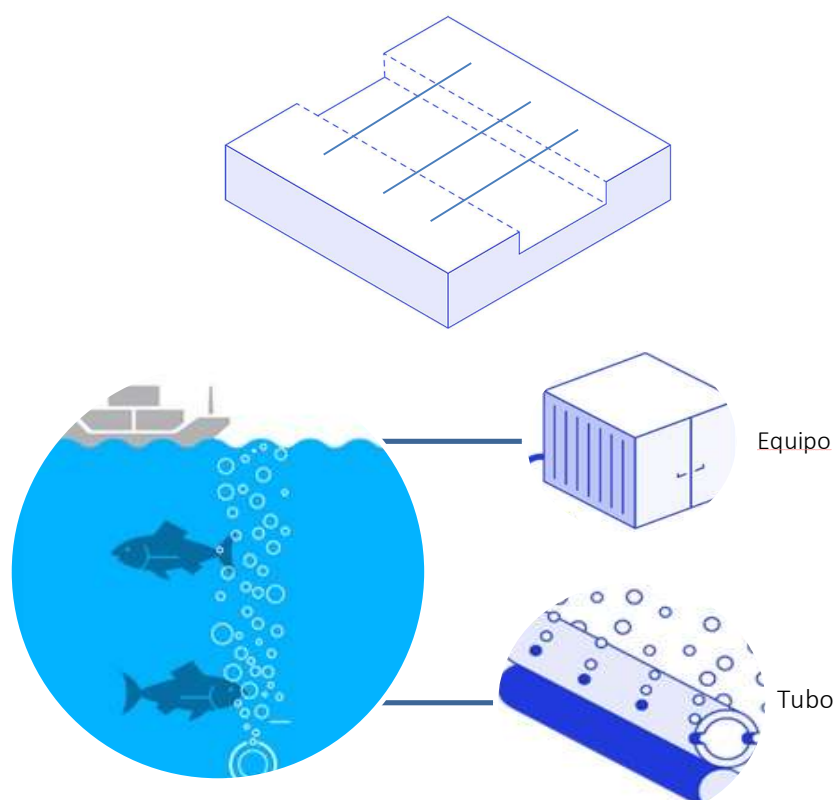


Ilustración 48. Oxigenación agua (Sistema de recuperación características hídricas)

Elaboración: El Investigador. Fuente: (The Great Bubble Barrier, 2023)

El lugar adecuado para instalar estas bombas en la central hidroeléctrica, es de 500 metros, 1 kilómetro y 2 kilómetros antes de la barrera de concreto o presa, las bombas circulan cuando el agua está contenida y se apagan cuando el flujo es abierto en la presa.

Actualmente en Holanda se usan estos sistemas para circular el agua en ríos para llevar a la superficie sólidos como plásticos a modo limpieza, sin embargo, se comprobó que también sirve para oxigenar el recurso hídrico lo cual servirá en sistemas de estacionamiento de agua como las represas hidroeléctricas.

La ubicación y el flujo de aire necesario de la cortina de burbujas se adaptan de acuerdo con la dinámica del flujo del río o vía fluvial, pero se recomienda que sean tres tuberías que cubran todo el ancho del río previo al embalse, la manguera de burbujas está hecha de plástico para su aplicación en una amplia gama de ubicaciones. Además, el suministro de aire se basa en una cortina de aire ambiente comprimido con compresores eléctricos adaptados a un funcionamiento continuo y a las características específicas de cualquier ubicación para combinarse con la infraestructura energética local.

Bajo esta mejora el monitoreo de agua debe ser periódico y así se evitará complicadas maniobras como por ejemplo la limpieza de sedimentos.

## 7. Manejo de descarga

| Propuesta  | Parámetro | Temporalidad |
|--|-----------|--------------|
| Descarga del agua contenida en la represa a una velocidad reducida | Ambiental | Corto plazo* |

En los proyectos hidroeléctricos multipropósito, se comprobó que la descarga hídrica contenida en embalses de manera rápida, que es desfogada por las diversas maniobras genera modificaciones en los ecosistemas por acciones de manera agresiva, sin sincronización produciendo cambios biológicos. Es importante abrir de manera lenta y a velocidad constante la descarga del agua de las represas o proyectos multipropósitos en las diversas maniobras para evitar modificaciones de los ecosistemas que se anclan a los embalses aguas abajo, debido a que, al abrir las compuertas de los embalses como medida de control de inundaciones, se verificó que se perturba los ecosistemas, eliminando los medios acuáticos y movilizandando la vida silvestre (Ekandjo et al., 2018).

Este acápite busca mantener la apertura de la válvula de descarga con una proyección ecológica, debido a que en cada sitio se registra parámetros físicos del afluente y medio circundante, y desde el punto de vista del aprovechamiento del potencial de los recursos hídricos es materialmente imposible desarrollar proyectos, sin perturbar o alterar el lugar donde se ubican las estructuras hidráulicas. El funcionamiento ecológico de los ríos es regulado principalmente por los siguientes factores: caudal, condiciones climáticas y los nutrientes, entre otros.

Al respecto, se recomienda la apertura de las válvulas y compuertas con un caudal aproximado de **60 - 80** [m<sup>3</sup>/s] verificando con anticipación el tiempo para desfogar el agua contenida, evitando una operación demasiado acelerada. Adicional conocer esta velocidad permitirá al ejecutar operaciones de limpieza de los embalses en sedimentos donde se requieren proyectar el desalojo y llenado hídrico.

Adicional para robustecer esta sugerencia, también se debe conocer el entorno donde está la presa, y los peces son frecuentemente utilizados como bioindicadores para establecer los requerimientos de caudal ecológico mínimo en los ríos, ya que corresponden al componente ubicado en la parte más alta de las redes acuícolas.

## **5.6. Relación de resultados, objetivos planteados y actividades**

Es relevante mencionar el contexto conflictivo entre la sostenibilidad del recurso hídrico y progreso económico, lo cual, sitúa ilustrar la verdadera ventaja de generar proyectos hidroeléctricos sobre todo a gran escala, donde el carácter político influye sobre los impactos socio ambientales con análisis no solo de factibilidad, ni rentabilidad, sino de conciencia sostenible de los recursos, es decir, es inviable garantizar el desarrollo socio ambiental de un proyecto hidroenergético, sino se concatena con la sostenibilidad, debido a las varias desventajas que se levantaron con las encuestas poblacionales cercanas a la central Coca Codo Sinclair en Ecuador e información científica analizada en el Estado del Arte del Capítulo II, y Capítulo V de Análisis y Discusión.

Con estos antecedentes, bajo la premisa de *“Analizar la producción hidroeléctrica global bajo un enfoque de sostenibilidad”* como objetivo principal, a continuación, se relacionan los objetivos específicos propuestos, hipótesis planteadas, hallazgos, comparaciones, y proyecciones de la investigación, bajo la relación de variables.

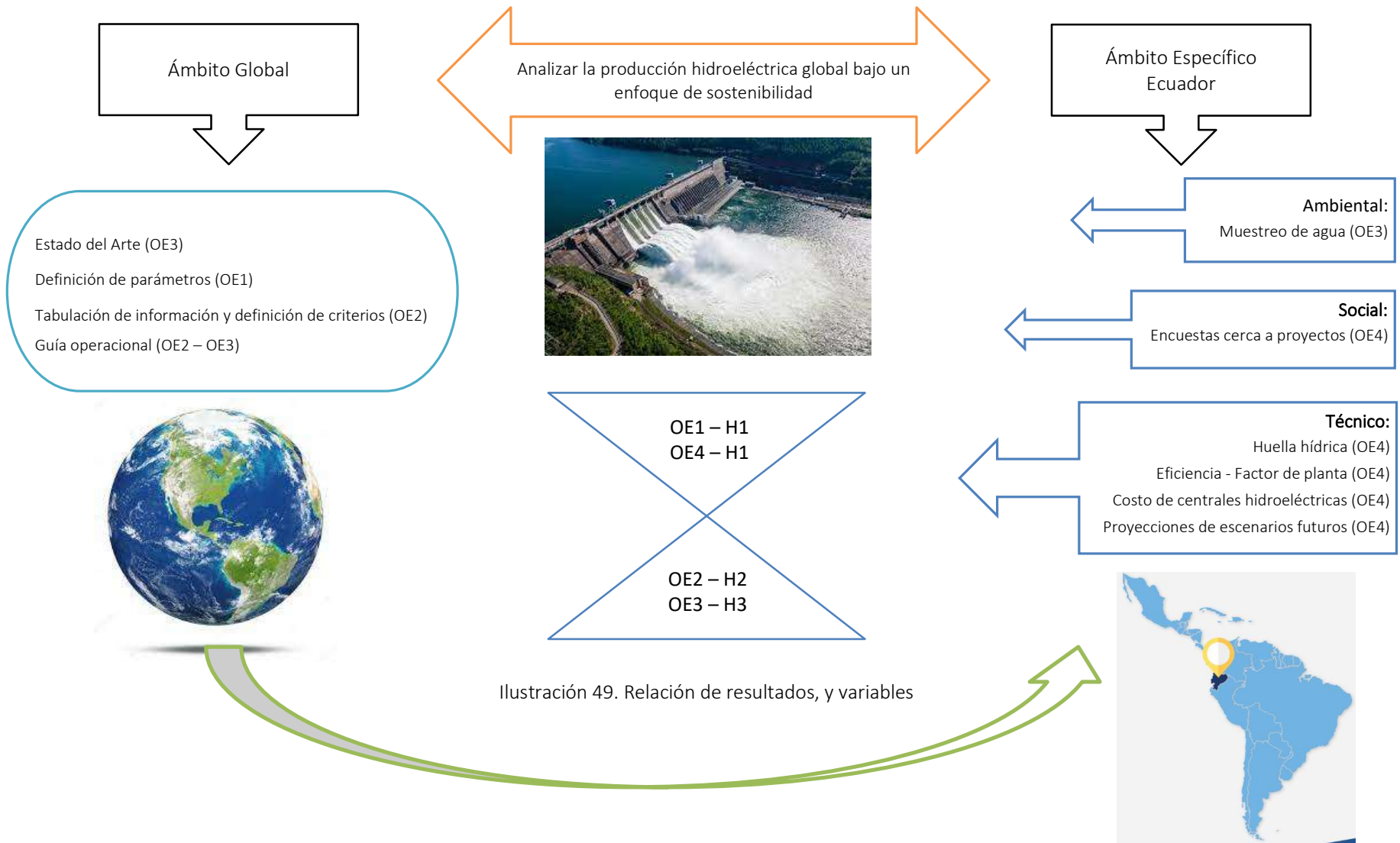


Ilustración 49. Relación de resultados, y variables

## Capítulo VI

### 6. Conclusiones y recomendaciones

#### 6.1 Conclusiones

Se analizó la producción de la energía hidroeléctrica la cual se presenta como una tecnología renovable que brinda beneficios como suministro de agua a comunidades, control de inundaciones, reducción de los gases de efecto invernadero y energía “limpia” como una opción disponible de energía baja en carbono, sin embargo, existen algunos problemas emergentes debido a su explotación desordenada, e infraestructuras a gran escala con represas que producen cambios en su entorno, lo que determina que esta fuente no sea completamente sostenible (OBG).

Existen varios parámetros que impactan a la hidroelectricidad que se levantaron, a manera social se verificó los cambios de costumbres y movimientos de personas de los lugares de origen; a manera ambiental existen parámetros como modificación de la calidad del agua, muerte de la vida silvestre aledaña, reducción de la cantidad de peces de ríos, erosión, y cambios estacionales; y entre los parámetros técnicos sensibles se verificó que el uso del agua necesario para generar, tipo de construcción, y variaciones hídricas que reducen la eficiencia de las centrales son parte del análisis (OBE1).

Se estableció un instrumento de evaluación como investigación para la toma de decisiones determinado en una Guía Operacional para el desarrollo hidroeléctrico, herramienta que propone lineamientos, recomendaciones y acciones para desplegar la hidroelectricidad futura y actual en base a criterios de sostenibilidad, buscando la mitigación de efectos sociales, culturales, técnicos y ambientales que se desenvuelven al usar el medio ambiente, y, específicamente el recurso hídrico (OBE2).

La situación y necesidades de cada país en relación al abastecimiento hídrico de su sociedad debe ser tratada con la importancia debida, y posterior proyectar la diversificación energética incorporando fuentes sostenibles diseñando políticas públicas de corto, mediano y largo plazo (1 – 5 años, 6 -19 años, 20 años o más), la cual fomente el uso de fuentes renovables no convencionales como la solar, eólica y mareomotriz que tienen baja capacidad de implementación a nivel global (OBE3).

Los proyectos hidroeléctricos con embalses estancan el agua aumentando el desarrollo de sólidos, comprobándose que la expansión de las infraestructuras extensivas como presas, genera la presencia de materia en suspensión, frente al agua de salida en la descarga, estos materiales son arcilla, limo, materia orgánica, sedimentos, descomposición vegetal y cuerpos vivos como algas, caracoles y plantas flotantes



que producen opacidad, como razón de la diferencia de color en el agua de entrada y salida de los sistemas de generación de las hidroeléctricas (OBE3).

La hidroelectricidad contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático a relación de la producción energética mediante fuentes fósiles, pero varía la disponibilidad de los recursos hídricos lo que cambia ecosistemas y requiere una cuidadosa atención porque aumenta los costos no visibles, muchas veces intangibles como los parámetros ambientales, sociales, y técnicos que se producen (OBE3).

Para el caso de Ecuador según los datos de la extrapolación y planificación energética la hidroeléctrica está perdiendo eficiencia, y paulatinamente el flujo hídrico se modifica por las variaciones climática lo cual acentúa los impactos del cambio climático, de los datos históricos existe un 19% de reducción de los últimos 20 años para los proyectos hidroeléctricos en marcha. Además de cinco proyectos emblemáticos para el Ecuador que se propone en 2,275 MW al 2025, se determinó que existirán reducciones porcentuales importantes al 2050 del 19%, 12% y 8% de las capacidades a los escenarios A1, B1 y B2 determinados del IPCC respectivamente (OBE4).

Es concluyente que existen impactos enmascarados por cada mega watt que se produce con hidroelectricidad, y que su estructura de generación no es altamente limpia, debido a la gran cantidad de recurso hídrico por cada kWh (OBE3).

## **6.2 Recomendaciones**

Se recomienda que previamente a invertir en nuevos proyectos hidroeléctricos, se determine un enfoque cuantitativo de generación combinando modelos e información de hidrología, meteorología, eficiencia energética y escenarios de cambio climático para conocer las mejores redes energéticas diversificando las fuentes para cada país, por lo cual es necesario desarrollar estudios energéticos proyectados que consideren las variaciones climáticas que afectan la hidroelectricidad.

Existen varios efectos negativos por el despliegue hidroeléctrico desde su construcción hasta operación, a nivel constructivo, las represas hidroeléctricas son una de las mayores infraestructuras energéticas en el mundo y existe una enorme necesidad de construir más represa, por lo tanto, se recomienda un marco político robusto con preocupaciones de justicia social, protección ambiental, rehabilitación de ecosistemas, transparencia constructiva y responsabilidad comunitaria previa a ejecutar este tipo de planificación energética.

Con el fin de ser efectivos en las inversiones, se debe desarrollar estudios de manera comparativa y proyectada en relación a la producción hidroeléctrica con un escenario hidrológico promedio bajo, el cual permita ajustar la potencia sin haber desarrollado una gran infraestructura ineficiente.

Es importante la planificación energética que incorpore modelaciones climáticas en el desarrollo de la hidroelectricidad con el fin que los formuladores de políticas, ingenieros y constructores adopten metodologías o protocolos para priorizar la ubicación de las centrales hidroeléctricas de manera sostenible sin desarrollar amplias construcciones de generación energética variable futura en las diferentes partes del mundo.

Se recomienda que los formuladores de proyectos, así como países con alto potencial hidroeléctrico consideren las nociones de este documento y la Guía Operacional planteada, así como del protocolo de hidroelectricidad para conocer sobre los efectos de esta renovable, trabajar en aspectos de mitigación y mejorar los efectos de futuros proyectos.

### **6.3 Próximos trabajos y líneas de investigación**

- La producción hidroeléctrica tiene importancia por el aspecto renovable, pero, las políticas limitadas, disputas dentro de gobiernos y falta de cooperación internacional genera un déficit analítico adecuado previo a una inversión en proyectos hidroenergéticos sostenibles, razón por la que, es un área que requiere de mayor análisis para delinear el desarrollo sostenible con ámbitos multidisciplinarios de exhaustiva reflexión que contengan análisis estacionales, cambio climático, hidrología entre otros.
- Direcciones futuras pueden incluir la creación de un mapa que identifique las cuencas hidrográficas sobre utilizadas para desarrollar proyectos hidroeléctricos resilientes en áreas con el impacto ecológico más bajo debido a la posibilidad de daños externos.

## Referencias bibliográficas

A continuación, las referencias utilizadas en esta tesis de doctorado, las cuales son en base a la tipología de la Asociación Americana de Psicología (APA) 7ª edición:

- Abera, F. F., Asfaw, D. H., Engida, A. N., & Melesse, A. M. (2018). Optimal operation of hydropower reservoirs under climate change: The case of Tekeze reservoir, Eastern Nile. *Water (Switzerland)*, 10(3), 18. <https://doi.org/10.3390/w10030273>
- Adger, W. N., Huq, S., Brown, K., Declan, C., & Mike, H. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies*, 3(3), 179–195. <https://doi.org/10.1191/1464993403ps060oa>
- Aguilar-Barojas, S. (2005). Formulas for the calculation of the sample in health research. *Salud En Tabasco*, 11(Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud), 333–338.
- Aguilera-Klink, F., & Alcántara, V. (1994). De la economía ambiental a la economía ecológica. In ICARIA-Ecosocial (Ed.), *Centro de Investigación de la Paz-ECOSOCIAL*. Comte d'Urgell, 53.
- Ahmad, S., & Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63, 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.001>
- Alarcon, A. (2019). *The hydroelectric plants in Latin America, where are we? and where are we going?*
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., & Siebert, S. (2003). Development and testing of the Water GAP 2 global model of water use and availability. In *Hydrological Sciences Journal* (Vol. 48, Issue 3, pp. 317–337). <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.317.45290>
- Ali, S. A., Aadhar, S., Shah, H. L., & Mishra, V. (2018). Projected Increase in Hydropower Production in India under Climate Change. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30489-4>
- Ali, S., Li, D., Congbin, F., & Khan, F. (2015). Twenty-first century climatic and hydrological changes over Upper Indus Basin of Himalayan region of Pakistan. *Environmental Research Letters*, 10(1), 14007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014007>
- Alvarez-Chiriboga, D. A. (2020). *Prediction model of the energy production of the Coca Codo Sinclair Hydroelectric Plant, based on computational learning techniques* (Issue 9). Army Forces University of Ecuador.
- América Latina en movimiento. (2011). *El impacto de las represas hidroeléctricas sobre los derechos de los pueblos indígenas y los derechos de la Madre Tierra*. <https://www.alainet.org/es/active/47848>
- American Carbon Registry. (2023, April 4). *Regulated and voluntary carbon markets*. <https://americancarbonregistry.org/carbon-accounting/standards-methodologies>
- Andreotti, J. I. (2014). *Central hidroeléctrica Salto Grande*. [https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2014\\_11\\_30\\_archive.html?m=0](https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2014_11_30_archive.html?m=0)
- Antwi, M., & Sedegah, D. D. (2018). Climate Change and Societal Change—Impact on Hydropower Energy Generation. In *Sustainable Hydropower in West Africa* (pp. 63–73). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813016-2.00005-8>
- 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(December 2018), 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.057>
- Ardizzon, G., Cavazzini, G., & Pavesi, G. (2014). A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 746–761. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.043>
- Arganis Juarez, M. L., Mendoza Ramirez, R., Dominguez Mora, R., & Carrizosa Elizondo, E. (2015). Políticas de operación de la presa «El Infiernillo» para generación de hidroelectricidad con programación dinámica estocástica. *Ribagua*, 2(2), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.10.003>
- Aroonrat, K., & Wongwiset, S. (2015). Current status and potential of hydro energy in Thailand: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.010>
- Badii, M. H., Castillo, J., & Guillen, A. (2008). Optimum Sample Size. *Innovaciones de Negocios*, 5(1), 53–65. [http://www.web.facpya.uanl.mx/rev\\_in/Revistas/5.1/A5.pdf](http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/5.1/A5.pdf)
- Bakken, T. H., Killingtveit, Å., & Alfredsen, K. (2017). The Water Footprint of Hydropower Production-State of the Art and Methodological Challenges. *Global Challenges*, 1(5), 1600018. <https://doi.org/10.1002/gch2.201600018>
- Bakken, T. H., Killingtveit, A., Engeland, K., Alfredsen, K., & Harby, A. (2013). *Water consumption from hydropower plants – review of published estimates and an assessment of the concept*. 3983–4000. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3983-2013>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2018). *Energía sostenible, confiable y diversificada para América Latina y el Caribe*. <http://www.iadb.org/es/sectores/energy/overview,18338.html>
- Barton, D. N., Sundt, H., Bustos, A. A., Fjeldstad, H. P., Hedger, R., Forseth, T., Berit Köhler, Aas, O., Alfredsen, K., & Madsen, A. L. (2020). Multi-criteria decision analysis in Bayesian networks - Diagnosing ecosystem service trade-offs in a hydropower regulated river. *Environmental Modelling and Software*, 124(December 2018), 12. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104604>
- Belay, A. K., Atenafu, D., Birhan, S., & Tegengn. T. (2020). Techno-economic Feasibility Study of the Gunde Teklehaymanote Micro-hydropower Plant at Tindwat River, Central Gondar, Ethiopia. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 11(2). <https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.02.06>
- Berga, L. (2016). The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review. *Engineering*, 2(3), 313–318. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.004>
- BID. Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente. (2019). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos*.
- Bildirici, M. (2016). The Relationship between Hydropower Energy Consumption and Economic Growth. *Procedia Economics and Finance*, 38(October 2015), 264–270. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(16\)30198-8](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(16)30198-8)
- Bilgili, M., Bilirgen, H., Ozbek, A., Ekinci, F., & Demirdelen, T. (2018). The role of hydropower installations for sustainable energy development in Turkey and the world. *Renewable Energy*, 126, 755–764. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.089>
- Boehlert, B., Strzepek, K. M., Gebretsadik, Y., Swanson, R., McCluskey, A., Neumann, J. E., McFarland, J., & Martinich, J. (2016). Climate change impacts and greenhouse gas mitigation effects on U.S. hydropower generation. *Applied Energy*, 183, 1511–1519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.054>

- Bondarenko, V. L., Kortunov, A. K., Semenova, E. A., & Khetsuriani, E. D. (2019). Assessment of the Prospect of Using the Hydropower Potential in the Operating Water-Supply and Irrigation Systems of Savropol Krai (Russia). *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934160>
- Bongio, M., Avanzi, F., & de Michele, C. (2016). Hydroelectric power generation in an Alpine basin: Future water-energy scenarios in a run-of-the-river plant. *Advances in Water Resources*, *94*, 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.017>
- Botelho, A., Ferreira, P., Lima, F., Pinto, L. M. C., & Sousa, S. (2017). Assessment of the environmental impacts associated with hydropower. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*(May 2015), 896–904. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.271>
- Briones Hidrovo, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2017). Accounting for GHG net reservoir emissions of hydropower in Ecuador. *Renewable Energy*, *112*, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.047>
- Briones Hidrovo, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2019). Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, *233*, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.068>
- Briones Hidrovo, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2020). Determining the net environmental performance of hydropower: A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment. *Science of the Total Environment*, *712*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136369>
- Cabrera, S., Eurie Forio, M. A., Lock, K., Vandenbroucke, M., Oña, T., Gualoto, M., Goethals, P. L. M., & der Heyden, C. van. (2021). Variations in benthic macroinvertebrate communities and biological quality in the aguarico and coca river basins in the ecuadorian amazon. *Water (Switzerland)*, *13*(12), 1–26. <https://doi.org/10.3390/w13121692>
- Calderón, S., Alvarez, A. C., Loboguerrero, A. M., Arango, S., Calvin, K., Kober, T., Daenzer, K., & Fisher-Vanden, K. (2014). Achieving CO<sub>2</sub> reductions in Colombia: Effects of carbon taxes and abatement targets. *Energy Economics*, *56*, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.010>
- Cárdenas, M., Filonzi, A., & Delgadillo, R. (2021). Finite element and experimental validation of sample size correction factors for indentation on asphalt bitumens with cylindrical geometry. *Construction and Building Materials*, *274*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122055>
- Carvajal, P. E., Anandarajah, G., Mulugetta, Y., & Dessens, O. (2017). Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador. *Climatic Change*, *144*(4), 611–624. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2055-4>
- Carvajal, P. E., & Li, F. G. N. (2019). Challenges for hydropower-based national determined contributions: a case study for Ecuador. *Climate Policy*, *19*(8), 974–987. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1617667>
- Carvajal, P. E., Li, F. G. N., Soria, R., Cronin, J., Anandarajah, G., & Mulugetta, Y. (2019). Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty: Modelling power sector pathways for Ecuador. *Energy Strategy Reviews*, *23*(January), 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.008>
- Cavazzini, G., Santolin, A., Pavesi, G., & Ardizzon, G. (2016). Accurate estimation model for small and micro hydropower plants costs in hybrid energy systems modelling. *Energy*, *103*, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.024>

- 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*. [https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/722-celec-ep-genera-y-transmite-mas-del-90-por-ciento-de-la-energia-electrica-limpia-que-consume-el-pais-y-exporta-a-los-paises-vecinos#:~:text=En este sentido%2C de la,a través de cen](https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/722-celec-ep-genera-y-transmite-mas-del-90-por-ciento-de-la-energia-electrica-limpia-que-consume-el-pais-y-exporta-a-los-paises-vecinos#:~:text=En%20este%20sentido%20de%20la,a%20trav%C3%A9s%20de%20cen)
- Celik, A. O., Kiricci, V., & Insel, C. (2017). Reassessment of the flood damage at a river diversion hydropower plant site: lessons learned from a case study. *Natural Hazards*, *86*(2), 833–847. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2719-9>
- Chiang, J. L., Yang, H. C., Chen, Y. R., & Lee, M. H. (2013). Potential impact of climate change on hydropower generation in southern Taiwan. *Energy Procedia*, *40*, 34–37. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.005>
- Chilkoti, V., Boliseti, T., & Balachandar, R. (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, *109*, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>
- Choudhury, N. B., & Dey Choudhury, S. R. (2020). Implications for planning of hydroelectric projects in Northeast India: an analysis of the impacts of the Tipaimukh project. *GeoJournal*, *8*(Wcd 2000), 21. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10158-8>
- Ciscar, J. C., & Dowling, P. (2014). Integrated assessment of climate impacts and adaptation in the energy sector. *Energy Economics*, *46*, 531–538. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.07.003>
- Coelho, C. D., da Silva, D. D., Sediya, G. C., Moreira, M. C., Pereira, S. B., & Lana, Â. M. Q. (2017). Comparison of the water footprint of two hydropower plants in the Tocantins River Basin of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *153*, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.088>
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. v., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, *87*(4), 1059–1082. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- Crónicas del despojo. (2013, April). *Los efectos negativos de la energía hidroeléctrica*. 15.
- Dadu, V., Dadu, A., Frunza, D., Catarig, G., Popa, F., & Popa, B. (2017). Innovative Concepts Applied to Recent Small Hydropower Plants. *Energy Procedia*, *112*(October 2016), 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1106>
- Daniel, K., & Gaviria, M. (2018). Impactos sociales y el tamaño óptimo de los megaproyectos hidroeléctricos. In *Universidad nacional de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- De Faria, F. A. M., Davis, A., Severnini, E., & Jaramillo, P. (2017). The local socio-economic impacts of large hydropower plant development in a developing country. *Energy Economics*, *67*, 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.08.025>
- De Faria, F. A. M., & Jaramillo, P. (2017). The future of power generation in Brazil: An analysis of alternatives to Amazonian hydropower development. *Energy for Sustainable Development*, *41*, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.001>
- De Queiroz, A. R., Faria, V. A. D., Lima, L. M. M., & Lima, J. W. M. (2019). Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. *Renewable Energy*, *133*, 873–882. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>

- Denisov, S. E., & Denisova, M. V. (2017). Analysis of Hydropower Potential and the Prospects of Developing Hydropower Engineering in South Ural of the Russian Federation. *Procedia Engineering*, 206, 881–885. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.567>
- Detz, R. J., & Van Der Zwaan, B. (2019). Transitioning towards negative CO2 emissions. *Energy Policy*, 133, 110938. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110938>
- Díaz, P., Adler, C., & Patt, A. (2017). Do stakeholders' perspectives on renewable energy infrastructure pose a risk to energy policy implementation? A case of a hydropower plant in Switzerland. *Energy Policy*, 108(April), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.033>
- Dimova, G., Tzanov, E., Ninov, P., Ribarova, I., & Kossida, M. (2014). Complementary use of the WEAP model to underpin the development of SEEA physical water use and supply tables. *Procedia Engineering*, 70, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.062>
- Dorber, M., Arvesen, A., Gernaat, D., & Verones, F. (2020). Controlling biodiversity impacts of future global hydropower reservoirs by strategic site selection. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78444-6>
- Dorber, M., Mattson, K. R., Sandlund, O. T., May, R., & Verones, F. (2019). Quantifying net water consumption of Norwegian hydropower reservoirs and related aquatic biodiversity impacts in Life Cycle Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 76(7491), 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.12.002>
- Edenhofer, O., Madruga, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., & Von Stechow, C. (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. In *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153>
- Ekanjo, M. N., Makurira, H., Mwelwa, E., & Gumindoga, W. (2018). Impacts of hydropower dam operations in the Mana Pools National Park floodplains. *Physics and Chemistry of the Earth*, 106(May), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.009>
- Eloranta, A. P., Finstad, A. G., Helland, I. P., Ugedal, O., & Power, M. (2018). Hydropower impacts on reservoir fish populations are modified by environmental variation. *Science of the Total Environment*, 618, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.268>
- EPE. (2017). *Statistics of the Energy Market*. <https://www.epe.gov.br/en/areas-of-expertise/statistics/statistics-of-the-energy-market>
- Escribano, G. (2013). Ecuador's energy policy mix: Development versus conservation and nationalism with Chinese loans. *Energy Policy*, 57, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.022>
- Fan, J. L., Hu, J. W., Zhang, X., Kong, L. S., Li, F., & Mi, Z. (2020). Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.01.002>
- Filho, G. L. T., Silva dos Santos, I. F., & Barros, R. M. (2017). Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(March), 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.134>
- GAD El Chaco. (2021). *Population figures of the Decentralized Autonomous Government*. <https://gadmunicipalelchaco.gob.ec/Canton.php>

- GAD Gonzalo Pizarro. (2021). *Population figures of the Decentralized Autonomous Government*. <https://gonzalopizarro.gob.ec/canton/>
- Gattás, F., De Stefano, L. G., Vinocur, A., Bordet, F., Espinosa, M. S., Pizarro, H., & Cataldo, D. (2018). Impact of interaction between *Limnoperna fortunei* and Roundup Max on freshwater phytoplankton: An in situ approach in Salto Grande reservoir (Argentina). *Chemosphere*, 209, 748–757. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.129>
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & van der Meer, T. (2009). The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, 68(4), 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.07.013>
- Ghumman, A. R., Haider, H., Yousuf, I., & Shafiqzaman, M. (2020). Sustainable Development of Small-Sized Hydropower Plants: Multilevel Decision-Making from Site Selection to Optimal Design. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 4141–4159. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04407-8>
- Gleick, P. H. (1992). Environmental consequences of hydroelectric development: The role of facility size and type. *Energy*, 17(8), 735–747. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90116-H](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90116-H)
- Gnatyshyna, L., Khoma, V., Mishchuk, O., Martinyuk, V., Sprinže, G., & Stoliar, O. (2020). Multi-marker study of the responses of the *Unio tumidus* from the areas of small and micro hydropower plants at the Dniester River Basin, Ukraine. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 11038–11049. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07698-4>
- Greenteach. (2020). *Energía hidráulica y energía hidroeléctrica*. <https://www.greenteach.es/energia-hidraulica-hidroelectrica/>
- Guerra, O. J., Tejada, D. A., & Reklaitis, G. V. (2019). Climate change impacts and adaptation strategies for a hydro-dominated power system via stochastic optimization. *Applied Energy*, 233–234(September 2018), 584–598. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.045>
- Guilcatoma-Aimacaña, V. (2010). *Inventory of native vegetable species of Cerro Teligote cantón Pelileo, province of Tungurahua from 3 200 to 3 420 m.s.n.m.* (Vol. 9, Issue 1). Technical University of Ambato.
- Guterres, A. (2021). *Analysis of climate change and sustainability according to the Secretary of the United Nations Organization*. 18. <https://press.un.org/en/2022/sgsm21228.doc.htm>
- Hamududu, B., & Killingtveit, A. (2012). Assessing climate change impacts on global hydropower. *Energies*, 5(2), 305–322. <https://doi.org/10.3390/en5020305>
- Hanna, P., Vanclay, F., Langdon, E. J., & Arts, J. (2016). The importance of cultural aspects in impact assessment and project development: reflections from a case study of a hydroelectric dam in Brazil. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 34(4), 306–318. <https://doi.org/10.1080/14615517.2016.1184501>
- Hartmann, J. (2020). *Climate Change and Hydropower Training Manual*. AICCA Project, Ministry of the Environment and Water of Ecuador - CONDESAN (p. 1012). <https://condesan.org/recursos/manual-entrenamiento-cambio-climatico-e-hidroenergia/>
- Hasan, M. M., & Wyseure, G. (2018). Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador. *Water Science and Engineering*, 11(2), 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.07.002>



- Hofstra, N., Kroeze, C., Flörke, M., & van Vliet, M. T. (2019). Editorial overview: Water quality: A new challenge for global scale model development and application. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, A1–A5. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.01.001>
- Holzmann, H., Lehmann, T., Formayer, H., & Haas, P. (2010). Effects of possible climate changes on floods and water balance components of selected catchment areas in Austria. *Osterreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft*, 62(1), 7–14. <https://doi.org/10.1007/s00506-009-0154-9>
- Hussain, A., Sarangi, G. K., Pandit, A., Ishaq, S., Mamnun, N., Ahmad, B., & Jamil, M. K. (2019). Hydropower development in the Hindu Kush Himalayan region: Issues, policies and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(February), 446–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.010>
- IHA. (2019). *Blue Planet Prize*.
- IHA. (2020). Hydropower Status Report 2020. *International Hydropower Association*, 1–83.
- INEC. (2010a). *Napo Provincial Fascicle. Population Structure*. <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/napo.pdf>
- INEC. (2010b). *Sucumbios Provincial Fascicle. Population Structure*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/sucumbios.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2009). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In *International Encyclopedia of Human Geography*. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00250-9>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *IPCC AR6 Working Group II Report*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- International Commission on Large Dams. (2021, April 1). *General Synthesis of World register of dams*. [https://www.icold-cigb.org/article/GB/world\\_register/general\\_synthesis/general-synthesis](https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/general-synthesis)
- International Energy Agency. (2010). *Comparative study on rural electrification policies in emerging economies: Keys to successful policies* (Vol. 48, Issue 2).
- International Energy Agency. (2020). *Renewables, analysis and forecast to 2025*. 74(9), 56–57. <https://doi.org/10.1002/peng.20026>
- International Hydropower Association. (2018a). *Hydropower Sustainability Assessment Protocol* (Vol. 56, Issue 3). <https://doi.org/10.1111/fcre.12351>
- International Hydropower Association. (2018b). *Hydropower Sustainability Guidelines on Good International Industry Practice*. International Hydropower Association. <https://www.hydropower.org/publications/hydropower-sustainability-guidelines>
- International Hydropower Association. (2019). Hydropower Status Report 2019: Sector trends and insights. In *Hydropower Status Report*. [https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019\\_hydropower\\_status\\_report\\_0.pdf](https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf)
- International Hydropower Association. (2020). *Hydropower Status Report 2020: Sector trends and insights*. [https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019\\_hydropower\\_status\\_report\\_0.pdf](https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf)
- International Hydropower Association. (2021). *Hydropower Status Report 2021: Sector trends and insights*. <https://www.hydropower.org/publications/2021-hydropower-status-report>

- International Hydropower Association. (2022). *Hydropower Status Report 2022: Sector trends and insights*.
- International Renewable Energy Agency. (2020a). *Renewable Energy Statistics 2020. Renewable hydropower (including mixed plants)*. <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>
- International Renewable Energy Agency. (2020b). Renewable Energy Capacity Highlights 2019. *Irena*, 00(March 2020), 1–3. [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).
- International Renewable Energy Agency. (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020. In *International Renewable Energy Agency*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA\\_2017\\_Power\\_Costs\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf)
- IPCC, Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Friedlingstein, P., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Manning, M., Matsuno, T., Molina, M., ... Zwiers, F. (2007). Resumen para Políticas Responsables de los Expertos sobre Cambio Climático. In *IPCC Climate Change*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf)
- IPCC -ONU. (2019). IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
- IPCC-IPBES. (2020). *Scientific outcome - Biodiversity and Climate Change*.
- Jabbari, A. A., & Nazemi, A. (2019). Alterations in Canadian hydropower production potential due to continuation of historical trends in climate variables. *Resources*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/RESOURCES8040163>
- Jin, Y., Andersson, H., & Zhang, S. (2016). Air pollution control policies in China: A retrospective and prospects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(12), 22. <https://doi.org/10.3390/ijerph13121219>
- Johnson, N., Burek, P., Byers, E., Falchetta, G., Flörke, M., Fujimori, S., Havlik, P., Hejazi, M., Hunt, J., Krey, V., Langan, S., Nakicenovic, N., Palazzo, A., Popp, A., Riahi, K., van Dijk, M., van Vliet, M. T. H., van Vuuren, D. P., Wada, Y., ... Parkinson, S. (2019). Integrated solutions for the water-energy-land nexus: Are global models rising to the challenge? *Water (Switzerland)*, 11(11), 33. <https://doi.org/10.3390/w11112223>
- Kao, S. C., Sale, M. J., Ashfaq, M., Uria Martinez, R., Kaiser, D. P., Wei, Y., & Diffenbaugh, N. S. (2015). Projecting changes in annual hydropower generation using regional runoff data: An assessment of the United States federal hydropower plants. *Energy*, 80, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.066>
- Kattelus, M., Rahaman, M. M., & Varis, O. (2015). Hydropower development in Myanmar and its implications on regional energy cooperation. *Sustainable Society*, 7(1), 42–66. <https://doi.org/10.1504/IJSSOC.2015.068071>
- Kelly, S. (2019). Megawatts mask impacts: Small hydropower and knowledge politics in the Puelwillimapu, Southern Chile. *Energy Research and Social Science*, 54(April), 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.04.014>
- Kelly-Richards, S., Silber-Coats, N., Crootof, A., Tecklin, D., & Bauer, C. (2017). Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom. *Energy Policy*, 101(November 2016), 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.035>

- Kichonge, B. (2018). The Status and Future Prospects of Hydropower for Sustainable Water and Energy Development in Tanzania. *Journal of Renewable Energy*, 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/6570358>
- Killingtveit, Å. (2019). Hydropower. In *Managing Global Warming* (pp. 265–315). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00008-9>
- Kling, H., Stanzel, P., & Fuchs, M. (2016). Regional Assessment of the Hydropower Potential of Rivers in West Africa. *Energy Procedia*, 97, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.002>
- Koch, F., Reiter, A., & Bach, H. (2016). Hydropower plants. In *Regional Assessment of Global Change Impacts* (pp. 185–191). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16751-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16751-0_23)
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2019). Influence of hydrologically based environmental flow methods on flow alteration and energy production in a run-of-river hydropower plant. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1028–1042. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.358>
- La Revista Energética de Chile. (2020). *Hidroelectricidad: oportunidades para una nueva fase en Chile*. <https://www.revistaei.cl/reportajes/hidroelectricidad-oportunidades-para-una-nueva-fase/#>
- LABOLAB. (2020). *Physicochemical analysis of water*.
- Laborde, A., Habit, E., Link, O., & Kemp, P. (2020). Strategic methodology to set priorities for sustainable hydropower development in a biodiversity hotspot. *Science of the Total Environment*, 714, 42. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136735>
- Lehner, B., Czisch, G., & Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential of Europe: A model-based analysis. *Energy Policy*, 33(7), 839–855. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.018>
- Li, X. J., Zhang, J., & Xu, L. Y. (2015). An evaluation of ecological losses from hydropower development in Tibet. *Ecological Engineering*, 76, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.034>
- Li, X. Z., Chen, Z. jun, Fan, X. C., & Cheng, Z. J. (2018). Hydropower development situation and prospects in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(August 2017), 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.090>
- Liden, R.; Lyon, K. (2014). *The Hydropower Sustainability Assessment Protocol for Use by World Bank Clients - Lessons Learned and Recommendations*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/19990>
- Lima, C. H. R., & Lall, U. (2010). Climate informed long term seasonal forecasts of hydroenergy inflow for the Brazilian hydropower system. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.026>
- Liu, B., Lund, J. R., Liu, L., Liao, S., Li, G., & Cheng, C. (2020). Climate change impacts on hydropower in Yunnan, China. *Water (Switzerland)*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12010197>
- Llamosas, C., & Sovacool, B. K. (2021). The future of hydropower? A systematic review of the drivers, benefits and governance dynamics of transboundary dams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137(0321), 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110495>
- Lohrmann, A., Child, M., & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233, 121098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>

- Lombardi. (2017). *San Francisco Hydroelectric Project - Inspection of the conduction tunnel and balancing chimney (Ecuador)*. San Francisco Hydroelectric Project - Inspection of the Conduction Tunnel and Balancing Chimney (Ecuador). [https://www.lombardi.ch/es-es/Paginas/Referencias/Hydroelectric plants/Referencias\\_5314.aspx](https://www.lombardi.ch/es-es/Paginas/Referencias/Hydroelectric plants/Referencias_5314.aspx)
- Lucena, A. F. P., Hejazi, M., Vasquez-Arroyo, E., Turner, S., Köberle, A. C., Daenzer, K., Rochedo, P. R. R., Kober, T., Cai, Y., Beach, R. H., Gernaat, D., Van Vuuren, D. P., & Van Der Zwaan, B. (2018). Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil. *Energy*, *164*, 1161–1177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.005>
- Madani, K., Guégan, M., & Uvo, C. B. (2014). Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. *Journal of Hydrology*, *510*, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.001>
- Majone, B., Villa, F., Deidda, R., & Bellin, A. (2016). Impact of climate change and water use policies on hydropower potential in the south-eastern Alpine region. *Science of the Total Environment*, *543*, 965–980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.009>
- Mapchart. (2022). *The world map*. Didacticworld Map. <https://mapchart.net/world-advanced.html>
- Mattmann, M., Logar, I., & Brouwer, R. (2016). Hydropower externalities: A meta-analysis. *Energy Economics*, *57*, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.04.016>
- Mayeda, A. M., & Boyd, A. D. (2020). Factors influencing public perceptions of hydropower projects: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *121*(March 2019), 109713. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109713>
- Mayer, A., Castro-Diaz, L., Lopez, M. C., Leturcq, G., & Moran, E. F. (2021). Is hydropower worth it? Exploring amazonian resettlement, human development and environmental costs with the Belo Monte project in Brazil. *Energy Research and Social Science*, *78*(May), 102129. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102129>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(1), 179–187. <https://doi.org/10.5194/hess-16-179-2012>
- Mena-Vasconez, P. (2018). *Biodiversity Ecuador* (p. 16). <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/49905.pdf>
- Merino, A. (2021). *The Political Map of Ecuador*. <https://elordenmundial.com/mapas/mapa-politico-ecuador/>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Desarrollo hidroeléctrico del Ecuador y cambio climático* (Issue 811, pp. 1–2).
- Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador. (2013). *Electrification Master Plan 2012-2021* (Vol. 53). <https://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/PME-2012-2021.pdf>
- Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador. (2017a). *Atlas of the Ecuadorian electricity sector*. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/08/atlas%20reducido.pdf>
- Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador. (2017b). *The Gained Decade of the Electricity Sector in Ecuador*.
- Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador. (2018). *National Energy Efficiency Plan*. Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador.

[https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/images/PLANEE\\_INGLES/NationalEnergyEfficiencyPlan20162035\\_2017-09-01\\_16-00-26.html](https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/images/PLANEE_INGLES/NationalEnergyEfficiencyPlan20162035_2017-09-01_16-00-26.html)

Ministry of Energy and Non-Renewable Resources of Ecuador. (2019). *Master Plan of Electricity 2019-2027*. <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>

Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador. (2019). First Contribution Determined at the National Level to the Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/02/Folleto-NDC-2020-2025.pdf>

Ministry of Environment Water and Ecological Transition of Ecuador. (2020). *Implementation Plan of the First National Determined Contribution of Ecuador (IP-NDC)*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/02/Plan-de-Implementacion-NDC-2020-2025.pdf>

Ministry of the Environment and Water of Ecuador. (2017). *Estrategia nacional para el cambio climático de Ecuador*.

Mohor, G. S., Rodriguez, D. A., Tomasella, J., & Siqueira Júnior, J. L. (2015). Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4(PB), 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>

Mongabay. (2018). *Ecuador: tras cuatro años de silencio, comunidades denuncian impactos de la Hidroeléctrica Baba*. <https://es.mongabay.com/2017/10/ecuador-tras-cuatro-anos-silencio-comunidades-denuncian-impactos-la-hidroelectrica-baba/#:~:text=Entrevistas Idioma-,Ecuador%3A tras cuatro años de silencio%2C comunidades denuncian,impactos de la Hidroeléctrica Baba&text=Escasez de peces%2C daños en,denuncias de habitantes de comunidades.>

Mousavi, R. S., Ahmadizadeh, M., & Marofi, S. (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). *Water (Switzerland)*, 10(10), 22. <https://doi.org/10.3390/w10101458>

Naranjo-Silva, S., & Álvarez del Castillo, J. (2021a). An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review. *Journal of Energy Research and Reviews*, 8(1), 10–20. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v8i130201>

Naranjo-Silva, S., & Álvarez del Castillo, J. (2021b). Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this “clean” source. *CienciAmérica*, 10(2), 32. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i2.363>

Naranjo-Silva, S., & Alvarez del Castillo, J. (2022). The American Continent hydropower development and the Sustainability: A Review. *International Journal of Engineering Science Technologies*, 6(2), 66–79. <https://doi.org/10.29121/ijoest.v6.i2.2022.315>

Naranjo-Silva, S., Punina, J., & Álvarez Del Castillo, J. (2022). Comparative cost per kilowatt of the latest hydropower projects in Ecuador. *InGenio Journal*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i1.473>

Naranjo-Silva, S., Punina-Guerrero, D., Barros-Enrique, J. D. z, Almeida-Dominguez, J. A., & Castillo, J. A. del. (2022). A physical-chemical study of water resources in 5 hydropower projects. *Brazilian Journal of Development*, 8(11), 73168–73185. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n11-158>

Naranjo-Silva, S., Punina-Guerrero, D., Barros-Enriquez, D., Almeida-Dominguez, J., & Alvarez Del Castillo, J. (2022). Book of 3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and

Environment Systems. *3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, 76–78. <https://www.saopaulo2022.sdewes.org/>

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. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 14(2), 102–110. <https://doi.org/10.5829/ijee.2023.14.02.02>

Naranjo-Silva, S., Punina-Guerrero, D., Rivera-Gonzalez, L., Escobar-Segovia, K., Barros-Enriquez, J. D., Almeida-Dominguez, J. A., & Alvarez del Castillo, J. (2023). Hydropower Scenarios in the Face of Climate Change in Ecuador. *Sustainability*, 15(13), 10160. <https://doi.org/10.3390/su151310160>

Naranjo-Silva, S., & Quimbita, O. (2022). Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5(Sustainable Management of Water Resources), 1–14. <https://doi.org/10.46380/rias.v5.e268>

Naranjo-Silva, S., Rivera-Gonzalez, L., Escobar-Segovia, K., Quimbita-Chiluisa, O., & Javier, A. del C. (2022). Analysis of Water Characteristics by the Hydropower Use (Up-Stream and Downstream): A Case of Study at Ecuador, Argentina, and Uruguay. *Journal of Sustainable Development*, 15(4), 71. <https://doi.org/10.5539/jsd.v15n4p71>

Negi, G. C. S., & Punetha, D. (2017). People's perception on impacts of hydropower projects in Bhagirathi river valley, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5820-y>

Noblecilla-Alburque, M. E. (2020). *Administrative management and quality of service in the Metropolitan Municipality of Lima*. Cesar Vallejo University.

Norwegian Ministry of Petroleum and Energy. (2021). *Electricity Production*. <https://energifaktanorge.no/en/norsk-energiforsyning/kraftproduksjon/#:~:text=seasons and years-,Hydropower,of Norways total power production.>

Ogino, K., Dash, S. K., & Nakayama, M. (2019). Change to hydropower development in Bhutan and Nepal. *Energy for Sustainable Development*, 50, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.005>

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Open Street Map. (2022). *Location of Ecuadorian hydroelectric plants*. <https://www.openstreetmap.org/note/2721104#map=6/-0.754/-73.334>

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2015). *Planificación Integrada de la Energía para el Desarrollo Sostenible*. 9. [http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/08-43773\\_IEPSD-Brochure\\_Spanish\\_web.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/08-43773_IEPSD-Brochure_Spanish_web.pdf)

Oviedo-Ocaña, E. R. (2018). Hydroelectric Dams: effects on ecosystems and environmental health. *Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud*, 50(3), 191–192. <https://doi.org/10.18273/revsal.v50n3-2018003>

Palacios-Fonseca et. al., A. Alicia. (2017). *Infraestructura Hidroeléctrica Actual de México*. <https://doi.org/978-607-9368-93-7>

- Peng, S., Shi, G., & Zhang, R. (2019). Social stability risk assessment: status, trends and prospects —a case of land acquisition and resettlement in the hydropower sector. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 00(00), 1–17. <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1706386>
- Pfister, S., Scherer, L., & Buxmann, K. (2020). Water scarcity footprint of hydropower based on a seasonal approach - Global assessment with sensitivities of model assumptions tested on specific cases. *Science of the Total Environment*, 724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138188>
- Ponce-Jara, M. A., Castro, M., Pelaez-Samaniego, M. R., Espinoza-Abad, J. L., & Ruiz, E. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade. *Energy Policy*, 113(August 2017), 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.036>
- Poveda-Burgos, G., Castañeda, Z. N. F., Flores, E. Á. E., Molina, K. R., & Ruiz, J. G. (2017). Desarrollo local de la nueva matriz energética en el Ecuador desde Coca Codo Sinclair. *Oidles*, 22, 114–144. <http://www.eumed.net/rev/oidles/22/coca-codo-sinclair.html>
- Presidencia de la República del Ecuador. (2019). *El Acuerdo es Ahora*. <https://www.presidencia.gob.ec/presidente-lenin-moreno-convoca-a-los-ciudadanos-a-construir-un-acuerdo-nacional-para-todos-y-un-futuro-comun/>
- Purwanto, W. W., & Afifah, N. (2016). Assessing the impact of techno socioeconomic factors on sustainability indicators of microhydro power projects in Indonesia: A comparative study. *Renewable Energy*, 93, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.071>
- Qin, P., Xu, H., Liu, M., Du, L., Xiao, C., Liu, L., & Tarroja, B. (2020). Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. *Journal of Hydrology*, 580(July 2019), 123922. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123922>
- Rasul, G., Neupane, N., Hussain, A., & Pasakhala, B. (2019). Beyond hydropower: towards an integrated solution for water, energy and food security in South Asia. *International Journal of Water Resources Development*, 00(00), 1–25. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1579705>
- Reisancho, F. L., & Rivera, K. D. (2018). *Evaluación ambiental de la planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural Belisario*.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2022). *Renewable Energy - Our world in data*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy?country=>
- Rivera González, L. M. (2020). *TESIS DOCTORAL: Estudio Técnico-Económico de la Gasificación de Ecuador* [Doctoral ]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rivera-González, L., Bolonio, D., Mazadiego, L. F., Naranjo-Silva, S., & Escobar-Segovia, K. (2020). Long-term forecast of energy and fuels demand towards a sustainable road transport sector in Ecuador (2016-2035): A LEAP model application. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su12020472>
- Robescu, L. D., & Bondrea, D. A. (2019). The water footprint from hydroelectricity: A case study for a hydropower plant in Romania. *E3S Web of Conferences*, 85(2019), 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198506012>
- Roca, J. (2015). *Las 10 hidroeléctricas más grandes del mundo*. El Periodico de La Energia. <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>

- Sahu, N., Sayama, T., Saini, A., Panda, A., & Takara, K. (2020). Understanding the hydropower and potential climate change impact on the himalayan river regimes—a study of local perceptions and responses from himachal pradesh, india. *Water (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102739>
- Sahukhal, R., & Bajracharya, T. R. (2019). Modeling water resources under competing demands for sustainable development: A case study of Kaligandaki Gorge Hydropower Project in Nepal. *Water Science and Engineering*, 12(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.002>
- Salto Grande - Binational Corporation. (2014). *Hydroelectric Complex*. <https://www.saltogrande.org/caracteristicas.php>
- Sample, J. E., Duncan, N., Ferguson, M., & Cooksley, S. (2015). Scotland's hydropower: Current capacity, future potential and the possible impacts of climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52(2015), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.071>
- Schaeffer, R., Szklo, A., Lucena, A., Soria, R., & Chávez-Rodríguez, M. (2013). The Impact of Climate Change on the Untapped Potential of Hydropower System. *IEEE Power & Energy Magazine*, April, 10. <https://doi.org/10.1109/MPE.2013.2245584>
- Schaeffer, R., Szklo, A. S., Pereira de Lucena, A. F., Moreira Cesar Borba, B. S., Pupo Nogueira, L. P., Fleming, F. P., Troccoli, A., Harrison, M., & Boulahya, M. S. (2012). Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy*, 38(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>
- Scherer, L., & Pfister, S. (2016). Global water footprint assessment of hydropower. *Renewable Energy*, 99, 711–720. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.021>
- Seoane, T., Martín, J. L. R., Martín-Sánchez, E., Lurueña-Segovia, S., & Alonso Moreno, F. J. (2007). Chapter 7: Statistics: Descriptive and inferential statistics. *Semergen*, 33(9), 466–471. [https://doi.org/10.1016/S1138-3593\(07\)73945-X](https://doi.org/10.1016/S1138-3593(07)73945-X)
- Severiche-Sierra, C. (2013). Water and power generation in sustainable environments. *Cap&Cua*, 9(1), 1–6.
- Shaktawat, A., & Vadhera, S. (2021). Risk management of hydropower projects for sustainable development: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 45–76. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00607-2>
- Shove, E. (2010). Beyond the ABC: Climate change policy and theories of social change. *Environment and Planning A*, 42(6), 1273–1285. <https://doi.org/10.1068/a42282>
- Sivongxay, A., Greiner, R., & Garnett, S. T. (2017). Livelihood impacts of hydropower projects on downstream communities in central Laos and mitigation measures. *Water Resources and Rural Development*, 9(March), 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.wrr.2017.03.001>
- Solaun, K., & Cerdá, E. (2017). The impact of climate change on the generation of hydroelectric power—a case study in southern Spain. *Energies*, 10(9), 19. <https://doi.org/10.3390/en10091343>
- Spalding-Fecher, R., Chapman, A., Yamba, F., Walimwipi, H., Kling, H., Tembo, B., Nyambe, I., & Cuamba, B. (2016). The vulnerability of hydropower production in the Zambezi River Basin to the impacts of climate change and irrigation development. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(5), 721–742. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9619-7>
- Sun, L., Cai, Y., Chen, A., Zamora, D., & Jaramillo, F. (2021). Water footprint and consumption of hydropower from basin-constrained water mass balance. *Advances in Water Resources*, 153(May), 103947. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103947>



- Tang, S., Chen, J., Sun, P., Li, Y., Yu, P., & Chen, E. (2019). Current and future hydropower development in Southeast Asia countries (Malaysia, Indonesia, Thailand, and Myanmar). *Energy Policy*, 129(February), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.036>
- Tan-Mullins, M., Urban, F., & Mang, G. (2017). Evaluating the Behaviour of Chinese Stakeholders Engaged in Large Hydropower Projects in Asia and Africa. *China Quarterly*, 230, 464–488. <https://doi.org/10.1017/S0305741016001041>
- Tarroja, B., AghaKouchak, A., & Samuelsen, S. (2016). Quantifying climate change impacts on hydropower generation and implications on electric grid greenhouse gas emissions and operation. *Energy*, 111, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.131>
- Tarroja, B., Forrest, K., Chiang, F., AghaKouchak, A., & Samuelsen, S. (2019). Implications of hydropower variability from climate change for a future, highly-renewable electric grid in California. *Applied Energy*, 237(May 2018), 353–366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.079>
- Teotónio, C., Fortes, P., Roebeling, P., Rodriguez, M., & Robaina-Alves, 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*, 74(March), 788–799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.002>
- Teräväinen, T. (2019). Negotiating water and technology-Competing expectations and confronting knowledges in the case of the Coca Codo Sinclair in Ecuador. *Water (Switzerland)*, 11(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w11030411>
- The Great Bubble Barrier. (2023, March 3). *Pollution in rivers*. <https://thegreatbubblebarrier.com/Technology/>. <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/>
- The International Journal on Hydropower. (2015). *World atlas and industry guide 2015*.
- Torres, M. C., Fierro, V., & Carrera, M. I. (2018). *Results of biophysical modeling, economic valuation and policy proposal*.
- Tupiño Salinas, C. E., Vidal de Oliveira, V. P., Brito, L., Ferreira, A. V., & De Araújo, J. C. (2019). Social impacts of a large-dam construction: the case of Castanhão, Brazil. *Water International*, 44(8), 871–885. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1677303>
- Turner, S. W. D., Hejazi, M., Kim, S. H., Clarke, L., & Edmonds, J. (2017). Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs. *Energy*, 141, 2081–2090. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.089>
- Turner, S. W. D., Jia, Y. N., & Galelli, S. (2017). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. *Science of the Total Environment*, 590–591, 663–675. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.022>
- Uamusse, M., Aljaradin, M., Nilsson, E., & Persson, K. M. (2017). Climate Change observations into Hydropower in Mozambique. In Procedia (Ed.), *2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies 2017 AEDCEE, 25-26 May 2017, Bangkok, Thailand* (Vol. 138, pp. 592–597). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.165>
- Uamusse, M. M., Tussupova, K., & Persson, K. M. (2020). Climate change effects on hydropower in Mozambique. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(14). <https://doi.org/10.3390/app10144842>
- Union of Concerned Scientists. (2014). *How Hydroelectric Energy Works*. <https://www.ucsusa.org/resources/how-hydroelectric-energy-works>

- Universidad Politécnica de Cataluña. (2019). *Información general del Perfil de salida de la Escuela de Doctorado*. <https://doctorat.upc.edu/es/programas/sostenibilidad>
- USAID. (2017). Climate Change Adaptation in MOZAMBIQUE. In *The Social and Behavioural Aspects of Climate Change: Linking Vulnerability, Adaptation and Mitigation*. <https://doi.org/10.4324/9781351278768>
- Vaca-Jiménez, S., Gerbens-Leenes, P. W., & Nonhebel, S. (2019). The water footprint of electricity in Ecuador: Technology and fuel variation indicate pathways towards water-efficient electricity mixes. *Water Resources and Industry*, 22(June), 100112. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100112>
- Van Der Zwaan, B., Boccalon, A., & Dalla Longa, F. (2018). Prospects for hydropower in Ethiopia: An energy-water nexus analysis. *Energy Strategy Reviews*, 19, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.001>
- Van Der Zwaan, B., Kober, T., Calderon, S., Clarke, L., Daenzer, K., Kitous, A., Labriet, M., Lucena, A. F. P., Octaviano, C., & Di Sbroiavacca, N. (2015). Energy technology roll-out for climate change mitigation: A multi-model study for Latin America. *Energy Economics*, 56, 526–542. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.11.019>
- van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S., & Riahi, K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6(4), 375–380. <https://doi.org/10.1038/nclimate2903>
- Van Vliet, M., Van Beek, L., Eisner, S., Flörke, M., Wada, Y., & Bierkens, M. F. P. (2016). Multi-model assessment of global hydropower and cooling water discharge potential under climate change. *Global Environmental Change*, 40, 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.007>
- Villamar, D., Soria, R., Rochedo, P., Szklo, A., Imperio, M., Carvajal, P., & Schaeffer, R. (2021). Long-term deep decarbonisation pathways for Ecuador: Insights from an integrated assessment model. *Energy Strategy Reviews*, 35(April 2020), 100637. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100637>
- Voegeli, G., Hediger, W., & Romerio, F. (2019). Sustainability assessment of hydropower: Using a causal diagram to seize the importance of impact pathways. *Environmental Impact Assessment Review*, 77(October 2018), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.03.005>
- Wagner, B., Hauer, C., Schoder, A., & Habersack, H. (2015). A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50(2015), 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.169>
- Wang, H., Xiao, W., Wang, Y., Zhao, Y., Lu, F., Yang, M., Hou, B., & Yang, H. (2019). Assessment of the impact of climate change on hydropower potential in the Nanliujiang River basin of China. *Energy*, 167, 950–959. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.159>
- Winemiller, K. O., Nam, S., Baird, I. G., Darwall, W., Lujan, N. K., Harrison, I., Stiasny, M. L. J., Silvano, R. A. M., Fitzgerald, D. B., Pelicice, F. M., Agostinho, A. A., Gomes, L. C., Albert, J. S., Baran, E., Jr, M. P., Zarfl, C., Mulligan, M., Sullivan, J. P., Arantes, C. C., ... Sáenz, L. (2016). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 351(6269), 128–129. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aac7082>
- World Energy Council. (2004). *Comparison of energy systems using life cycle assessment: a special report of the World Energy Council*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB\\_Comparison\\_of\\_Energy\\_Systems\\_using\\_lifecycle\\_2004\\_WEC.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_Comparison_of_Energy_Systems_using_lifecycle_2004_WEC.pdf)

- Yao, Y., Qu, W., Lu, J., Cheng, H., Pang, Z., Lei, T., & Tan, Y. (2021). Responses of hydrological processes under different shared socioeconomic pathway scenarios in the Huaihe river basin, China. *Water (Switzerland)*, *13*(8). <https://doi.org/10.3390/w13081053>
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, *77*(1), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>
- Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Urban Resilience for Urban Sustainability: Concepts, Dimensions, and Perspectives. *Sustainability*, *14*(5), 2481. <https://doi.org/10.3390/su14052481>
- Zhang, P., Qiao, Y., Schineider, M., Chang, J., Mutzner, R., Fluixá-Sanmartín, J., Yang, Z., Fu, R., Chen, X., Cai, L., & Lu, J. (2019). Using a hierarchical model framework to assess climate change and hydropower operation impacts on the habitat of an imperiled fish in the Jinsha River, China. *Science of the Total Environment*, *646*(8), 1624–1638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.318>
- Zhang, X., Li, H. Y., Deng, Z. D., Ringler, C., Gao, Y., Hejazi, M. I., & Leung, L. R. (2018). Impacts of climate change, policy and Water-Energy-Food nexus on hydropower development. *Renewable Energy*, *116*, 827–834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030>
- Zhong, R., Zhao, T., He, Y., & Chen, X. (2019). Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: A case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong. *Energy*, *179*, 685–696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.059>

## Anexos

### Anexo nro. 1.

#### Producción científica desarrollada con la Tesis

A continuación las participaciones generadas como autor y coautor en referencia al tema de esta investigación, adicional se adjunta el link donde ubicar la información, y el código alfanumérico que identifica en la web el artículo (DOI por sus siglas en inglés).

#### Coautor:

Long-Term Forecast of Energy and Fuels Demand Towards a Sustainable Road Transport Sector in Ecuador (2016–2035): A LEAP Model Application

<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/472>

<https://doi.org/10.3390/su12020472>

#### Autor:

Hydropower Scenarios in the Face of Climate Change in Ecuador

<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10160>

<https://doi.org/10.3390/su151310160>

Analysis of Water Characteristics by the Hydropower Use (Up-Stream and Downstream): A Case of Study at Ecuador, Argentina, and Uruguay

<https://ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/0/47368>

<https://doi.org/10.5539/jsd.v15n4p71>

#### Memorias Proceedings.

LA Sdewes. ISSN 2706-3674 (digital proceedings). 3<sup>rd</sup> Latin American Conference on sustainable development. A Perception of the Largest Hydropower Project in Ecuador (Coca Codo Sinclair). Pag. 76.

<https://www.saopaulo2022.sdewes.org/media>

<https://www.saopaulo2022.sdewes.org/programme>

The American Continent hydropower development and the Sustainability: A Review

[https://www.granthaalayahpublication.org/ojs-sys/ijouest/article/view/IJOEST\\_315](https://www.granthaalayahpublication.org/ojs-sys/ijouest/article/view/IJOEST_315)

<https://dx.doi.org/10.29121/ijouest.v6.i2.2022.315>

Hydropower and climate change concerning to the implementation of the First National Determined Contribution in Ecuador

<http://www.ambiente-sustentabilidad.org/index.php/revista/article/view/268>

<https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e268>

A physical-chemical study of water resources in 5 hydropower projects

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/54183>

<https://doi.org/10.34117/bjdv8n11-158>

Hydropower Development in Three South American Countries: Brazil, Colombia, and Ecuador

[https://www.ijee.net/article\\_163441.html](https://www.ijee.net/article_163441.html)  
[doi: 10.5829/ijee.2023.14.02.02](https://doi.org/10.5829/ijee.2023.14.02.02)  
<https://doi.org/10.5829/ijee.2023.14.02.02>

**An Approach of the Hydropower: Advantages and Impacts. A Review**

<https://journaljenrr.com/index.php/JENRR/article/view/134>  
<https://doi.org/10.9734/jenrr/2021/v8i130201>

**Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this "clean" source**

<https://cienciaamerica.edu.ec/index.php/uti/article/view/363>  
<http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i2.363>

**Comparative cost per kilowatt of the latest hydropower projects in Ecuador**

<https://revistas.uteg.edu.ec/index.php/ingenio/article/view/473>  
<https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i1.473>