

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

AUTOR:
SARA CAROLINA CÓRDOBA OSORIO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD
MEDELLÍN
2023

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

AUTOR:
SARA CAROLINA CÓRDOBA OSORIO

Trabajo de grado para optar el título de
Magíster de Sostenibilidad

ASESOR:
HUGO ALBERTO CARDONA RESTREPO
Magíster en Ingeniería



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD
MEDELLÍN
2023

10 de enero de 2023

SARA CAROLINA CÓRDOBA OSORIO

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en ésta o cualquier otra universidad”. Art.92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma:

SARA CÓRDOBA O.

AGRADECIMIENTOS

A los abuelos y ancestros que no pudieron estudiar
A mis padres que lo lograron y abrieron el camino
Y a mí, que lo estoy forjando y liberando para todos los que vienen

Gracias, Gracias, Gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	11
1.1 ESPAÑOL	11
1.2 INGLÉS	11
INTRODUCCIÓN	12
1 FUNDAMENTACIÓN	16
1.1 PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4 MARCO REFERENCIAL	18
1.4.1 MARCO CONCEPTUAL	18
1.4.2 MARCO NORMATIVO EN COLOMBIA	24
1.4.3 ESTADO DE ARTE	26
2 METODOLOGÍA	29
2.1 ASPECTOS E IMPACTOS DE LA SOSTENIBILIDAD	31
2.1.1 Aspectos e impactos económicos	32
2.1.2 Aspectos e impactos sociales	32
2.1.3 Aspectos e impactos ambientales	34
2.2 CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD	38
2.2.1 Comisión Mundial de Represas (WCD)	38
2.2.2 Comisión del Río Mekong (MRC)	40
2.2.3 Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA)	43
2.3 GUÍA METODOLOGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	50
2.3.1 Indicadores	50
2.3.2 Método CCDS	53
3 REPORTES DE SOSTENIBILIDAD	59
4 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA GUÍA EN COLOMBIA Y EXPERIENCIAS	69
CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES	87

CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
FUTUROS TRABAJOS	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	97

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Aspecto e Impacto Económicos	32
Tabla 2. Aspectos e Impactos Sociales	33
Tabla 3. Aspectos e Impactos Ambientales	34
Tabla 4. Criterios de sostenibilidad de WCD.....	39
Tabla 5. Criterios de sostenibilidad de MRC – RSAT.	41
Tabla 6. Criterios de sostenibilidad del HSAP.....	45
Tabla 7. Resumen de WCD, MRC e IHA.	48
Tabla 8. Indicadores económicos según Método CCDS.....	50
Tabla 9. Indicadores Sociales según Método CCDS	51
Tabla 10. Indicadores Ambientales según Método CCDS	51
Tabla 11. Indicadores técnicos según Método CCDS.....	52
Tabla 12. Herramientas de Reporte de Sostenibilidad -SRT	60
Tabla 13. Generalidades Metodología GRI.....	64
Tabla 14. Herramientas de evidencia de sostenibilidad.....	67
Tabla 15. Indicadores cuantitativos para la medición de sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos.	72
Tabla 16. Materialidad en empresas eléctricas del país	84

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Matriz de generación eléctrica y capacidad instalada en Colombia	13
Ilustración 2. Consumo energético por sectores en Colombia.....	14
Ilustración 3. Distribución de la capacidad instalada en el país.....	14
Ilustración 4. Proyección de incremento de energía hidroeléctrica.....	15
Ilustración 5. Grupos de Interés en la energía hidroeléctrica.....	23
Ilustración 6. Diagrama de flujo de la guía metodológica para la evaluación de la sostenibilidad.....	30
Ilustración 7. Etapas fundamentales para la toma de decisión.....	39
Ilustración 8. Esquema general de evaluación de sostenibilidad de un proyecto hidroeléctrico.	44
Ilustración 9. Criterios de sostenibilidad del HGIP	47
Ilustración 10. Criterios de sostenibilidad del HESG.	47
Ilustración 11. Diagrama de flujo Método CCDS	58

Ilustración 12. Manejo de los impactos generados en una Central Hidroeléctrica	66
Ilustración 13. Ejemplo de cálculo en indicador económico (Precio de Biodiésel).	70
Ilustración 14. Ejemplo de cálculo en indicador ambiental (Variación de bosques y ecosistemas terrestres).	70
Ilustración 15. Ejemplo de cálculo en indicador social (Población pobre).	71
Ilustración 16. Ejemplo de pesos del sistema.	80
Ilustración 17. Ejemplo de los niveles de sostenibilidad de casa sistema	81
Ilustración 18. Ejemplo de diagrama causal	82

GLOSARIO

AA1000AS	<i>AccountAbility Assurance Standard 1000</i> Estándar de aseguramiento de sostenibilidad AS1000AS
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> Proceso de análisis jerárquico
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BIM	<i>Building Information Modeling</i> Modelado de información de construcción
BS8900	<i>British Standard 8900 Managing sustainable development of organizations</i> Estándar británico de gestión de la sostenibilidad en organizaciones 8900
CBI	<i>Climate Bonds Initiative</i> Iniciativa de los bonos climáticos
CCDS	<i>Construct, Construct, Determine, SPA</i> Construir sistema de índices, Construir modelo de dinámica de sistemas, Determinar peso de índices, Evaluación de análisis de conjunto de pares
CDP	<i>Carbon Disclosure Project</i> Proyectos para la divulgación de carbono
CLD	<i>Causal Loop Diagrams</i> Diagrama de casualidad
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DAA	Diagnóstico Ambiental de Alternativas
DEE	Demanda de Energía Eléctrica
DJSI	<i>Dow Jones Sustainability Index</i> Índice de sostenibilidad de Dow Jones
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ESET	<i>Economy – Society – Environment – Technology</i> Economía, sociedad, ambiente y tecnología
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i> Iniciativa de reporte global
GRNN	<i>General Regression Neural Network</i> Red neural de regression general
GW	Gigavatios (10^9 vatios)
GWh	Gigavatios por hora
HESG	<i>Hydropower Sustainability Environmental, Social, and Governance Gap Analysis Tool</i> Análisis de brechas ambientales, sociales y gobernanza en la sostenibilidad de hidroeléctricas

HGIIP	<i>Hydropower Sustainability Guidelines on Good International Industry Practice</i> Directrices de sostenibilidad de la energía hidroeléctrica sobre las buenas prácticas industriales internacionales
HSAP	<i>Hydropower Sustainability Assessment Protocol</i> Protocolo de evaluación de sostenibilidad en hidroeléctricas
HST	<i>Hydropower Sustainability Tools</i> Herramientas de sostenibilidad de hidroeléctricas
ICA	Informe de Cumplimiento Ambiental
ICR	<i>Installed Capacity Required</i> Capacidad instalada requerida
IEA	<i>International Energy Agency</i> Agencia internacional de energía
IFC	<i>International Finance Corporation</i> Corporación financiera internacional
IHA	<i>International Hydropower Association</i> Asociación Internacional de Hidroeléctricas
INCONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> Agencia internacional de las energías renovables
ISO	<i>International Standard Organization</i> Organización internacional de estándares
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> Análisis de ciclo de vida
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> Liderazgo en energía y diseño Ambiental
LIHI	<i>Low Impact Hydropower Institute</i> Instituto de energía hidroeléctrica de bajo impacto
MC	<i>Monte Carlo Simulation</i> Simulación de Monte Carlo
MCA	<i>Multi-Criteria Analysis</i> Análisis multicriterio
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i> Métodos de decisión multicriterio
MGPEA	Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales
MIV	<i>Mean Impact Value</i> Valor medio de impacto
MRC	<i>Mekong River Commission</i> Comisión del río Mekong
MW	Megavatio
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Assessment Series</i> Gestión de la seguridad y salud ocupacional
PIB	Producto Interno Bruto

PMA	Plan de Manejo Ambiental
RoR	<i>Run-of-River Hydroelectricity</i> Energía hidroeléctrica a filo de agua
RSAT	<i>Rapid Basin-wide Hydropower Sustainability</i> Herramienta de evaluación rápida de la sostenibilidad de hidroeléctricas
SASB	<i>Sustainability Accounting Standards Board</i> Junta de estándares de contabilidad de sostenibilidad
SD	<i>System Dynamics Model</i> Modelo de dinámicas de sistema
SEFF	<i>Sustainable Energy Financing Facilities</i> Facilidades de financiamiento de energía sostenible
SFD	<i>System flow Diagrams</i> Diagramas de flujo del sistema
SPA	<i>Set Pair Analysis</i> Análisis de conjunto de pares
SRT	<i>Sustainability Reporting Tools</i> Herramientas de Reporte de la Sostenibilidad
UNEP	<i>United Nations Environmental Program</i> Programa Ambiental de las Naciones Unidas
UPME	Unidad de Planeación Minero – Energética
TCFD	<i>Task Force on Climate-Related Financial Disclosures</i> Trabajo para divulgaciones financieras relacionadas con el clima
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> Técnica de preferencia de orden por similitud con solución ideal
TWh	Teravatio por hora
WCD	<i>World Commission on Dams</i> Comisión Mundial de Represas

RESUMEN

1.1 ESPAÑOL

La energía hidroeléctrica es la energía renovable convencional de mayor implementación a nivel mundial. En el 2021, la capacidad total instalada fue de 1.360 GW, generando 4.300 TWh de energía limpia. En este panorama, Colombia es catalogado como uno de los países de mayor competitividad, ya que su matriz energética se compone casi en un 70% de este tipo de energía, tiene un potencial económico hidroeléctrico de 140 TWh/año y prevé una necesidad de 5.5 GW de capacidad adicional para el 2030. Sin embargo, su experiencia en evaluación de la sostenibilidad de energías renovables es mínima. Como evidencia de esta situación, se tienen que, de los 155 proyectos hidráulicos registrados, sólo 4 tienen algún tipo de evaluación de sostenible.

Este trabajo propone una guía metodológica de evaluación de sostenibilidad en centrales hidroeléctricas en cualquiera de sus etapas. Presentando criterios e indicadores de sostenibilidad obtenidos a partir de herramientas internacionales, aspectos de materialidad de acuerdo con modelos nacionales y uso del Método CCDS de Zhang et al, para evaluar y reportar la sostenibilidad. Se espera que esta guía sea un instrumento que permita evaluar la sostenibilidad de cualquier central hidroeléctrica del país, de manera independiente, autónoma y de libre acceso.

Palabras Claves: Centrales Hidroeléctricas, Indicadores, Evaluación, Reporte de sostenibilidad, Energía renovable.

1.2 INGLÉS

Hydropower is the world's largest conventional renewable energy source. In 2021, the total installed capacity was 1,360 GW, generating 4,300 TWh of clean energy. In this scenario, Colombia is ranked as one of the most competitive countries since this type of energy generates its energy matrix at 70%, it has a hydroelectric economic potential of 140 TWh/year, and it foresees a need for 5.5 GW of additional capacity by 2030. However, their experience in assessing the sustainability of renewable energy is minimal. As evidence of this situation, of the 155 water projects registered, only four have some sustainable assessment.

This paper proposes a methodological guide for the sustainable assessment of hydropower at any stage. This guide provides sustainability criteria and indicators obtained from international tools, materiality aspects according to national models, and the use of the CCDS Method of Zhang et al. to evaluate and report sustainability. This guide is expected to be an instrument for carrying out a sustainability assessment of any hydropower in the country; it can be implemented independently, autonomously, and freely accessible.

Key Words: Hydropower, Indicators, Assessment, Sustainability reporting, Renewable energy.

INTRODUCCIÓN

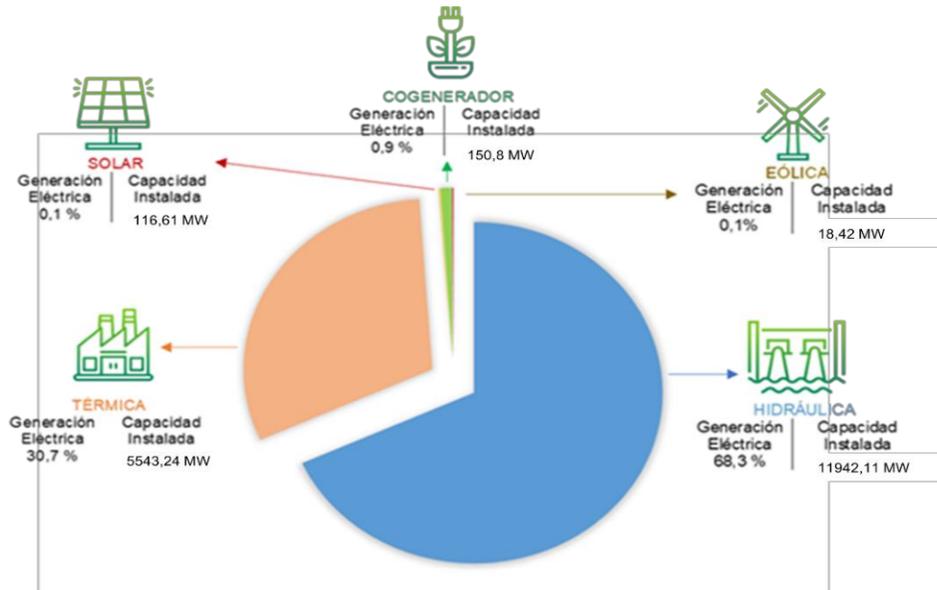
La energía hidroeléctrica es una de las energías renovables más clásicas y apetecidas en el mundo, ya que los países tienen independencia en el aprovechamiento de sus recursos hídricos y pueden garantizar una contribución de energía limpia a sus matrices energéticas. En el 2021, la capacidad total instalada de energía hidroeléctrica a nivel mundial fue de 1360 GW, generando un total de 4300 TWh de energía limpia, representando el 16% de la electricidad generada en el mundo. De esta capacidad total instalada, el país ocupó el puesto 20 en participación con 11.9 GW y a nivel mundial se aportaron 26 GW de capacidad nueva que entró en operación aportados principalmente por los países de China, Canadá e India (IHA, 2022).

Para que la generación hidroeléctrica tenga una contribución esencial frente al cambio climático, se requiere 850 GW de nueva energía proveniente hidroeléctricas, traduciéndose en que para contribuir a que el calentamiento global se mantenga por debajo de los 2°C la capacidad nueva instalada deberá crecer en promedio de 2%/año para el 2050 (IHA, 2022). Cabe resaltar que, la flota hidroeléctrica mundial está envejeciendo, y aunque se pueda modernizar la mayor parte, es inevitable la clausura de algunas otras, lo que a la postre afectará a la capacidad futura de generación (IHA, 2021a).

En el 2021, a nivel mundial el sector de la energía hidroeléctrica generó 2.4 millones de empleos directos, dos terceras partes contribuidas a la producción, el 30% relacionado con la construcción e instalación y 6% a la operación y mantenimiento. Donde el país ocupó el octavo país con mayor contribución de empleos directos, teniendo una participación de 1.8% del total (IRENA, 2022). Cabe resaltar que, estos datos tenderán a incrementar debido a los requerimientos de incremento en la capacidad de generación hidroeléctrica.

Debido a estas contribuciones y su potencial energético, el país es catalogado como uno de los de mayor competitividad a nivel mundial, visto como de alta calidad, confiable y respetuoso con el ambiente (Cortés & Arango Londoño, 2017a). Parte de esta cualidad, es que la matriz energética está compuesta por casi un 70% de energía hidroeléctrica y un 30% de energía térmica, tal y como se muestra en la siguiente ilustración. Cabe resaltar que, dado el gran porcentaje de participación de energía renovable en la matriz energética, esta tiene un factor de emisión de CO₂ de 83% menos en comparado con el promedio mundial (ACOLGEN, 2022).

Ilustración 1. Matriz de generación eléctrica y capacidad instalada en Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de (ACOLGEN,2022).

El país cuenta con un potencial económico hidroeléctrico de 140 TWh/año (Enerdata, 2020) y una eficiencia de generación hidroeléctrica entre 60 - 79,9%¹ (el Espectador, 2021). Según la UPME, en el 2030 se prevé que se requerirá aproximadamente 5,5 GW de capacidad adicional, habrá un incremento en el consumo de 2,9 %/año (Enerdata, 2020) y se contará con una capacidad de 15894 MW (EMIS, 2021).

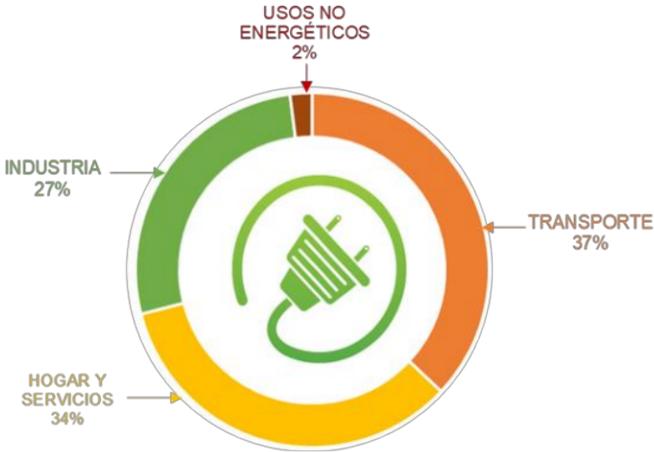
En el 2021, se contó con una capacidad instalada de 11945 MW (IHA, 2022). En el 2022, se tuvieron registrados 155 proyectos hidráulicos, segregados de la siguiente manera, 30 proyectos de despacho centralmente y 125 de despacho no central. De los proyectos de despacho central, 9 son tipo filo de agua y 21 con embalse. Y de los proyectos de no despacho central se tiene que, 5 son autogenerador, 27 son de generación distribuida y 93 son normales (XM, 2022). Así mismo, se generaron aproximadamente 40 mil empleos directos (IRENA, 2022).

Durante el 2019, el PIB por generación de energía fue de \$11.564 miles de millones de pesos. La composición de la Demanda de Energía Eléctrica fue de 69,96% de mercado regulado y 30,04% de no regulado (Sectorial - Sectorial Reports, 2020), siendo esta en promedio de 5.993,8 GWh-mes, aproximadamente 197,1 GWh-día (UPME, 2020). En el 2020, el mercado eléctrico local estuvo compuesto de 83

¹ Estudio realizado a 126 países entre el 2000 y 2016, donde se analizaron los datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA) y la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA).

generadores, 22 transmisores, 37 distribuidores y 115 comercializadores (Sectorial - Sectorial Reports, 2020). En el 2019, el consumo energético se encuentra sectores de transporte y, hogares y servicios el precio de la electricidad en el país es por regiones, y los sectores industrial y hogar, alcanzaron valores de US\$15 c/kWh y US\$15.7c/kWh re(IHA, 2022). La siguiente ilustración, muestra el consumo energético por sectores en el país.

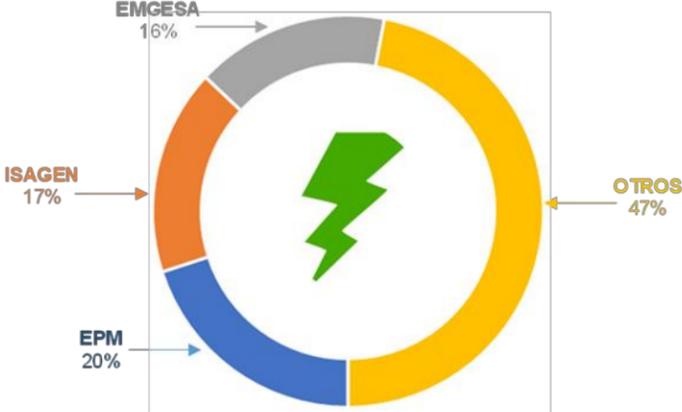
Ilustración 2. Consumo energético por sectores en Colombia.



Fuente: Elaboración propia a partir de Enerdata (2020).

En cuestiones de generación, son 3 empresas las que sostienen el 53% de la capacidad instalada, correspondiente a un 20% EPM, 17% a ISAGEN y 16% a EMGESA (Enerdata, 2021). La siguiente ilustración, muestra la capacidad instalada del país.

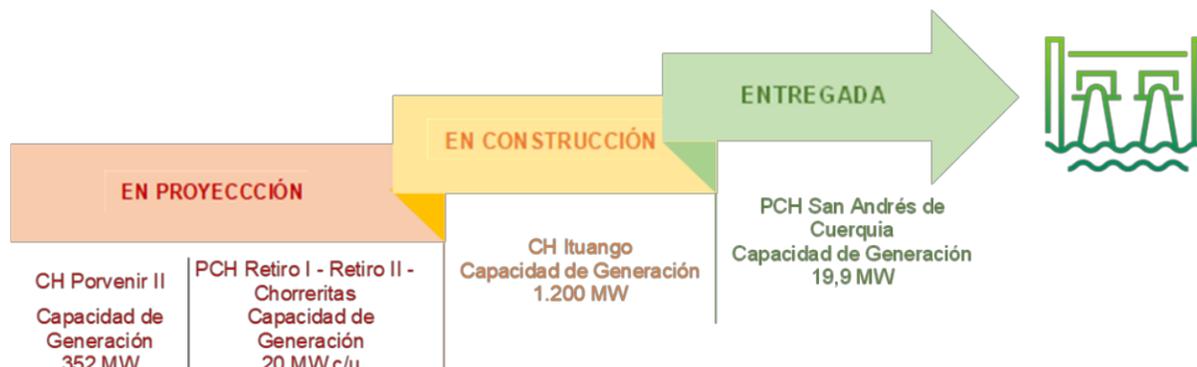
Ilustración 3. Distribución de la capacidad instalada en el país.



Fuente: Elaboración propia a partir de Enerdata (2020).

Cabe resaltar que, el país tiene proyectado incrementar la capacidad y generación de energía hidroeléctrica a través de nuevos procesos hidroeléctricos (IHA, 2021a; XM, 2022). A continuación, se ilustra estado de los proyectos más característicos del país.

Ilustración 4. Proyección de incremento de energía hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia a partir de IHA (2021a) y XM (2021).

En el 2020, se contó con 26.614 kilómetros de red de transmisión y distribución, y 7 conexiones internacionales, de las cuales 5 son con Ecuador y 2 con Venezuela (Sectorial - Sectorial Reports, 2020). De manera similar, se proyecta que en el 2023, entre en operación la línea de transmisión de 500 kV de 275 km entre La Loma – Sogamoso, permitiendo la conexión con el norte del país, y un incremento en la interconexión Colombia-Ecuador a 500 MW. Adicionalmente, para el 2024, se iniciaría el proyecto de interconexión Colombia-Panamá, una línea de transmisión de 300 Kv y dos de 200 MW distribuidas en 500 km, permitiendo la integración entre los países centroamericanos con los andinos (México a Perú) (Enerdata, 2020).

1 FUNDAMENTACIÓN

1.1 PROBLEMA

Actualmente, los grupos de interés del sector energético han incrementado los requerimientos para invertir en nuevos proyectos hidroeléctricos, debido a la presión social ejercida ante las reclamaciones por los impactos socioambientales negativos generados, especialmente a los servicios ecosistémicos y comunidades. Generando la necesidad de que se tomen medidas que permitan la verificación, de que las actividades ejecutadas estén alineadas a cuestiones de conciencia, transparencia y necesidad demostrada en los términos económicos, ambientales y sociales, es decir, bajo criterios de sostenibilidad como factor determinante para la toma de decisiones (González Guerrero, 2021).

Sin embargo, evaluar, analizar y comparar la sostenibilidad de este tipo de proyectos es una tarea compleja y de difícil realización. Conllevando a no generar valor de impacto, no ser flexibles ni adaptables ante cambios en las necesidades, incrementando la inseguridad en inversiones, no garantizando buenas prácticas, ni considerando potenciales riesgos, hasta el punto de haber incertidumbre en la ejecución de nuevos proyectos y pérdida de valor en los mercados (Ortegón Romero, 2019; Siew, 2015). Por lo tanto, la problemática radica en la evaluación de la sostenibilidad en sí, como base medible, fiable y comparable del desempeño de la gestión realizada.

Para reportar el desempeño de sostenibilidad se emplean las Herramientas de Reporte de la Sostenibilidad (SRT siglas en inglés). No obstante, las SRT presentan grandes dificultades en su implementación, debido a que hay falta de estandarización en los criterios, en materialidad, en metodologías de evaluación, en herramientas a aplicar, en regulación nacional e internacional, y en directrices ante la disponibilidad de datos, escala temporal y alcance de la evaluación. Estas características generan que, en caso de obtener resultados, estos sean diversos, subjetivos, no comparables y sesgados. Adicionalmente, que las SRT pueden enfocarse a un desempeño actual o futuro, y que la evaluación de esta requiere inversión y es voluntaria, ocasionando que no sea llamativa su aplicación (Escrig-Olmedo et al., 2010; Siew, 2015).

Por consiguiente, al tener dificultad en las SRT a implementar, tanto la medición como el reporte de sostenibilidad no son una base confiable del grado de sostenibilidad obtenido, de la eficiencia de las estrategias, imposibilita la comparación entre proyectos, la obtención de certificados y beneficios. El objetivo de este trabajo es proponer una guía que permita analizar, evaluar y reportar la sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos, de manera estandarizada en términos de criterios, indicadores y metodología para su medición y reporte.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La energía hidroeléctrica es energía renovable de tipo convencional en términos de implementación y participación en los mercados, es considerada como un contribuidor esencial frente al cambio climático. En el 2021, la capacidad total instalada a nivel mundial fue de 1360 GW generando 4300 TWh de energía limpia. De los cuales, el país contribuyó con una capacidad instalada de 11945 MW, 58 TWh de generación y 4 MW de nueva capacidad añadida, ocupando el puesto 20 de los países generadores (IHA, 2022). Estos resultados posicionan al país frente a la mira internacional por alta competitividad, alta calidad de energía, cuidado del ambiente (Cortés & Arango Londoño, 2017b), por tener un potencial económico hidroeléctrico de 140 TWh/año (Enerdata, 2020) y una eficiencia de generación hidroeléctrica entre 60 y 79,9% (El Espectador, 2021).

Por tal motivo, el país busca implementar nuevos proyectos hidroeléctricos, teniendo como meta para el 2030, una generación de 15894 MW con una capacidad añadida de 5.5 GW (Enerdata, 2021). Sin embargo, a pesar de conocer estas metas, no es evidente ni el deseo ni el requerimiento de realizarlos bajo criterios y certificaciones sostenibles, hecho soportado por los escasos de casos en el país, a los cuales se les ha realizado algún tipo de evaluación. De los 155 proyectos hidráulicos registrados en el país (XM, 2022), sólo a 4 se tiene indicios de algún tipo de evaluación de sostenibilidad. Según el Banco Mundial se les realizó evaluación oficial de HSAP2 a los proyectos de Cañafisto (Etapa Preparación, 960 MW), Santo Domingo (Etapa Preparación, 56 MW), Sogamoso (Etapa Implementación, 820 MW) y Miel I (Etapa Operación, 396 MW). Adicionalmente, se realizó una medición al desempeño de la sostenibilidad del sistema La Miel, a través de una cofinanciación entre la empresa ISAGEN y la Universidad de Medellín (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Este pequeño porcentaje obedece a la falta de obligatoriedad, de exigencia por parte de los grupos de interés, y de directrices para un enfoque sostenible. Esta situación, ocasiona que se pierdan oportunidades de inversión y financiamiento para este tipo de proyectos, incrementa el riesgo de desastres técnico-financieros, daños socioambientales y de no crecimiento del sector

Este trabajo contribuye a estandarizar aspectos, criterios, indicadores y metodología para medir y evaluar la sostenibilidad en una central hidroeléctrica. Constituyendo una base fiable para la obtención de beneficios y eficiencias de estrategias de gestión. Así mismo, busca establecerse como punto de referencia para futuras investigaciones en medición y evaluación sostenible de energías renovables del país y Latinoamérica.

² La evaluación oficial de HSAP a estos proyectos no ha sido socializada y/o no es libre acceso, por lo cual se desconoce los resultados de esta.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una guía metodológica para el análisis, evaluación, y reporte de la sostenibilidad en proyectos hidroeléctricos usando herramientas e indicadores para la medición y evaluación de las dimensiones ambientales, sociales, económicas y técnicas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Verificar herramientas y modelos para la evaluación de la sostenibilidad basados en uso eficiente de recursos naturales, CDP, certificación LEED y metodología BIM, aplicables a centrales hidroeléctricas.
2. Determinar criterios de sostenibilidad a partir de las principales directrices específicas para la evaluación de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas, especialmente de la Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA), la Comisión Mundial de Represas (WCD) y la Comisión del Río Mekong (MRC).
3. Identificar y seleccionar los indicadores aplicables en las dimensiones ambientales, sociales, económicas y técnicas, para la medición de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas.
4. Identificar los aspectos fundamentos de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas a partir de herramientas de gestión internacionales y nacionales.

1.4 MARCO REFERENCIAL

1.4.1 MARCO CONCEPTUAL

Las Herramientas de Reporte de la Sostenibilidad (SRT) permite la medición de la sostenibilidad, otorgando resultados demostrables que permiten medir el progreso y aclarar la coherencia entre las actividades, resultados y metas, a través de la definición de criterios y aspectos que reflejan los impactos ambientales, sociales y económicos más significativos que influirán en la evaluación y la decisión de las partes interesadas (Siew, 2015).

Este enfoque holístico comprende tres categorías marcos, estándares, calificaciones e índices. Los marcos se definen como un conjunto de principios o directrices proporcionados para ayudar a los esfuerzos de divulgación de la sostenibilidad, ejemplo de ellos son la Iniciativa de Reporte Global (GRI siglas en inglés), Pacto Global, entre otros; los estándares son una documentación más formal que detalla los requisitos, especificaciones o característica que se puede utilizar para los esfuerzos de sostenibilidad se logren consistentemente, son ejemplo las normas AA1000, BS8900, ISO, entre otros; y las calificaciones e índices son informes de terceros sobre el desempeño en materia de sostenibilidad, son ejemplo, se encuentra el Índice de Sostenibilidad Daw Jones (DJSI siglas en inglés), entre otros (Siew, 2015).

En otras palabras, una SRT está compuesta por visión y estrategia, estructura y sistema de gestión, aspectos, indicadores, calificación y clasificación de sostenibilidad (Siew, 2015). En donde, las principales diferencias entre una SRT a otra son los aspectos ambientales, sociales y económicos seleccionados, y los indicadores de evaluación, de acuerdo con los principios de materialidad en la cual se desarrollan. En donde, los indicadores son utilizados para definir y establecer variables de medición, que permiten verificarse a través de resultados o cambios en estándares para estimar, evaluar o demostrar el progreso con respecto a metas establecidas (Mondragón Pérez, 2002). Se realiza hincapié, en que la selección de indicadores se realice teniendo en cuenta las siguientes características: interpretabilidad, tendencias basadas en investigación, disponibilidad y calidad de los datos, y vínculos (Gunnarsdóttir et al., 2021).

En el trabajo realizado por Tahseen & Karney (2017) socializan que los métodos más implementados para evaluar la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica son el Análisis Multicriterio (MCA siglas en inglés) con variaciones con el Método de Suma Ponderada, Método de Producto Ponderado, Método de Organización de Clasificación de Preferencias para la Evaluación del Enriquecimiento, Eliminación y Elección de Traducciones de Realidad, Técnica de Preferencia de Orden por Similitud con Solución Ideal, Procesos de Análisis Jerárquico (APH siglas en inglés), Análisis de Partes Interesadas, Análisis del Ciclo de Vida (LCA siglas en inglés), aplicación de matemáticas difusas, Análisis de Redes de Impacto y análisis de emergencia.

Siendo el MCA, el LCA y la evaluación integral de múltiples índices los tres métodos más utilizados para evaluar la sostenibilidad de las hidroeléctricas. Donde el MCA es la más utilizada en la toma de decisiones ya que se puede emplear cuestiones de gestión ambiental, especialmente para los aspectos conflictivos asociados a los proyectos hidroeléctricos; Y el LCA tiene un enfoque más integral en tema de impactos ambientales, asociados a entradas, salidas y materia primas implementadas en los procesos (Zhang et al., 2021).

Algunas de las principales directrices específicas para la evaluación de la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos, otorgadas por organismos internacionales, organismos de certificación y entidades de financiación, son:

- Certificación de bajo impacto por el Instituto de Hidroeléctricas de Bajo Impacto (LIHI siglas en inglés), cuyo propósito es proteger el ecosistema fluvial y que proyectos de bajo impacto accedan a los mercados de energía renovable. El enfoque realiza la evaluación bajo 8 criterios: caudales de los ríos, calidad del agua, paso de peces río arriba, paso y protección de peces río abajo, protección de cuencas hidrográficas, protección de especies amenazadas y en peligro, recreación y protección de recursos culturales. Donde cada criterio se evalúa sobre la base de aprobado o reprobado, y se requiere de un desempeño satisfactorio en todos los criterios para la certificación (Tahseen & Karney, 2017).
- Certificación de energía hidroeléctrica verde por Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuáticas, establece la base técnica de un proceso de certificación científico y uniforme para las centrales hidroeléctricas, que garantiza el diseño y el funcionamiento de un central preservado la integridad ecológica del sistema. Este proceso implica la formación de una matriz de gestión ambiental que toma en cuenta el impacto directo en el ecosistema fluvial y es aplicable a todo tipo de centrales hidroeléctricas. La matriz toma en cuenta los problemas operacionales o aspectos de la construcción como las regulaciones de caudal mínimo, hidro-pico, gestión de embalses, gestión de carga de fondo y diseño de máquinas; Y aspectos más importantes pertinentes para garantizar la viabilidad ecológica como características hidrológicas, la conectividad del sistema fluvial, geomorfología, paisaje, biotopos y biocenosis, entre otros (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017; Tahseen & Karney, 2017).
- Direcciones en energía hidroeléctrica por el Banco Mundial, resume las cuestiones clave en la ampliación de proyectos hidroeléctricos junto con el establecimiento de prioridades para la organización en actividades crediticias y no crediticias, y en cuestiones normativas. Esta dirección tiene dos enfoques i) a través de la inversión directa y ii) mediante el fortalecimiento sectorial de fundaciones proporcionando asistencia técnica, intercambio de conocimientos, iniciando el diálogo sobre políticas y varias otras funciones (Tahseen & Karney, 2017). Acuerdo de ejecución de energía hidroeléctrica de la IEA, busca mejorar los aspectos técnicos e institucionales de la industria hidroeléctrica existente y aumentar el desarrollo futuro de una manera ambiental y socialmente responsable. Otorgando informes técnicos que brindan un panorama completo en su totalidad que incluye tendencias en el desarrollo hidroeléctrico, análisis comparativo con otras fuentes de generación, consideraciones éticas, opciones de financiamiento, métodos de educación y capacitación en energía

hidroeléctrica, entre otras (Tahseen & Karney, 2017).

- Facilidades de Financiamiento de Energía Sostenible (SEFF siglas en inglés) por parte del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo, financia proyectos hidroeléctricos en el marco de su iniciativa de energía sostenible, y utiliza ocho criterios ambientales para evaluarlos: caudal ambiental, calidad del agua, paso y protección de peces, protección de cuencas hidrográficas, especies amenazadas y en peligro de extinción, recreación, cuestiones culturales y comunitarias (Tahseen & Karney, 2017).
- Premio del Planeta Azul IHA, de la Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA siglas en inglés), el premio se otorga sobre la base de evaluación proyectos hidroeléctricos que hayan implementado las herramientas oficiales para medir la sostenibilidad (HSAP o HESG siglas en inglés), deben a ver alcanzado buenas prácticas en todas las dimensiones ambiental, social, económico y técnico, lo cual se traduce a que el proyecto alcanzó la excelencia en la sostenibilidad (Lyon, 2020).

Las tres metodologías enfocadas a la evaluación de la sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos por la Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA), las cuales toman criterios y aspectos enfocados desde un análisis de las dimensiones ambiental, social, económico y técnico, según la etapa a evaluar (IHA, 2021c). Cada una de ellas, aborda una perspectiva diferente y maneja una escala diferente de acuerdo con una definición propia del sistema que comprende un proyecto hidroeléctrico. Las cuales se enuncian a continuación:

1. La Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA), propone tres herramientas que define, mide y evalúan la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica; Siendo la principal herramienta el llamado Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad en Hidroeléctricas – HSAP, y como herramientas complementarias, las Directrices de Sostenibilidad de la Energía hidroeléctrica sobre las Buenas Prácticas Industriales Internacionales – HGIIIP, y el Análisis de Brechas Ambientales, Sociales y Gobernanza en la Sostenibilidad de Hidroeléctricas – HESG. A continuación, se segrega las tres herramientas:
 - 1.1. Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad en Hidroeléctricas – HSAP. Es una guía que permite la evaluación de cada una de las etapas del ciclo de vida de un proyecto hidroeléctrico, tomando estas como etapa temprana, preparación, implementación y operación. Cada una de estas etapas se evalúan bajo las perspectivas ambiental, social, técnico y económico-financiero, y en ella aspectos claves básicos de buenas prácticas sostenibles para proyectos hidroeléctricos (IHA, 2021c).

- 1.2. Directrices de Sostenibilidad de la Energía hidroeléctrica sobre las Buenas Prácticas Industriales Internacionales – HGIIP. Es un manual de referencia de buenas prácticas internacionales para el desarrollo de hidroeléctricas, definen el desempeño de sostenibilidad en 4 temas: Ambiental, Social, Técnico y Financiero. Estas directrices se encuentran regidas por el consejo de evaluación de la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, compuesta de 100 miembros que incluyen organizaciones no gubernamentales sociales y ambientales, organizaciones intergubernamentales, Banco de Desarrollo, gobiernos, empresas y contratistas de la energía hidroeléctrica (IHA, 2020b).
- 1.3. Análisis de Brechas Ambientales, Sociales y Gobernanza en la Sostenibilidad de Hidroeléctricas – HESG. Es un plan de acción que permite identificar, evaluar y abordar las brechas existentes en los requisitos ambientales, sociales y gobernanza en relación con las buenas prácticas internacionales de los proyectos hidroeléctricos. Es accesible a proyectos que buscan legibilidad para financiamiento de bonos ecológicos o climáticos, y es realizado por asesores acreditados (IHA, 2020a).
2. La herramienta presentada en el informe de Comisión Mundial de Represas – WCD, propone un marco que permite enfatizar un proceso estructurado para evaluar la sostenibilidad de represas desde la planeación, diseño, operación y desmantelamiento; Incorporando un análisis completo a través de un rango, social, ambiental, técnico, económico y de criterios y estándares financieros (WCD, 2000).
3. La Herramienta de Evaluación Rápida de la Sostenibilidad de Hidroeléctricas en un contexto amplio de cuenca – RSAT, reúne los principales actores en una cuenca fluvial para la análisis estructurado y determinación de la sostenibilidad, sirviendo como herramienta complementaria al HSAP. Su objetivo es evaluar la calidad de la energía hidroeléctrica, responsabilidad de los actores y sostenibilidad del proyecto, garantizando las funciones ecológicas de los ríos, los recursos naturales que proporciona a otros sectores económicos y los medios de subsistencia de las personas alrededor. Así mismo, utiliza los métodos de análisis participativo, análisis de Fortaleza, Oportunidades, Debilidades y Amenazas, diálogo de múltiples partes interesadas, puntuación basada en evidencia contra criterios, análisis de deficiencia y planificación de las acciones (MRC, 2010).

Finalmente, una adecuada identificación de los Stakeholders o grupos de interés en este sector permite tener una mirada más amplia para entender las motivaciones y masificar la efectividad de los recursos disponibles para el adecuado proceso en el desarrollo de los proyectos hidroeléctricos. Al comprender estos aspectos, se podrá construir una cooperación eficaz, de relaciones sólidas y confiables entre las partes, logrando alcanzar los objetivos planteados, la obtención de beneficios y la realización de mejoras claves y/o soluciones de compromiso para el desarrollo del

sector. Trufanov (2013), considera cuatro factores como los objetivos de los grupos de interés en el sector de energía eléctrica:

1. Nivel actual de las tarifas eléctricas.
2. Inversión de capital en el desarrollo de la industria de energía eléctrica.
3. Seguridad energética en la región.
4. El impacto de la industria de la energía eléctrica en el ambiente.

En la siguiente ilustración, se presentan los principales grupos de interés del sector de energía hidroeléctrica. Estos fueron obtenidos de las investigaciones de Trufanov (2013) y Wang et al. (2019). Los cuales, se basaron en el desarrollado de un modelo conceptual para investigar las relaciones causales entre las cooperaciones con los grupos de interés, la vinculación entre las organizaciones y capital social desde la perspectiva de los propietarios (Wang et al., 2019).

Ilustración 5. Grupos de Interés en la energía hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia a partir de CREG (n.d.), Trufanov (2013) y Wang et al. (2019).

Cabe resaltar, la anotación realizada por Trufanov (2013) anunciando que, *“ha aumentado el número de partes interesadas involucradas en el sector de la energía eléctrica, y con ello, han cambiado tanto sus prioridades como la capacidad de influencia en los procesos de tomas de decisiones. Convirtiendo el aspecto del suministro de electricidad en las regiones un ámbito de interacción explícita entre las partes interesadas”*.

1.4.2 MARCO NORMATIVO EN COLOMBIA

Los proyectos relacionados con la energía hidroeléctrica en el país, se encuentran sujetos al Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 1076 de 2015, 2015); Donde los proyectos que comprendan la generación, construcción y operación, están sujetos a la expedición de una licencia ambiental, otorgada por el Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). En la solicitud de esta licencia, se debe de formular y presentar un Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) y en base a la propuesta seleccionada, se presenta un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), donde los términos de referencia se realizan en conjunto con la Autoridad Ambiental correspondiente (Resolución 1519 de 2017, 2017). Así mismo, se deben de implementar los criterios de la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales (MGPEA) (Resolución 1503 de 2010, 2010).

Una vez otorgada la licencia ambiental, se presenta ante la Autoridad Ambiental un informe de control y seguimiento de la gestión realizada para la prevención, mitigación y compensación de los impactos socioambientales generados en el desarrollo del proyecto, llamado Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA), evidenciando la eficacia de las medidas tomadas y el desempeño ambiental del proyecto (González Guerrero, 2021; Decreto 1076 de 2015, 2015). De manera adicional, se realiza hincapié en que se deben de buscar alternativas a la manera convencional de licitación y ejecución de proyectos, debido a que en caso de identificarse una alternativa que permita evitar los impactos socioambientales se convertirían en un panorama ideal debido a que no se producirían externalidades. Tal es el caso, de la metodología propuesta por Blandón Díaz & Henao Bedoya (2018) para la evaluación integral en la conversión de líneas de transmisión de CA a CD, en donde al cambiar el tipo de línea de transmisión de CA a CD, no se producirían externalidad y en cambio, se convertirían en beneficio por el no tener que realizar manejo de los impactos.

De manera similar, dentro la normativa aplicable al sector eléctrico se destacan la Ley 142 de 1994 *“Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”* (Congreso de Colombia, 1994), la Ley 143 de 1994 *“Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, trasmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética”* (Ley 143 de 1994, 1994), y la Ley 1715 de 2014 *“Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”* (Ley 1715 de 2014, 2014).

A pesar de la normatividad existente, en palabras de Gutiérrez Ossa & Mira Olano (2019), la generación hidroeléctrica presenta una alta complejidad en temas ambientales, sociales y territoriales dados por su distribución y tamaño, asuntos que son inherentes a este tipo de proyectos. Situación que genera que las centrales

hidroeléctricas se desenvuelvan en fundamentos tanto jurídicos - legislativos (constitucional) como de orden normativo y regulatorio (jurisprudenciales), ocasionando que tengan un comportamiento ambiguo, ya sea que tiendan hacia un equilibrio, o bien, que tiendan a una medición difícil y a conveniencia, debido a la influencia del Estado, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), acuerdos internacionales, Tratados de Libre Comercio y la escasez en la oferta energética nacional, dada por implicaciones en la infraestructura y oferta hídrica. Esta condición se ve reflejado en que el sector tiene comportamientos monopolistas en las regiones, con respecto a los consumidores y el mercado, pero a nivel nacional se comportan bajo un carácter de libre competencia y tarifa regulada, gracias a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) (Gutiérrez Ossa & Mira Olano, 2019).

Por otra parte, en el país se cuenta con políticas y estrategias asociadas a la sostenibilidad de este tipo de proyectos. Las más sobresalientes son:

- La Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible: “Hacia Una Cultura de Consumo Sostenible y Transformación Productiva,” (2010) busca contribuir al aumento del PIB de una manera sostenible, impulsando un uso eficiente de los recursos naturales y un cambio profundo en la cultura de consumo, para asegurar la conservación del patrimonio natural y de los servicios ecosistémicos. Específicamente en el sector energético, busca impulsar la inclusión de criterios de sostenibilidad en sus políticas y directrices internas, cuestión que necesariamente deben de ir relacionadas con el fortalecimiento de la capacidad institucional existente.
- La Política de Crecimiento Verde (2018) , también llamado Documento CONPES 3934 de 2018, define el crecimiento verde a aquellas trayectorias de crecimiento que garantizan el bienestar económico y social de la población en el largo plazo, asegurando tanto la conservación del capital natural como la seguridad climática. Tiene como objetivo para el 2030, el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, asegurando el uso sostenible del capital natural y la inclusión social, de manera compatible con el clima.
- La Política Para El Mejoramiento de La Calidad Del Aire (2018), también llamado Documento CONPES 3943 de 2018 destaca que, para cualquier interesado en reducir las emisiones contaminantes del aire de sus actividades, se debe desarrollar inventarios y mediciones de las fuentes generadoras de contaminación. Sin embargo, el país no cuenta con un inventario nacional de emisiones ni un modelo de dispersión de contaminantes, hace definir acciones de intervención sobre las fuentes de generación de contaminantes, presenta deficiencia en la cobertura de los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire y a pesar de qué se habilitó mecanismos para reglamentar una tasa retributiva por

el uso de la atmósfera como receptora de las emisiones, esta no está reglamentada.

- La Estrategia Institucional Para La Articulación de Políticas y Acciones En Materia de Cambio Climático En Colombia (2011) y la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (2011), son programas de planeación del desarrollo que busca desligar el crecimiento de las emisiones de GEI del crecimiento económico nacional, con base en el diseño y la implementación de medidas sectoriales de mitigación que maximicen la carbono-eficiencia de la actividad económica del país y que, a su vez, contribuyan al desarrollo social y económico nacional. Este pilar de crecimiento económico promueve la competitividad, el uso eficiente de los recursos, la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías. Así mismo, plantea encontrar alternativas para evitar un crecimiento acelerado en las emisiones nacionales, a través de un sistema de monitoreo y reporte.

1.4.3 ESTADO DE ARTE

Nautiyal & Goel (2020) revisan el estado de investigación sobre la evaluación de los impactos ambientales y la sostenibilidad en proyectos hidroeléctricos. Concluyendo que la mayoría de los estudios actuales para la medición de impactos ambientales asociados a proyectos hidroeléctricos son insuficientes para medir el desempeño real y los efectos adversos implicados, falta alcance y profundidad en los estudios, se implementa un pequeño número de indicadores, las metodologías implementadas involucran varios supuestos debido a la falta de información que inducen a errores en los resultados, se toman pocos factores e indicadores, dejando de lado muchos otros; Ejemplo de esta situación es el caso de las emisiones GEI, que no toman en cuenta factores como la emisión de embalses, eutrofización de las aguas, descomposición de biomasa, factores que contribuyen a las emisiones asociadas. Así mismo, recalcan la importancia de estudiar y estimarlos impactos ecológicos en la mayor complejidad posible, estimar la variación del tiempo de vida útil de un proyecto hidroeléctrico como un parámetro que se requiere estandarizar, tener en cuenta las cadenas de suministros sostenibles de las empresas manufactureras que abastecen los proyectos, entre otros. A la postre, dictaminan que no es digno predecir la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos sin considerar casi todos los impactos biofísicos asociados con ellos.

Tahseen & Karney (2017) sostienen que los estudios actuales con frecuencia establecen los límites del sistema demasiado estrechos, de modo que omiten factores claves asociados con la energía hidroeléctrica. Por lo tanto, recomiendan que i) dichas evaluaciones deben de reflejar cuestiones políticas y desafíos ambientales con respecto al potencial hidroeléctrico existente dentro del marco actual, ii) los límites del sistema deben extenderse no solo para permitir evaluaciones hidrológicas, ecológicas geológicas amplias, sino también para

estimar razonablemente los beneficios potenciales de la energía hidroeléctrica para el funcionamiento de la red eléctrica general. Así mismo, proponen una lista de indicadores de sostenibilidad hidroeléctrica en aspectos ambientales, sociales y económicos, obtenidos de una revisión documental.

En trabajo realizado por Dhaubanjari et al. (2021) se desarrolla un marco sistemático para la evaluación a escala de cuenca para obtener el potencial hidroeléctrico explotable sostenible integrando consideraciones del nexo agua-energía-alimentos, riesgo de desastres, cambio climático, protección ambiental y preferencias socioeconómicas. En este marco holístico se incorpora de forma selectiva los avances de las evaluaciones multicriterio locales y globales emergentes que abarcan varias escalas, representa explícitamente las políticas y preferencias locales para el desarrollo hidroeléctrico y utilizan más de 30 conjuntos de datos y proponiendo restricciones teóricas, técnicas, económicas y de sostenibilidad para evaluar el potencial hidroeléctrico. Logando desarrollar cuatro mejoras notables: i) integración e incorporación de un marco único de múltiples factores y ODS asociados con el desarrollo hidroeléctrico, ii) compromiso con las partes interesadas para identificar e incorporar consideraciones locales para el diseño de energía hidroeléctrica, iii) inclusión de nuevo conjunto de datos para parametrizar las limitaciones del mundo real en un modelo cuantitativo y iv) definición de un marco a escala de cuenca en dos configuraciones hidroeléctricas a filo de agua (RoR siglas en inglés). Este marco considera cuatro tipos de potencialidades: teórico, técnico y económico, explotable sostenible, visualizado y restante. Este marco se desarrolló bajo el estudio de caso de la cuenca transfronteriza del río Inajo de realizado por Kumar & Katoch (2015) determinaron el rango de la capacidad instalada (ICR siglas en inglés) más sostenible para proyectos hidroeléctricos tipo filo de agua (RoR), comprende un ICR entre 1 a 5 MW. Este análisis fue obtenido a través de la investigación de un AHP, el cual es un método de investigaciones de MCDM. Cabe resaltar que, los autores sugieren que un adecuado indicador de impacto en proyectos hidroeléctricos en la evaluación de su sostenibilidad, y a vez de un análisis entre grandes y pequeños centrales hidroeléctricas, la cual carece de precisión. Así mismo, en la determinación de la sostenibilidad implementaron indicadores de sostenibilidad discriminados de la siguiente forma, 3 de criterio ambiental, 7 sociales y 5 económicos.

En la investigación realizada por Voegeli et al. (2019), a través de la aplicación de métodos basados en la causalidad, permite adoptar una perspectiva integral y holística de estos impactos, especialmente por tener en cuenta las interconexiones existentes entre estos. Obteniendo 10 diagramas causales que proporciona información sobre las múltiples ramificaciones de los impactos resultados de la implementación de un proyecto hidroeléctrico. Este enfoque permite aumentar la transparencia de estas vías de impacto y sus complejas interconexiones entre los impactos. En donde, la herramienta del diagrama causal podría utilizarse como apoyo para los procesos de integración y consulta de las partes interesadas, teniendo un método fructífero para la identificación las principales causas de

aparición de conflictos y podría ser un paso valioso para la identificación e implementación de medidas de mitigación.

En el trabajo realizado por Gómez Romero et al. (2020) se analiza las herramientas de HSAP, RSAT y WCD, donde establece que en base en el análisis de resultados se determinó que el HSAP es el modelo de desarrollo sostenible más apropiado para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica con una ponderación de 11.3%, el modelo de RSAT con 9.4% y WCD con 8.95%. Así mismo, propone que el HSAP se puede beneficiar de los modelos dados por la Norma AA1000:2015, Norma BS8900:2013 y GRI. Por otra parte, las herramientas otorgadas por la IHA proporcionan un enfoque apropiado, pero se encuentra configurado a centrales hidroeléctricas de mayor escala. Lo que traduce, es un alcance estrecho de aplicación, indicadores poco completos y de baja viabilidad

Bhandari et al. (2018) propone un modelo para la evaluación de la sostenibilidad para pequeñas centrales hidroeléctricas en la fase operativa. Este modelo incluye 54 indicadores que comprenden las dimensiones ambiental, social, económica y técnica y un sistema de puntuación de 1 a 5, siendo 5 la mejor. El sistema de escala lo implementaron de acuerdo con las recomendaciones del HSAP dadas por el IHA, y una ponderación de los indicadores de acuerdo con su importancia, ajustando los indicadores a una “ponderación dimensional” y a este tipo de proyectos. En su análisis, proponen que este modelo puede aplicarse para medir la sostenibilidad en pequeñas centrales, dando una base cuantitativa y cualitativa que permite la comparación entre este tipo de proyectos y una herramienta eficaz para la toma de decisiones. Cabe resaltar, que es este modelo fue implementado en la evaluación de la sostenibilidad de una central de 26 KW, en Nepal; donde los autores adaptaron los indicadores al contexto local.

Zhang et al. (2021) proponen un nuevo método llamado Método CCDS para evaluar la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, en base a 148 indicadores clasificados en cuatro categorías: ambiental, social, económico y técnico; y compuesto de cuatro pasos: i) construcción de un sistema de índices, ii) construcción de un modelo dinámico del sistema, iii) determinación de las ponderaciones de los índices y iv) evaluación integral de Análisis de Conjunto de Pares (SPA siglas en inglés). En su análisis el Método CCDS tiende a tener un mejor desempeño estadístico que el MCA y LCA, ambos modelos ampliamente utilizados para la evaluación de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas. Así mismo, este modelo enfatiza en la extracción de datos existentes en vez de la adquisición de nuevos datos, permitiendo una universalidad y promoviendo la evaluación de la sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos donde hay restricciones presupuestarias, garantizando precisión y economía, compensado la exactitud de la evaluación contra el costo. Adicionalmente, el contenido de sus herramientas es predictiva haciendo que el método maneje una gran flexibilidad. En resumen, esta propuesta es un método universal, flexible, científico y preciso para la evaluación de la sostenibilidad en centros hidroeléctricas.

2 METODOLOGÍA

Este trabajo comprende una investigación documental de tipo descriptiva, usando como método una revisión crítica sistemática de fuentes de información físicas y electrónicas de la literatura científica de mayor relevancia y alto impacto sobre la sostenibilidad y su aplicación en proyectos hidroeléctricos.

El procedimiento parte del levantamiento e identificación de los principales impactos y aspectos de sostenibilidad, en términos económicos, ambientales y sociales producto de las principales actividades en un proyecto hidroeléctrico, a partir de material bibliográfico de casos reportados en el país.

A partir de los aspectos de sostenibilidad identificados, se procede a determinar cuáles son los criterios de sostenibilidad recomendados por las directrices existentes y específicas en materia de evaluación de la sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos, las cuales son las propuestas por la Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA), la Comisión Mundial de Represas (WCD) y la Comisión del Río Mekong (MRC).

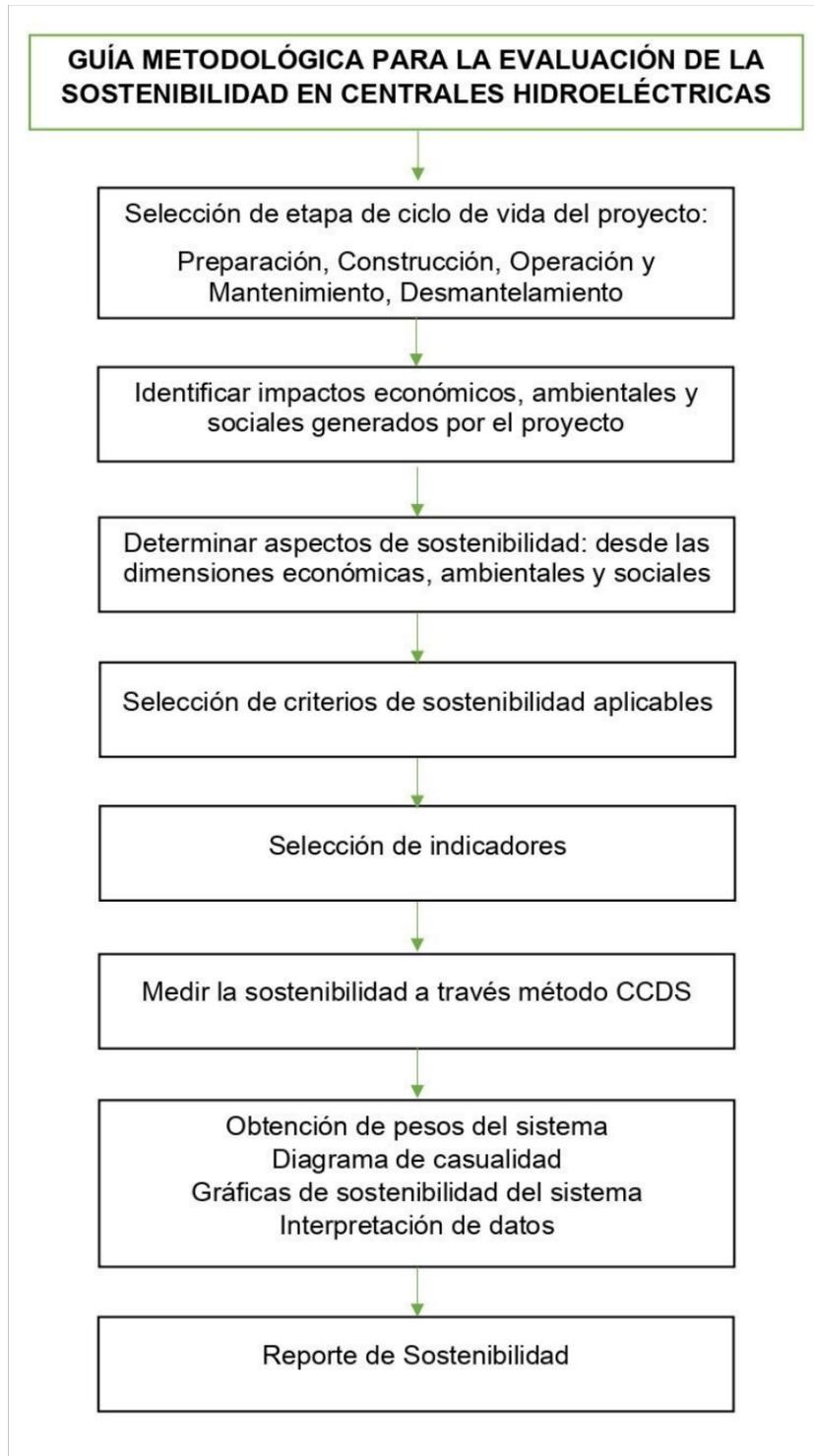
Ya contextualizados, en los aspectos y criterios de sostenibilidad en un proyecto hidroeléctrico, se presentan los indicadores para tener en cuenta en este sector y se explica el Método CCDS propuesto por Zhang et al. (2021). Este método, es el recomendado para evaluación de la sostenibilidad.

En este punto, ya se ha mostrado los aspectos, criterios, indicadores y como se mide la sostenibilidad en un proyecto hidroeléctrico. Por lo tanto, se procede al reporte de la sostenibilidad, a través de un análisis de las principales Herramientas de Reporte de la Sostenibilidad internacionales, como las GRI, Pacto Global, ODS, Estándares IFC, Estándares *AccountAbility*, SASB, ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 180001, y DJSJ, para adaptar y estructurar la presentación de los resultados obtenidos y la divulgación del desempeño de la sostenibilidad, a través de estas herramientas de gestión.

Adicionalmente, se exponen las herramientas de CDP, LEED y BIM, como opciones de soporte a la sostenibilidad reportada, desde aspectos de uso eficiente de los recursos y manejo de impacto. Y se presentan algunos aspectos a ser tenidos en cuenta a la hora de aplicar la guía al contexto colombiano.

Como resultado, se obtendrá como producto un informe técnico que brindará una guía paso a paso de cómo se debe de evaluar y reportar la sostenibilidad en proyecto hidroeléctrica en el contexto colombiano.

Ilustración 6. Diagrama de flujo de la guía metodológica para la evaluación de la sostenibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

2.1 ASPECTOS E IMPACTOS DE LA SOSTENIBILIDAD

A continuación, se realiza un listado de los aspectos e impactos sobre la sostenibilidad ocasionados por la generación de energía hidroeléctrica, siendo esta una revisión global y no específica de un caso estudio; Este listado se basa en los trabajos de .CORNARE (2011); Iglesias Carvajal (2011); Pracheil et al. (2019) y Rosso et al (2014). Cabe resaltar, que se presenta como una revisión amplificada de lo que se esperaría encontrar en todas las etapas del ciclo de vida de cualquier proyecto hidroeléctrico desde la perspectiva ambiental, social y económico-financiero y que los tantos los aspectos como los impactos depende de las características propias de cada proyecto.

Las siguientes actividades son las que mayor impacto inmediato tiene sobre los aspectos ambientales, sociales y económicos dentro de las etapas de preparación, ejecución y operación de proyectos hidroeléctrico:

- Inicio de proceso constructivo.
- Construcción de túnel de desvío.
- Desvío de los ríos.
- Inundación de terrenos.
- Llenado de embalse.
- Construcción de túneles civiles de la central hidroeléctrica.
- Construcción de la presa, casa máquinas y descargas.
- Generación de energía.
- Descarga de las aguas de generación aguas debajo de la presa.
- Instalación de líneas de transmisión.
- Desplazamiento de comunidades.
- Ahuyentamiento y captura de especies de fauna acuática y terrestre.
- Procesos de voladura.
- Desvío de vías de acceso de comunidades.
- Llegada de población no perteneciente a la zona, asociado al proyecto.
- Retiro de biomasa, y cobertura vegetal.
- Explotación de canteras y yacimientos.
- Construcción de zonas de rellenos.
- Construcción de campamentos e instalaciones temporales.
- Operación de equipos, maquinaria y vehículos de uso de combustible fósil.

A continuación, se describen los principales aspectos e impactos de las dimensiones ambiental, social y económica que se generan especialmente en las etapas de implementación y operación.

2.1.1 Aspectos e impactos económicos

A continuación, se describen los aspectos e impactos relacionados en el componente económico-financiero, los cuales analiza la viabilidad del proyecto en términos financieros, económicos y técnicos y los beneficios que este puede darle a los grupos de interés.

Tabla 1. Aspecto e Impacto Económicos

ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Viabilidad económica-financiera y beneficios del proyecto	La venta de energía provenientes de la generación de energía hidroeléctrica genera incentivos económicos, beneficios anuales promedios, ganancias anuales promedio, recuperación, rendimiento y retorno de la inversión a los Stakeholders, especialmente a propietarios, accionistas e inversores nacionales como internacionales.
Viabilidad económica-financiera y beneficios del proyecto	El aprovechamiento del recurso hídrico para la generación de energía hidroeléctrica ocasiona el pago por tasas de compensación, por tasas de regalías, y de externalidades generadas a la comunidad general y al estado colombiano
Viabilidad económica y técnica	La disminución de la oferta hídrica en el país ocasiona aumentos en los costos de inversión, disminución de la viabilidad de ejecución de proyectos hidroeléctricos futuros, aumento de costos operacionales, disminución de la tasa interna de retorno y de rentabilidad de los proyectos en construcción y operación.
Viabilidad económica y técnica	La escasez de oferta de energía hidroeléctrica en el país ocasiona pérdida de la utilidad pública, detención en el crecimiento del sector eléctrico, pérdida de relaciones y apoyo de Stakeholders, especialmente de inversión y apoyo en el mercado internacional.

Fuente: Elaborado a partir de CORNARE (2011); Iglesias Carvajal (2011); Pracheil et al. (2019) y Rosso et al. (2014).

2.1.2 Aspectos e impactos sociales

A continuación, se describen los aspectos e impactos relacionados en el componente social, en donde su afectación se ve en las comunidades pertenecientes al área de influencia directa e indirecta del proyecto.

Tabla 2. Aspectos e Impactos Sociales

ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Desplazamiento y reasentamiento de comunidades	El desplazamiento y reasentamiento de comunidades por la ejecución de proyectos hidroeléctricos, ocasiona pérdida, destrucción y/o trastorno del tejido social de comunidades campesinas, indígenas, afrodescendientes, rom y/o minoritarias
Uso múltiple del agua	La inundación y el llenado del embalse para poder realizar la generación de energía hidroeléctrica, afecta la solidez de las relaciones de la comunidad en temas paz y generación de conflictos entre las comunidades y los propietarios del proyecto asociados a disponibilidad y uso múltiples de agua presente y futura por otros usuarios.
Requisitos y cambios de uso de la tierra	La inundación y el llenado del embalse para poder realizar la generación de energía hidroeléctrica, ocasiona cambios en el uso del suelo, conllevando a afectaciones en las costumbres y percepción cultura de las poblaciones relacionadas a actividades económicas y de vocación.
Pérdida de patrimonio cultural	La inundación y el llenado del embalse para poder realizar la generación de energía hidroeléctrica, ocasiona alteraciones en la percepción del paisaje, por pérdida de patrimonio cultural/ hereditarios / arqueológico y/o propiedades históricas.
Afectación a la salud pública	La inundación y el llenado del embalse para poder realizar la generación de energía hidroeléctrica, ocasiona un aumento de enfermedades relacionadas con vectores atraídos por el espejo de agua.
Generación de empleo	La generación de empleo por la ejecución de proyectos hidroeléctricos ocasiona alteración y cambios en la estructura de la población, comportamientos demográficos, patrones de asentamiento, migración poblacional asociados a la busca de nuevas oportunidades laborales.
Generación de empleo	La generación de empleo por la ejecución de proyectos hidroeléctricos ocasiona alteración actividades productivas tradicionales de las generaciones presentes y futuras, de empresas locales, y creación de parejas marginales por aislamiento económico y social.
Generación de empleo	La generación de empleo por la ejecución de proyectos hidroeléctricos ocasiona alteración de la composición social de las comunidades de la zona, por accidentes y/o

ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
	incidentes asociados a la seguridad y salud ocupacionales del personal de la comunidad que participa en los procesos constructivos, operacionales y de mantenimiento del proyecto.
Calidad de servicios públicos de energía	La generación de energía hidroeléctrica ocasiona un aumento en la calidad de servicios públicos de energía por integración al sistema de interconexión nacional - sin, por aumento de cobertura y calidad de servicio de electricidad a las comunidades pertenecientes al área de influencia directa e indirecta de la ejecución de los proyectos hidroeléctricos.

Fuente: Elaborado a partir de CORNARE (2011); Iglesias Carvajal (2011); Pracheil et al. (2019) y Rosso et al. (2014).

2.1.3 Aspectos e impactos ambientales

A continuación, se describen los aspectos e impactos relacionados en el componente ambiental, estas son presentadas bajo los componentes de agua, suelo, aire, flora y fauna, y saneamiento básico.

Tabla 3. Aspectos e Impactos Ambientales

COMPONENTE	ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Componente agua	Enlace entre recurso hídrico y emisiones de carbono	La generación de energía hidroeléctrica ocasiona pérdida de integridad ecológica y disminución en la cantidad y calidad del recurso hídrico por alteraciones en el microclima de la región y regulación de los cuerpos de agua generados por el espejo de agua.
	Alteración régimen de flujo hídrico	El llenado de embalses para la generación de energía hidroeléctrica ocasiona un agotamiento del recurso hídrico por alteraciones en el régimen hídrico y variabilidad hidrológica aguas arriba y aguas abajo el proyecto.
	Pérdida de integridad ecológica y cantidad y calidad del recurso hídrico.	El llenado de embalses para la generación de energía hidroeléctrica ocasiona una pérdida de integridad ecológica y disminución en la cantidad y calidad del recurso hídrico por eutrofización de aguas superficiales especialmente del espejo de agua, aumento de pérdidas por transpiración,

COMPONENTE	ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
		alteraciones en la calidad, cantidad y disponibilidad de agua para otros usos, alteraciones de zonas aluviales.
	Cantidad y calidad del recurso hídrico	La captación de agua de los embalses a través de las bocatomas para la generación de energía hidroeléctrica provoca una depreciación del recurso, en cantidad de agua disponible para otros uso presentes y futuros.
	Alteraciones de las aguas de infiltración	Las alteraciones de las aguas de infiltración producto de las actividades de exploración, perforación y adecuación de túneles ligadas a las actividades de construcción de proyectos hidroeléctricos, ocasiona una alteración de patrones de escorrentía y drenaje de aguas superficiales, caudales ecológicos., reservas hidrológicas de aguas subterráneas y variabilidad hidrológica del área del proyecto.
Componente aire	Consumo de combustibles fósiles	El consumo de combustible fósil ocasiona un agotamiento de los recursos no renovables y ocasiona una disminución en la calidad del aire, por generación de GEI, de olores y uso de energías no renovables y contaminación de suelo por derrames de hidrocarburos provenientes de accidentes o incidentes ocasionados en las etapas de construcción, operación y mantenimiento.
	Generación de ruido y material particulado.	La generación de ruido y material particulado producto de los procesos de construcción y mantenimiento, especialmente por uso de maquinaria y equipos, actividades de voladuras y de excavación, entre otros; ocasionan un agotamiento al recurso aire.
	Consumo de energía eléctrica y emisión de GEI	El consumo de energía eléctrica ocasiona una disminución en la calidad del aire por la emisión de gases de efecto invernadero -GEI.
Componente suelo	Agotamiento de recursos no renovables	La generación de movimiento de suelo y rocas ocasiona un agotamiento de recursos no renovables por erosión del suelo, aumento de tasas de sedimentación y modificación de geotecnia y geomorfologías de la zona, por actividades propias de construcción.
	Agotamiento de recursos no renovables	La generación de material excedente de excavación – material estéril, ocasiona una disminución de la calidad del suelo y agotamiento

COMPONENTE	ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
		de recurso no renovables por formación de rellenos para el manejo de material estéril/ inerte aumentando las presiones sobre este recurso.
	Alteración de la calidad de suelos	La inundación de terrenos dados por las actividades de construcción de proyectos hidroeléctricos ocasiona una disminución de la calidad del suelo, por alteración en los parámetros fisicoquímicos del suelo y cambios en la geomorfología de los cauces, degradación de la calidad del suelo y afectación de tierras cultivables y/o propensas a aprovechamiento.
	Generación de sedimentos y lodos.	La generación de sedimentos asociados a limpieza y mantenimiento de los embalses ocasiona una afectación en los recursos suelo y agua, por alteración de la calidad de agua por modificación de parámetros fisicoquímicos como aumento de turbiedad y sólidos suspendidos total, y por formación de rellenos para el manejo de sedimentos y lodos.
	Generación suelos contaminados	La generación de suelos contaminados asociados a accidentes/incidentes ambientales por derrame de hidrocarburos, ocasiona un agotamiento del recurso suelo.
Componente flora y fauna	Pérdida de integridad ecológica y disminución de la capacidad ecosistémica	La remoción de cobertura vegetal y descapote, genera una disminución de la capacidad ecosistémica por destrucción de capa vegetal y descomposición de biomasa.
	Pérdida de integridad ecológica	La captación de agua por bocatoma para la generación de energía hidroeléctrica ocasiona un agotamiento y pérdida de la integridad ecológica por interrupción de paso de especies acuáticas, especialmente de peces y pérdida y/o afectación de comunidades hidrobiológicas – acuáticas.
	Pérdida de integridad ecológica	La alteración de ecosistemas por la ejecución de proyectos hidroeléctricos ocasiona un agotamiento y pérdida de la integridad ecológica por fragmentación de rutas migratorias y corredores ecológicos, pérdida de biodiversidad, y

COMPONENTE	ASPECTO / IMPACTO	DESCRIPCIÓN
		rompimiento de funciones y servicios ecosistémicos.
	Disminución de la capacidad ecosistémica	La generación de energía hidroeléctrica disminuye la capacidad ecosistémica, por ahuyentamiento y desplazamiento de especies de fauna, y cambios en patrones de comportamiento de especies flora y fauna
Componente saneamiento básico	Generación de residuos sólidos y líquidos: aprovechables, no aprovechables, biosanitarios, peligrosos y especiales.	La generación de residuos sólidos y líquidos aprovechables, no aprovechables, biosanitarios, peligrosos y especiales genera una contaminación a los recursos suelo, agua y aire, por disminución de vida útil de rellenos sanitarios, generación a lixiviados e incineración de estos.
	Generación de aguas residuales domésticas – ARD	La generación de aguas residuales domésticas – ARD por parte de personal relacionado a las actividades de construcción, operación y mantenimiento de los proyectos generados, ocasiona un agotamiento del recurso hídrico, por cantidad de agua empleada, tratamientos fisicoquímicos, y vertimientos.
	Consumo de agua potable	El consumo de agua potable por parte de los empleados y todo el personal relacionado a las actividades de construcción, operación y mantenimiento de los proyectos hidroeléctricos, ocasionan un agotamiento del recurso hídrico, por suministro, tratamiento y transporte de esta.
	Consumo de materia prima	El consumo de materias primas para ejecución del proyecto, tales como papelería, instalaciones temporales y permanentes civiles y eléctricas, de construcción de obras civiles, entre otros; ocasionan un agotamiento de los recursos suelo, forestal y agua, por explotación canteras, aprovechamiento forestal, uso de agua industrial, entre otros.

Fuente: Elaborado a partir de CORNARE (2011); Iglesias Carvajal (2011); Pracheil et al. (2019) y Rosso et al. (2014).

2.2 CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Los proyectos hidroeléctricos comparten una condición de no existir un proyecto típico, es decir, cada proyecto tiene condiciones ambientales, sociales y técnicas específicas. Obteniendo como resultado que, se generan impactos y relaciones únicas, dificultando lograr un manejo estandarizado y ser capaces de predecir la ocurrencia de estos. A raíz de esta característica, se han venido desarrollando diferentes estrategias y directrices para guiar a los desarrolladores de este tipo de proyectos a disminuir los impactos generados y conducir los procesos de cada una de las etapas del proyecto hacia una sostenibilidad.

Estas directrices o lineamientos plantean los criterios de sostenibilidad que se recomiendan ser tenidos en cuenta a la hora de tomar decisiones en el desarrollo y ejecución de proyectos hidroeléctricos. Cabe resaltar que, estas recomendaciones son de carácter no vinculante o voluntario, ya que no constituyen una legislación internacional y no obliga a ninguna institución a implementarlo, representando una gran desventaja especialmente ante las dimensiones socioambientales. A continuación, se presenta los criterios de sostenibilidad propuesto por un informe (WCD), una herramienta (RSAT) y un protocolo (HSAT) desarrollados específicamente para centrales hidroeléctricas.

2.2.1 Comisión Mundial de Represas (WCD)

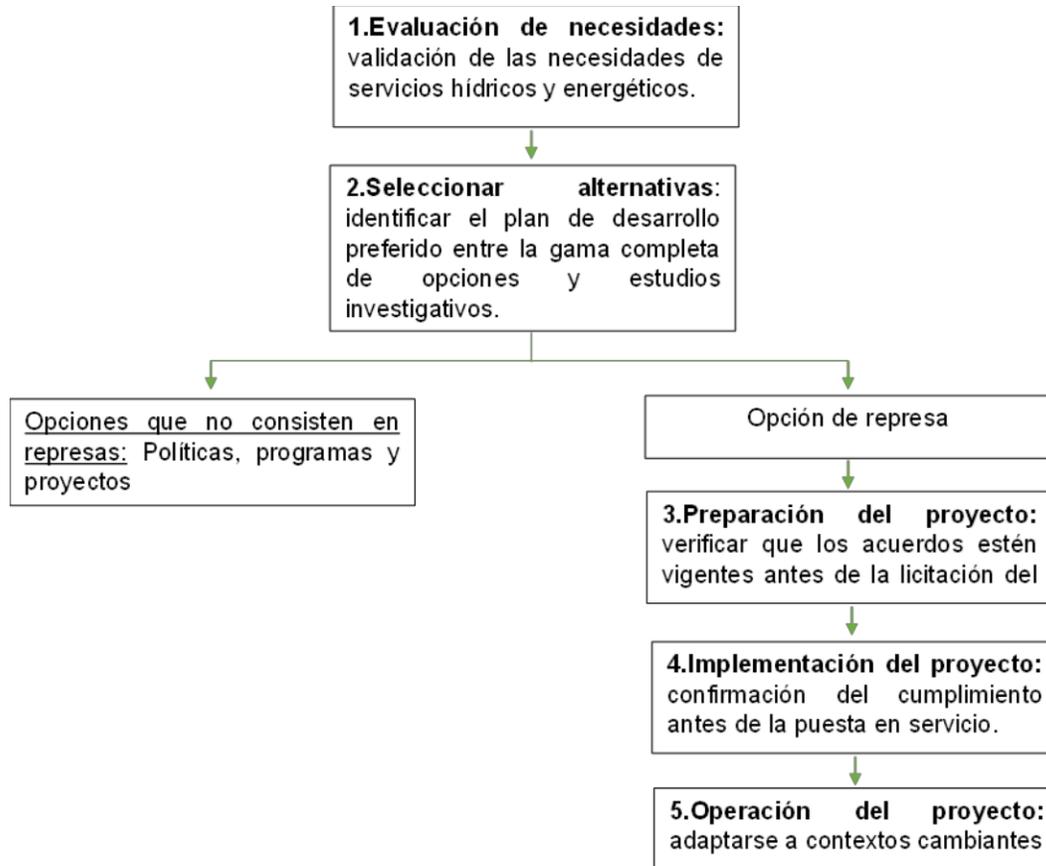
La Comisión Mundial de Represas (WCD siglas en inglés) presentó un informe en el que se evaluaron en diferentes casos de estudio el desempeño financiero, ambiental y social de las grandes represas. Así mismo, evaluó la eficacia del cumplimiento de los beneficios prometidos y de los efectos socioambientales ligados a este tipo de proyectos. Representa uno de los principales marcos utilizados para la evaluación de la sostenibilidad en grandes represas, sustentando que el desarrollo de este tipo de proyectos debe de ser en conjunto de una evaluación de riesgos y respetando los derechos de los actores involucrados durante el proceso (enfoque de “derechos y riesgos”), ayudó a equilibrar los costos y beneficios de las distintas partes interesadas en el proceso, a exigir reparaciones y promover alternativas (WCD, 2000).

De manera similar, presenta un proceso paso a paso para la toma de decisiones sobre el desarrollo hídrico y energético, basados en los principios de equidad, eficiencia, procesos de toma de decisiones participativa, sostenibilidad y rendimiento de cuentas. Tiene como objetivo proponer criterios y lineamientos para la planificación, diseño, diagnóstico, construcción, operación, monitoreo y desmantelamiento de las represas (WCD, 2000). Por lo tanto, propone:

- 5 etapas fundamentales para la toma de decisiones.
- 7 prioridades estratégicas.
- 26 lineamientos de buenas prácticas.

En la siguiente ilustración, se presenta el diagrama de flujo de las etapas fundamentales para la toma de decisión.

Ilustración 7. Etapas fundamentales para la toma de decisión.



Fuente: Tomado de Imhof et al. (2002).

Así mismo, se presenta los criterios de sostenibilidad recomendados por WCD, representado por estrategias y lineamientos de buenas prácticas a seguir en términos económicos, sociales, ambientales y técnicos.

Tabla 4. Criterios de sostenibilidad de WCD

No.	ESTRATEGÍAS	LINEAMIENTOS
1	Ganar la aceptación del público.	1. Análisis de los grupos de interés.
		2. Procesos de negociación de toma de decisiones.
		3. Consentimiento libre, previo e informado.

No.	ESTRATEGÍAS	LINEAMIENTOS
2	Evaluación integral de las opciones.	4. Evaluación estratégica del impacto por problemas ambiental, social, salud y patrimonio cultural.
		5. Evaluación de impacto a nivel de proyecto para cuestiones ambientales, sociales, sanitarias y de patrimonio cultural.
		6. Análisis multicriterio.
		7. Evaluación del ciclo de vida.
		8. Emisiones de GEI.
		9. Análisis de distribución de proyectos.
		10. Valoración de impactos sociales y ambientales.
3	Abordar las represas existentes	11. Mejora de la evaluación de riesgos económicos.
		12. Asegurar que las reglas de operación reflejen preocupaciones sociales y ambientales.
4	Sostenimiento de los ríos y los medios de subsistencia.	13. Mejora de operación de embalses.
		14. Encuestas de la línea base de ecosistemas
5	Reconocimiento de derechos y participación en los beneficios.	15. Evaluación de flujos ambientales.
		16. Mantenimiento de las pesquerías productivas.
		17. Condiciones de línea base social.
6	Garantizar el cumplimiento.	18. Análisis de riesgo de empobrecimiento.
		19. Implementación del Plan de Acción de Mitigación, Reasentamiento y Desarrollo.
		20. Mecanismos de distribución de beneficios del proyecto.
		21. Planes de cumplimiento.
		22. Paneles de revisión independientes para asuntos sociales y ambientales.
7	Compartir ríos para la paz, el desarrollo y la seguridad.	23. Fianzas de cumplimiento.
		24. Fondos fiduciarios.
		25. Pactos de integridad.
		26. Procedimientos para ríos compartidos.

Fuente: Comisión Mundial de Represas (WCD, 2000).

2.2.2 Comisión del Río Mekong (MRC)

La Comisión del Río Mekong (MRC siglas en inglés) propone la Herramienta de Evaluación Rápida de la Sostenibilidad de Hidroeléctricas en un contexto amplio de cuenca – RSAT, tiene como objetivos:

- Proporcionar una base común para el diálogo y la colaboración sobre la energía hidroeléctrica sostenible entre los actores clave.
- Destacar y priorizar áreas de riesgo y oportunidad de sostenibilidad

hidroeléctrica en una cuenca o subcuenca.

- Identificar las necesidades de creación de capacidades para promover la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica en la cuenca.

Reúne a los principales actores en una cuenca fluvial para la análisis estructurado y determinación de la sostenibilidad especialmente en directrices de diseño, sirviendo como herramienta complementaria al HSAP. Evalúa las dimensiones económica, social, ambiental y técnica, utiliza algunos métodos como el análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, y Amenazas, el diálogo de múltiples partes interesadas, puntuación basada en evidencia contra criterios, análisis de deficiencia y planificación de las acciones (MRC, 2010). Cabe resaltar que RSAT promueve más un dialogo entre las partes involucradas en la cuenca, incluyendo actores transfronterizos haciendo que la evaluación no recaiga en un único grupo responsable, sino sobre la capacidad, rendimiento, interacción y colaboración de una gama de actores clave, cada uno con diferentes roles. La herramienta comprende 11 temas y 53 criterios para la evaluación de la sostenibilidad de hidroeléctricas, los cuales son presentados a continuación.

Tabla 5. Criterios de sostenibilidad de MRC – RSAT.

No.	TEMA	CRITERIO
1	Energía hidroeléctrica y desarrollo económico en la cuenca / subcuenca	1. Contribución relativa de la energía hidroeléctrica a las economías nacionales.
		2. Contribución relativa de la energía hidroeléctrica a las economías locales.
		3. Sinergias y compensaciones con otros sectores económicos de la cuenca.
		4. Optimización del uso de agua múltiple.
2	Energía hidroeléctrica y bienestar social y cultural en la cuenca / subcuenca.	5. Valores culturales y usos no materiales de los recursos.
		6. Protección de los medios de vida y los derechos y prestaciones de acceso a la tierra y al agua
		7. Reasentamiento involuntario.
		8. Energía hidroeléctrica y avance social equitativo.
		9. Energía hidroeléctrica y reducción de la pobreza.
3	Energía hidroeléctrica y gestión de la calidad ambiental y de los recursos naturales en la cuenca / subcuenca.	10. Comprensión y protección de la integridad del ecosistema en toda la cuenca.
		11. Gestión de impactos ambientales hidroeléctricos.
		12. Protección de ríos de alto valor de desarrollo.
		13. Impacto de la energía hidroeléctrica en el uso sostenible de los recursos naturales.
		14. Impacto en la morfología, erosión y sedimentación de los ríos.
15. Monitoreo de cambios en la calidad ambiental como resultado de la energía hidroeléctrica.		
4	Evaluación de opciones y	16. Evaluación de opciones para servicios de agua y energía en la cuenca o ingresos por exportaciones.

No.	TEMA	CRITERIO
	alineación con acuerdos, políticas y planes nacionales, regionales e internacionales.	17. Alineación con acuerdos, políticas / planes regionales e internacionales y compromisos nacionales para el desarrollo de cuencas.
		18. Alineación con la planificación de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en la cuenca.
5	Selección y optimización del sitio, secuenciación y coordinación de múltiples proyectos.	19. Evaluación de criterios múltiples para la selección y optimización del sitio para múltiples proyectos en una cuenca o cascada.
		20. Protección de biodiversidad / hábitats únicos y sitios culturalmente significativos en la selección y diseño de sitios hidroeléctricos.
		21. Coordinación de la planificación para la implementación de la energía hidroeléctrica en una cuenca con múltiples objetivos.
		22. Coordinación de la planificación de operaciones dentro de un sistema de múltiples embalses o cascada.
6	Caudales ambientales y regulación aguas abajo.	23. Evaluación de caudal ambiental (EFA siglas en inglés).
		24. Provisión estructural y procedimientos operativos para la gestión de sedimentos y el lavado de sedimentos durante todas las etapas del proyecto.
		25. Provisión estructural y procedimientos operativos para la regulación del flujo aguas abajo, incluidas consideraciones transfronterizas.
		26. Mantener el flujo de limo rico en nutrientes
		27. Gestión de inundaciones y sequías y protección de llanuras aluviales.
		28. Esclusas de navegación y transporte fluvial.
7	Paso de peces y gestión de la pesca.	29. Comprensión y seguimiento de los recursos pesqueros.
		30. Política, regulaciones y prácticas para el manejo de peces en la energía hidroeléctrica.
		31. Provisión estructural y operativa para el paso de peces.
		32. Protección de las pesquerías río arriba y río abajo y desarrollo de las pesquerías de embalse.
8	Distribución de beneficios y uso de medidas de financiación innovadoras para la sostenibilidad (local y transfronteriza).	33. Compartir los beneficios del proyecto.
		34. Asignación equitativa de los recursos hídricos entre sectores y países.
		35. Pago por servicios ecológicos (PES siglas en inglés).
		36. Oportunidades de financiación del carbono para financiar medidas de sostenibilidad.
		37. Ingresos del proyecto para financiar medidas de sostenibilidad.
9	Provisión para seguridad y prevención y gestión de desastres.	38. Sistema de gestión de la seguridad de la presa (DSMS siglas en inglés).
		39. Coherencia a lo largo de la cuenca / cascada.
		40. Planes de preparación para emergencias (EPP siglas en inglés) y coordinación.

No.	TEMA	CRITERIO
		41. Ruptura de presa y otros análisis preparados para proyectos en cascadas.
		42. Gestión de inundaciones de emergencia.
10	Entorno institucional nacional y de toda la cuenca.	43. Energía hidroeléctrica sostenible: funciones y asignación de responsabilidades.
		44. Mecanismos de coordinación entre actores clave.
		45. Notificación transfronteriza, resolución de conflictos y comunicación
		46. Disposiciones de seguimiento, revisión y cumplimiento.
		47. Principios de sostenibilidad en los acuerdos hidroeléctricos.
		48. Planes de desarrollo de capacidades para agencias clave y organizaciones y comités de cuencas fluviales (RBO / RBC siglas en inglés).
11	Comunicación, participación de las partes interesadas de la cuenca y de la comunidad y apoyo para el desarrollo hidroeléctrico.	49. Comunicación estratégica y concienciación sobre la energía hidroeléctrica sostenible: principios y prácticas.
		50. Participación y representación informadas en la toma de decisiones hidroeléctricas en todas las etapas del ciclo del proyecto.
		51. Intercambio de información y acceso a datos e informes.
		52. Apoyo comunitario a nivel de cuenca para la energía hidroeléctrica.
		53. Integración de operaciones en la gestión de cuencas hidrográficas / cuencas hidrográficas.

Fuente: Herramienta de Evaluación Rápida de la Sostenibilidad de Hidroeléctricas en un contexto Amplio de Cuenca – RSAT (MRC, 2010).

2.2.3 Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA)

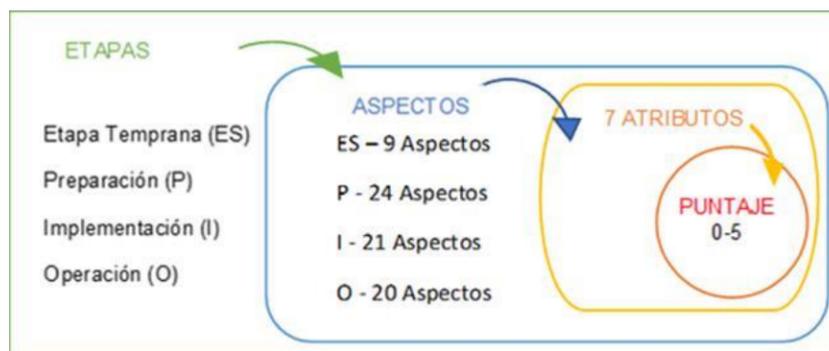
La Asociación Internacional de Hidroeléctricas (IHA siglas en inglés) propone tres herramientas que define, mide y evalúan la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, Ver Capítulo 6. Estas herramientas buscan evaluar la sostenibilidad en todo el ciclo del proyecto, desde una etapa temprana y preparación hasta de implementación y operación comprendiendo las dimensiones económica, social, ambiental y técnica, y la interacción o sinergia entre las fases.

El Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad en Hidroeléctricas – HSAP, es una guía específica y es la principal herramienta para evaluar la sostenibilidad en las etapas de preparación, implementación u operación; En la etapa temprana ayuda y filtra las alternativas. El HSAP ofrece una instantánea, es decir un perfil de sostenibilidad en un momento dado de acuerdo con la gestión realizada y ofreciendo las recomendaciones para medición del desempeño futuro. Cabe destacar que, en todo el proceso de evaluación de las diferentes etapas del ciclo de vida de los

proyectos hidroeléctricos, el HSAP, considera como temas transversales y de alto perfil para una adecuada evaluación de sostenibilidad, los siguientes: corrupción, género, mecanismo de reclamación, gestión integral de recurso hídrico, problemas heredados, medios de subsistencia, proyectos multipropósito, problemas transfronterizos y transparencia (IHA, 2020c).

La evaluación considera cuatro ETAPAS como parte del ciclo de vida de un proyecto hidroeléctrico, las cuales son: Etapa Temprana (ES), Preparación (P), Implementación y Operación (O). Cada una de las etapas se analizará desde cuatro perspectivas Ambiental, Social, Técnico y Económico-Financiero; estas perspectivas establecen los ASPECTOS, que son las condiciones claves de sostenibilidad, compuesto de la siguiente manera: 9 aspectos para la etapa ES, 24 aspectos para la etapa P, 21 aspectos para la etapa I y 20 aspectos para la etapa O. Cada uno de los ASPECTOS serán evaluados por un máximo de 7 ATRIBUTOS o componentes de puntaje: 1) Calidad del proceso de evaluación; 2.) Calidad del proceso de gestión de planeación; 3) Calidad proceso de consulta; 4) Nivel de soporte de Stakeholders; 5) Nivel de cumplimiento; 6) Nivel de conformidad con los planes y 7) Nivel de efectividad. Cada uno de los ATRIBUTOS recibirá un puntaje de calificación de escala de 0 a 5, caracterizados de la siguiente manera: Puntaje 0 - muy escaso; Puntaje 1 - escaso/muy limitado; Puntaje 2 - menos que satisfactorio; Puntaje 3 - satisfactorio; Puntaje 4 - bueno o muy bueno y Puntaje 5 - sobresaliente / fuerte/exhaustivo. Ver Ilustración 1 (IHA, 2020c).

Ilustración 8. Esquema general de evaluación de sostenibilidad de un proyecto hidroeléctrico.



Fuente: Elaboración propia a partir de Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad en Hidroeléctricas (IHA, 2020).

A continuación, se presentan los criterios de sostenibilidad que toma en cuenta por etapa del ciclo del proyecto.

Tabla 6. Criterios de sostenibilidad del HSAP.

ES - ETAPA TEMPRANA	P - PREPARACIÓN	I - IMPLEMENTACIÓN	O - OPERACIÓN
ES-1 Necesidad demostrada.	P-1 Consulta y comunicaciones.	I-1 Consulta y comunicaciones.	O-1 Consulta y comunicaciones.
ES-2 Evaluación de opciones.	P-2 Gobierno.	I-2 Gobierno.	O-2 Gobierno.
ES-3 Políticas y planes.	P-3 Necesidad demostrada y adecuación estratégica.	I-3 Gestión de cuestiones ambientales y sociales.	O-3 Gestión de cuestiones ambientales y sociales.
ES-4 Riesgos políticos.	P-4 Localización y diseño.	I-4 Gestión integrada de proyecto.	O-4 Recurso hídrico.
ES-5 Capacidad institucional.	P-5 Evaluación y gestión de impactos ambientales y sociales.	I-5 Seguridad de la infraestructura.	O-5 Confiabilidad y eficiencia de activos.
ES-6 Cuestiones y riesgos técnicos.	P-6 Gestión integrada de proyecto.	I-6 Viabilidad financiera.	O-6 Seguridad de infraestructura.
ES-7 Cuestiones y riesgos sociales.	P-7 Recurso hídrico.	I-7 Beneficios del proyecto.	O-7 Viabilidad financiera.
ES-8 Cuestiones y riesgos ambientales.	P-8 Seguridad de la infraestructura.	I-8 Adquisiciones.	O-8 Beneficios del proyecto.
ES-9 Cuestiones y riesgos económicos y financieros.	P-9 Viabilidad financiera.	I-9 Comunidades y medios de vida afectados por el proyecto.	O-9 Comunidades y medios de vida afectados por el proyecto
	P-10 Beneficios del proyecto.	I-10 Reasentamiento.	O-10 Reasentamiento.
	P-11 Viabilidad económica.	I-11 Pueblos indígenas.	O-11 Pueblos indígenas.
	P-12 Adquisiciones.	I-12 Condiciones de trabajo y empleo.	O-12 Condiciones de trabajo y empleo.
	P-13 Comunidades y medios de vida afectados por el proyecto.	I-13 Patrimonio cultural.	O-13 Patrimonio cultural.
	P-14 Reasentamiento.	I-14 Salud pública.	O-14 Salud pública.
	P-15 Pueblos indígenas.	I-15 Biodiversidad y especies invasoras.	O-15 Biodiversidad y especies invasoras.
	P-16 Condiciones de trabajo y empleo.	I-16 Erosión y sedimentación.	O-16 Erosión y sedimentación.

ES - ETAPA TEMPRANA	P - PREPARACIÓN	I - IMPLEMENTACIÓN	O - OPERACIÓN
	P-17 Patrimonio cultural.	I-17 Calidad del agua.	O-17 Calidad del agua.
	P-18 Salud pública.	I-18 Residuos, ruido y calidad del aire.	O-18 Gestión del embalse.
	P-19 Biodiversidad y especies invasoras.	I-19 Preparación y llenado de embalse.	O-19 Régimen de flujo aguas abajo.
	P-20 Erosión y sedimentación.	I-20 Régimen de flujo aguas abajo	O-20 Cambio climático, mitigación y resiliencia.
	P-21 Calidad del agua.	I-21 Cambio climático, mitigación y resiliencia.	
	P-22 Planeación del embalse.		
	P-23 Régimen de flujo aguas abajo.		
	P-24 Cambio climático, mitigación y resiliencia.		

Fuente: Tomado de (IHA, 2021b).

Las Directrices de Sostenibilidad de la Energía Hidroeléctrica sobre las Buenas Prácticas Industriales Internacionales – HGIIP, es un manual de referencia de buenas prácticas internacionales para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos y es una herramienta complementaria al HSAP y a su vez es una alternativa de menor costo ante una evaluación completa del HSAP. Este manual define 26 procesos en concordancia a los siguientes 6 criterios: Cobertura de la evaluación del proyecto, Gestión, Compromiso de grupos de interés, Apoyo de los grupos de interés, Conformidad/cumplimiento y Resultados (IHA, 2020b). Estos procesos son los tomados como asuntos o criterios de sostenibilidad para planificar, implementar y operar proyectos hidroeléctricos, los cuales se presentan a continuación.

Ilustración 9. Criterios de sostenibilidad del HGIP



Fuente: Elaboración a partir de HGIP (IHA, 2020b).

El Análisis de Brechas Ambientales, Sociales y Gobernanza en la Sostenibilidad de Hidroeléctricas - HESG. Es un plan de acción que permite identificar, evaluar y abordar las brechas existentes en los requisitos ambientales, sociales y gobernanza en relación con las buenas prácticas internacionales de los proyectos hidroeléctricos y es una herramienta complementaria al HSAP. El HESG toma en cuenta 12 criterios de rendimiento de acuerdo las normas de desempeño ambiental y social de la Corporación Financiera Internacional (IFC) y del marco ambiental y social del Banco Mundial (IHA, 2020a). Estos criterios de rendimiento o sostenibilidad son presentados a continuación.

Ilustración 10. Criterios de sostenibilidad del HESG.



Fuente: Elaboración propia a partir de HESG (IHA, 2020a).

Como se mencionó anteriormente, en el trabajo realizado por Gómez Romero et al (2020) se analizó las propuestas por WCD, RSAT y HSAP, y a través del método AHP, determinó que el HSAP es el modelo de desarrollo sostenible más apropiado para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica con una ponderación de 11.3%, el modelo de RSAT con 9.4% y WCD con 8.95%. Sin embargo, cabe resaltar que según Lyon (2020) una evaluación completa del HSAP puede llegar a tener valores promedio entre US \$100.000 - \$200.000, y contabilizando valores internos por la logística que se requiere para realizar la evaluación como transporte, traslados, alojamiento, acreditadores, y características del proyecto, como tamaño, ubicación, y etapa a evaluar; Los valores pueden llegar a tener un promedio de US \$750.000 y con un costo de tiempo en promedio de 100 días, dependiendo de la etapa del proyecto a evaluar. Mientras que una evaluación solo del HGIIIP en promedio puede ser entre US\$ 25.000 – \$ 50.000 con una duración de 20 días, dependiendo de la etapa del proyecto a evaluar. A continuación, se presenta un resumen de estas propuestas.

Tabla 7. Resumen de WCD, MRC e IHA.

ÍTEM	WCD	RSAT - MRC	IHA - HSAP
Tipo	Informe / Evaluación Externa	Herramienta / Evaluación Externa	Protocolo / Evaluación Externa
Dimensiones	Económico, Social, Ambiental, Técnico	Económico, Social, Ambiental, Técnico	Económico, Social, Ambiental, Técnico
Carácter	No vinculante - voluntario	No vinculante - voluntario	No vinculante - voluntario
Enfoque	Desarrollar criterios y pautas aceptables para la planificación, construcción, operación y desmantelamiento de represas. Evaluar el riesgo y respetar los derechos de los actores claves.	Análisis estructurado de temas de sostenibilidad de una cuenca fluvial y diseñado para apoyar el dialogo y planificación entre los actores claves.	Analiza la sostenibilidad desde la perspectiva del ciclo del proyecto. Crea una herramienta de evaluación operando bajo las recomendaciones WCD.
Criterios de sostenibilidad	5 etapas de toma de decisión, 7 estrategias, 26 lineamientos	11 estrategias, 53 criterios	HSAP: Etapa temprana 9 aspectos, Preparación 24 aspectos, Implementación 21 aspectos, Operación 20 aspectos. HGIIIP: 26 procesos HESG: 12 criterios.

ÍTEM	WCD	RSAT - MRC	IHA - HSAP
Ventajas	<p>-Sigue siendo el estado del arte respecto de los impactos socioambientales de la hidroeléctrica y como mejorar el desempeño del sector.</p> <p>-Sustenta la evaluación de riesgo y respetar los derechos de los actores durante el proceso.</p>	<p>- Promueve la mejora continua y sirve como herramienta complementaria al HSAP.</p> <p>-Promueve las interrelaciones transfronterizas y con ello la integración regional sostenible y funciones ecológicas.</p>	<p>-Guía específica para las fases de los proyectos.</p> <p>-Aspectos evaluados teniendo en cuenta la sinergia entre las dimensiones.</p> <p>-Incluye la gobernanza de la sostenibilidad, como un tema de naturaleza integradora, y transversal a otras perspectivas del protocolo.</p>
Observaciones	<p>- Su enfoque es hacia los actores claves, y su propuesta encamina hacia reparación de daños y evaluación de alternativas en una etapa de preparación más que un manejo sostenible durante la operación de las centrales existentes.</p>	<p>-Replica el enfoque completo y estructura del Protocolo IHA.</p> <p>- No incluye una lista de todas las cuestiones relativas a la sostenibilidad de las cuentas de las hidroeléctricas.</p> <p>- Se enfoca más en el marco del dialogo de las partes y no en resolver los impactos ocasionados ni en el desempeño de la sociedad.</p>	<p>-Tiene variaciones dependiendo de la etapa del ciclo de vida en la que se encuentre. – El proceso de evaluación es altamente intensivo en temas de requerimiento de personal, tiempo y costo. – privilegia el concepto de expertos y se le critica la ausencia de un enfoque participativo que incluya a las personas afectadas.</p>

Fuentes: Elaborado a partir de (Azócar et al., 2015; IHA, 2020b, 2020a, 2020c, 2021c; Imhof et al., 2002; MRC, 2010; Polanco et al., 2016; Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017; WCD, 2000)

2.3 GUÍA METODOLOGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

2.3.1 Indicadores

Como anteriormente se mencionó, el trabajo realizado por Zhang et al. (2021) se propone un nuevo método para la evaluación de la sostenibilidad de centrales hidroeléctricas, el método CCDS, esta propuesta se basa en la selección de 148 indicadores, producto de la revisión de literatura, los cuales tienen las características de ser los de mayor relevancia y de mayor facilidad de disponibilidad.

Los indicadores presentados a continuación, son la guía para levantar los datos, minería de datos existentes, según su disponibilidad y ajustarlos de acuerdo con las características de la región y del proyecto a evaluar. Cabe resaltar que, el método CCDS hace énfasis en datos existente más que en levantar nuevos datos, por lo tanto, entre mayor sea la cantidad de indicadores disponibles, comprendidos en la siguiente lista o no, mayor será el alcance y la precisión, lo cual refleja su característica de flexibilidad y universalidad.

2.3.1.1 Indicadores económicos

De los 148 indicadores, 30 corresponden a indicadores económicos (20.3%) que son aplicables al sector hidroeléctrico y medibles. Los cuales se describen a continuación:

Tabla 8. Indicadores económicos según Método CCDS.

No.	INDICADOR ECONÓMICO	No.	INDICADOR ECONÓMICO
1	Recreación	16	Capital y costo operativo
2	Turismo	17	Disponibilidad de recursos
3	Navegación	18	Minería
4	Eficiencia	19	Agricultura
5	Costo de electricidad	20	Seguridad
6	sequía y protección contra inundaciones	21	Periodo de desarrollo
7	construcción y costo de mantenimiento	22	Reducción de la dependencia de energía importada
8	Riego	23	Demanda de energía
9	Beneficios de suministro de agua	24	Incentivos
10	Costo de salud	25	Beneficio anual
11	Esperanza de vida	26	Periodo de amortización
12	Creación de empleo	27	Costo nivelado de la electricidad
13	Mitigación costosa	28	Servicio confiable
14	Tasa interna de retorno	29	Tecnología probada
15	Valor actual neto	30	Desarrollo regional

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zhang et al., 2021).

2.3.1.2 Indicadores sociales

De los 148 indicadores, 39 corresponden a indicadores sociales (26.4%) que son aplicables al sector hidroeléctrico y medibles. Los cuales se describen a continuación:

Tabla 9. Indicadores Sociales según Método CCDS

No.	INDICADOR SOCIAL	No.	INDICADOR SOCIAL
1	Reasentamiento	21	Problemas de recurso hídrico
2	Creación de empleo	22	Obstáculo jurídico
3	Salud humana	23	Infraestructura
4	Tráfico	24	Agricultura
5	Migración	25	Capacidad innovadora
6	Colonización	26	Participación y percepción pública
7	Diversidad y vitalidad	27	Impacto funcional y estético
8	Capital producido	28	Conflicto y potencial catastrófico
9	Inversión	29	Pérdida de medios de vida e identidad cultural
10	Recreación	30	Abastecimiento de agua
11	Riego	31	Pesca
12	Sitios de patrimonio	32	Tasas de compensación
13	Beneficios compartidos	33	Actividades empresariales
14	Desplazamiento	34	Zona marginal
15	Niveles de vida	35	Preferencia de los grupos de interés
16	Impacto visual	36	Riesgo de suministro externo
17	Aceptación pública	37	Cohesión comunitaria
18	Protección contra sequías e inundaciones	38	Angustia psicológica
19	Seguridad	39	Accesibilidad
20	Uso de la tierra		

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zhang et al., 2021).

2.3.1.3 Indicadores ambientales

De los 148 indicadores, 58 corresponden a indicadores ambientales (39.2%) que son aplicables al sector hidroeléctrico y medibles. Los cuales se describen a continuación:

Tabla 10. Indicadores Ambientales según Método CCDS

No.	INDICADOR AMBIENTAL	No.	INDICADOR AMBIENTAL
1	Pérdida de biodiversidad	30	Disposición de residuos
2	Migración de peces	31	Malezas acuáticas
3	Deforestación	32	Emisiones de metano

No.	INDICADOR AMBIENTAL	No.	INDICADOR AMBIENTAL
4	Emisión	33	Lluvia ácida
5	Residuos	34	Vida acuática
6	Uso de la tierra	35	Nivel freático
7	Deslizamiento de tierra	36	Condición morfológica
8	Erosión	37	Escombros
9	Fertilidad de suelos y salinidad	38	Paso de peces
10	Régimen hidrológico	39	Desviación
11	Calidad del agua	40	Sólidos suspendidos
12	Sedimentación	41	Calentamiento global
13	Inundación	42	Recursos subterráneos
14	Emisiones evitadas	43	Paisaje
15	Actividad sísmica	44	Peligros
16	Condiciones topográficas e hidrobiológicas	45	Áreas protegidas
17	Ecosistemas	46	Caudal ambiental
18	Contaminación	47	Descarga al río
19	Pesca	48	Costos ambientales
20	Calidad del aire	49	Mitigación
21	Consumo de agua	50	Productividad
22	Cambio climático	51	Alteración ecológica
23	Oxígeno Disuelto (DO) y pH	52	Impacto en la cadena alimentaria
24	Hábitat	53	Interrupción en el flujo natural
25	Temperaturas del agua	54	Inmersión
26	Macroinvertebrados	55	Evitar agotamiento de los recursos no renovables
27	Patrones de flujo y cantidad	56	Vida silvestre
28	Colapso de la orilla del río	57	Extinción de especies
29	Polvo y ruido	58	Enlodamiento

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zhang et al., 2021).

2.3.1.4 Indicadores técnicos

De los 148 indicadores, 21 corresponden a indicadores técnicos (14.1%) que son aplicables al sector hidroeléctrico y medibles. Los cuales se describen a continuación:

Tabla 11. Indicadores técnicos según Método CCDS

No.	INDICADOR TÉCNICO	No.	INDICADOR TÉCNICO
1	Eficiencia	12	Periodo de desarrollo
2	Flexibilidad	13	Transmisión
3	Respuesta a la demanda	14	Capacidad de reserva
4	Almacenamiento	15	Longitud del río
5	Arranque autónomo	16	Productividad

No.	INDICADOR TÉCNICO	No.	INDICADOR TÉCNICO
6	Construcción	17	Descarga
7	Pendiente	18	Altura de admisión
8	Alineación	19	Tipología
9	Flujo	20	Cabeza
10	Capacidad instalada	21	Volumen de la estructura
11	Disponibilidad accesibilidad		(Factibilidad,

Fuente: *Elaboración propia a partir de (Zhang et al., 2021).*

2.3.2 Método CCDS

El método CCDS³ proporciona una guía útil para la evaluación de la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, este método universal, flexible, científico y preciso. Enfatiza la extracción de datos existentes más que el descubrimiento de nuevos datos otorga un índice escalable y predecible, y proporciona una solución para gobiernos con diferentes limitaciones presupuestales para que puedan evaluar la sostenibilidad y puedan compensar entre precisión y costo. A continuación, se describe los pasos para la evaluación de la sostenibilidad hidroeléctrica por el método CCDS.

Paso 1: Construcción del sistema de índices

Se deben de hallar todos los indicadores disponibles para realizar la evaluación. Los indicadores disponibles determinan el límite superior de la precisión y el costo de la evaluación, es decir entre más indicadores mayor precisión y costo. En caso de que no se utilicen todos los indicadores, se deben examinar teniendo en cuenta la dimensión de los datos, la operación, el apoyo teórico, el efecto del modelo, entre otros aspectos.

El sistema de índices tiene una característica de no linealidad e incertidumbre. Por lo tanto, este se debe de ajustar a través de un método de red neural artificial. Por tal motivo se utiliza el índice de Valor Medio de Impacto (MIV siglas en inglés) que permite probar el rendimiento de las redes neurales a través del principio de análisis de sensibilidad de la teoría de incertidumbre, en donde se cambia el grado de las variables independientes hasta generar una nueva función, organizando el grado de influencia de mayor a menor, y seleccionando la variable independiente con la mayor influencia como la reserva. Sin embargo, se presentan dos desventajas: 1. La inexactitud es causada por el signo y 2. La variable independiente se cambia más o menos el 10% y luego toma un valor promedio, lo que lo hace sesgado. Por

³ Las siglas proceden de tomar la letra inicial de cada paso a seguir del método (en inglés).

consiguiente, para corregir esta desventaja se utiliza los siguientes métodos de mejora:

1. Se debe de agregar una red neural de regresión general (GRNN siglas en inglés), permitiendo un análisis de regresión no lineal, con la capacidad de mapeo no lineal, estructura de red flexible, con alta tolerancia a fallas y robustez. Poniendo a disposición un sistema de índices de evaluación flexible, que hace controlable la escala y la precisión, y coste de la evaluación (Ec.1).

$$\hat{Y}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_i)^T \cdot (x-x_i)}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x-x_i)^T \cdot (x-x_i)}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

$\hat{Y}(X)$ Es la contraparte de la muestra de sostenibilidad hidroeléctrica en el modelo, es la salida de la red y es la estimación de densidad no paramétrica de las variables aleatoria x e y . Donde x_i es una observación de la muestra de la variable aleatoria x , y_i es una observación de la muestra de la variable aleatoria y , n es en el tamaño de la muestra, σ es el coeficiente de anchura de la función gaussiana.

En la capa modelo, el número de neuronas es igual al número de muestras de aprendizaje. El número de neuronas en la capa de salida es igual al número de dimensiones del vector de salida en la muestra de aprendizaje. Siendo y_i la función de salida (Ec. 2, 3 y 4):

$$y_i = \frac{S_{Nj}}{S_D} \therefore j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

En donde:

$$S_{Nj} = \sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot P_i \therefore P_i = \exp\left[-\frac{(x - x_i)^T \cdot (x - x_i)}{2\sigma^2}\right]; i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$S_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

S_D es la función de transferencia de la suma aritmética, S_{Nj} es la función de transferencia de la suma ponderada, P_i es la función de transferencia de neuronas en la capa de modo, x es la red de variables de entrada, x_i es la muestra de aprendizaje correspondiente a la neurona i th.

2. Mejorar el cálculo tradicional del MIV a través de la siguiente formula (Ec.5):

$$IMIV(i) = \sqrt{\sum_{k=0}^4 (y_i^{0.9+0.05k} - y)^2} \quad (5)$$

Paso 2: Construcción del Modelo de Dinámica de Sistemas (*SD Model*).

El propósito del modelo de dinámica de sistemas (SD siglas en inglés) es minar las relaciones internas de las dimensiones económica, social, ambiental y de tecnología (ESET siglas en inglés) para mejorar la ponderación del índice, obteniendo el resultado ideal para poder realizar una comparación y con ello, volver objetivo lo subjetivo del peso de los indicadores. Cabe resaltar que, al proporcionar una base sólida para la ponderación permite realizar predicciones. A continuación, se describe los pasos a seguir:

1. Definir los límites de la composición del sistema. Como el sistema ESET tiene múltiples entradas y salidas, la composición necesita ser analizada de acuerdo con las características regionales y las necesidades que se tienen.
2. Construir diagramas de causalidad (CLD siglas en inglés) y diagramas de flujo del sistema (SFD siglas en inglés). Debido a la necesidad de encontrar la relación causal entre cada variable (indicador) y las rutas críticas del sistema. En el cual, el CLD representa la correlación de sistemas y estructura de retroalimentación, determinando el alcance del modelo SD, y el SFD compensa las deficiencias CLD y refleja el proceso específico de gestión y control del proceso.
3. Determinar los principales parámetros y ecuaciones del modelo. Las fórmulas matemáticas de obtienen de acuerdo con la descripción de las relaciones causales internas del ESET.
4. Realizar simulación computacional y chequeo de validación. El modelo es testeado en aplicabilidad, robustez y sensibilidad utilizando la prueba de software y de datos históricos. Si el error de ajuste entre el resultado de la simulación y el valor real es pequeño, el modelo SD tiene una buena eficacia y se puede usar como base fiable para determinar el peso del índice y para predicciones.

Paso 3: Determinar peso de índices

El algoritmo está basado en el método de cálculo de matriz por Procesos de Análisis Jerárquico (AHP siglas en inglés) y la importancia relativa de los índices es calculado por la técnica de simulación Monte Carlo (MC). El AHP determina el peso de los índices según la lógica de juicio capa por capa y la MC utiliza tecnología informática para realizar múltiples muestreos y simular el cálculo de la distribución de probabilidad.

Por lo tanto, se asume las funciones de densidad de probabilidad de todos los indicadores disponibles y se genera N grupos de números aleatorios, se compara el orden de cada indicador en cada grupo con el resultado ideal obtenido en el modelo SD, para obtener un índice preciso de probabilidad de fallo y confiabilidad. Así, a través del análisis y múltiples simulaciones, se obtiene las puntuaciones relativas de los indicadores, y el peso del índice de acuerdo con las reglas de cálculo de AHP.

Paso 4: Evaluación integral de Análisis de Conjunto de Pares – SPA (Set Pair Analysis)

Con los pasos anteriores ya se obtiene un complejo sistema de índices de evaluación de hidroeléctricas que incluye capa de subsistemas, capa de características estructurales y capa de índices y peso. Sin embargo, representaría un índice de sostenibilidad que no ilustraría los aspectos de mejora; Por tal motivo, se añade una evaluación integral de análisis de conjunto de pares (SPA siglas en inglés).

El SPA describe la relación de incertidumbre entre dos conjuntos usando conceptos de grado idéntico, grado de diversidad y grado opuesto. En donde, se obtiene el grado de asociación entre dos conjuntos calculando el valor específico de los tres grados, y luego se toma el valor máximo como resultado de la evaluación según la comparación del grado de asociación de cada nivel.

1. Determinar los criterios de nivel para la evaluación. Por lo tanto, se establecen los límites del sistema con la siguiente formula (Ec.6 y7):

$$C_{xi} = [minC_x + (i - 1)K_x, minC_x + iK_x] \quad (6)$$

En donde,

$$\therefore K_x = \frac{maxC_x - minC_x}{5} ; i = 1,2, \dots, 5 \quad (7)$$

C_x es la serie de tiempo de un determinado indicador, C_{xi} es el límite superior o inferior de los grados del intervalo, K_x es el intervalo promedio.

2. Comparar el grado de asociación calculado de cada nivel, el valor máximo es el nivel del sistema. Para determinar el grado de asociación de cada uno de los niveles, se utiliza las siguientes ecuaciones (Ec.8,9, y 10):

$$\mu(W)_1 = \begin{cases} \frac{C_x}{C_{k1}} + \frac{(C_{k1}-C_x)}{C_{k1}} \cdot \frac{(2C_x-C_{k1})}{C_{k1}} & C_x \in [0, C_{k1}) \\ 1 & C_x \in [C_{k1}, C_{k2}) \\ \frac{C_{k2}}{C_x} + \frac{(C_x-C_{k2})}{C_x} \cdot \frac{(2C_x-C_{k2}-C_{k3})}{(C_{k2}-C_{k3})} & C_x \in [C_{k2}, C_{k3}) \\ -1 & C_x \in [C_{k3}, +\infty) \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu(W)_i = \begin{cases} \frac{C_x}{C_{ki}} + \frac{(C_{ki}-C_x) \cdot (2C_x-C_{ki}-C_{k,i-1})}{C_{ki} \cdot (C_{ki}-C_{k,i-1})} - 1 & C_x \in [0, C_{k,i-1}) \\ \frac{C_{k,i+1}}{C_x} + \frac{(C_x-C_{k,i+1}) \cdot (2C_x-C_{k,i+1}-C_{k,i+2})}{C_x \cdot (C_{k,i+1}-C_{k,i+2})} - 1 & C_x \in [C_{k,i-1}, C_{ki}) \\ & C_x \in [C_{ki}, C_{k,i+1}) \quad \therefore i = 2,3,4 \\ & C_x \in [C_{k,i+1}, C_{k,i+2}) \\ & C_x \in [C_{k,i+2}, +\infty) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu(W)_5 = \begin{cases} \frac{C_x}{C_{k5}} + \frac{(C_{k5}-C_x) \cdot (2C_x-C_{k5}-C_{k4})}{C_{k5} \cdot (C_{k5}-C_{k4})} - 1 & C_x \in [0, C_{k4}) \\ \frac{C_{k6}}{C_x} + \frac{(C_x-C_{k6}) \cdot (5C_{k6}-4C_x)}{C_x \cdot C_{k6}} - 1 & C_x \in [C_{k4}, C_{k5}) \\ & C_x \in [C_{k5}, C_{k6}) \\ & C_x \in [C_{k6}, 1.5C_{k6}) \\ & C_x \in [1.5C_{k6}, +\infty) \end{cases} \quad (10)$$

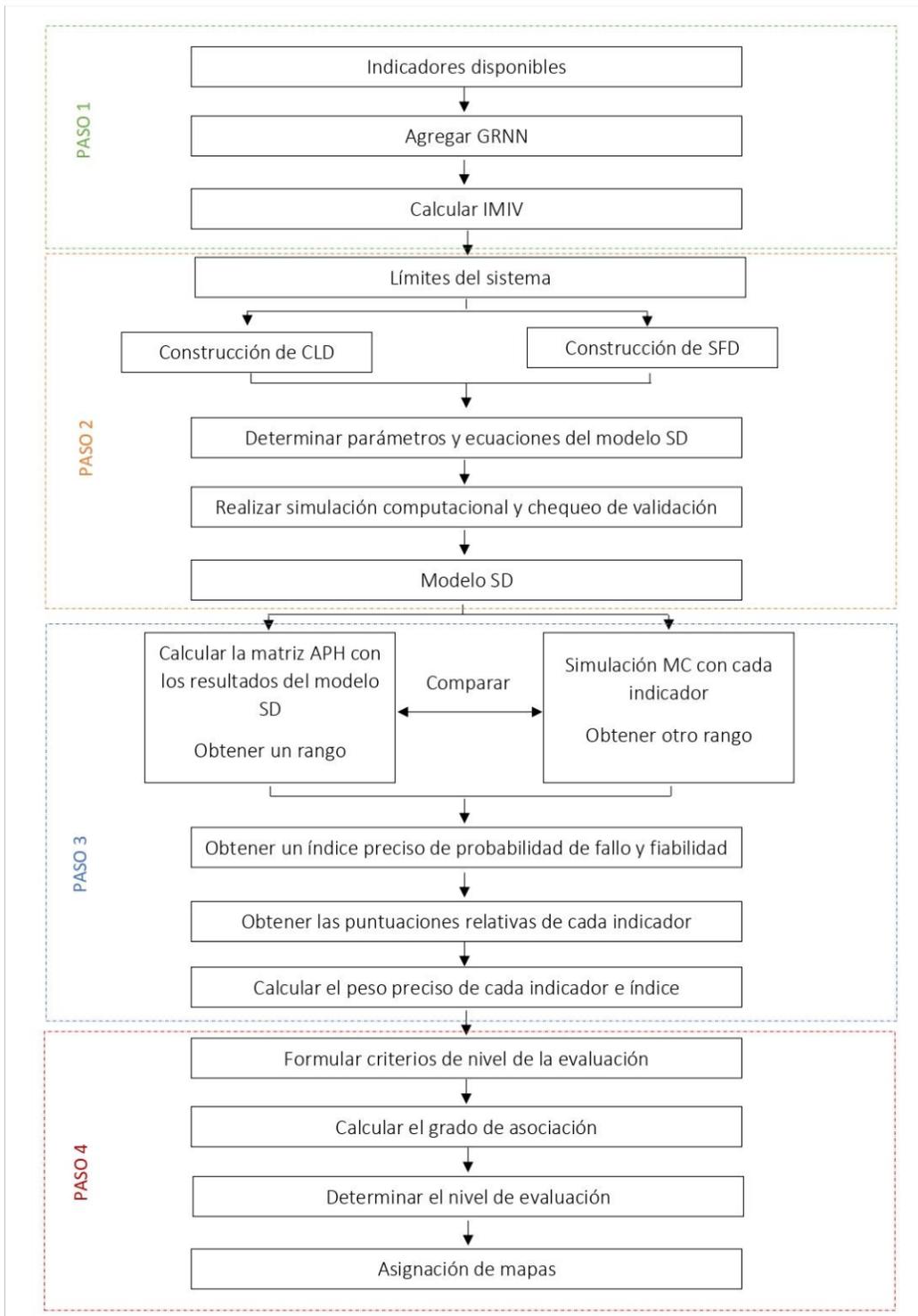
$\mu(W)_i$ representa el grado de asociación entre la variable y el nivel ith. Así mismo, el grado de asociación entre un determinado sistema y un determinado nivel es igual a la suma del grado de asociación entre todos los indicadores del sistema y del nivel. Comparando el grado de asociación calculado de cada nivel, el valor máximo es el nivel del sistema. Se calcula el grado de asociación entre un sistema y el nivel ith (Ec.11):

$$\mu_{sistema}(W)_i = \sum_{k=1}^n \mu_{sistema,k}(W)_i \quad (11)$$

Finalmente, se realiza la asignación de mapas, calculando la nueva posición de coordenadas del grado de asociación del indicador y el sistema (Ec.12):

$$X_i^{\mu(W)} = U_i + \frac{\mu(W)_i}{1} \cdot (U_{i+1} - U_i) \wedge X_i^{\mu(W)} = U_i + \frac{\sum_{i+1}^n \mu(W)_i}{1} \cdot (U_{i+1} - U_i) \quad (12)$$

Ilustración 11. Diagrama de flujo Método CCDS



Fuente: Elaboración propia a partir de Zhang et al. (2021).

3 REPORTES DE SOSTENIBILIDAD

Los reportes de sostenibilidad ofrecen a las partes interesadas toda la información clara y estandarizada de las actividades ejecutadas procedentes de las dimensiones económicas, sociales y ambientales. De igual manera, permite que las organizaciones comprendan, comuniquen y gestionen mejor su contribución a los ODS otorgando resultados demostrables que sirvan como mecanismo de mejoramiento interno, ya que al evaluar la sostenibilidad pueden comprender, cuantificar y mejorar la gestión realizada. Al implementar las SRT hacen que se este reporte se convierta en una fuente de información fiable, transparente y legítima, que abre las puertas hacia nuevas oportunidades de negocio y éxitos en el mercado.

Como se mencionó en el capítulo 1.4.1, las SRT están compuestas por visión, estrategia, estructura y sistema de gestión, aspectos, indicadores, calificación y clasificaciones de sostenibilidad. Una SRT puede ser un marco, un estándar o un índice. Donde los marcos, son un conjunto de directrices para la divulgación de la sostenibilidad, los estándares detallan los requisitos y especificación para lograr los esfuerzos de sostenibilidad, y los índices o calificaciones, son los informes de terceros del desempeño en materia de sostenibilidad (Siew, 2015) . En la siguiente tabla, se presentan los SRT de mayor implementación en el sector de energías renovables a nivel internacional.

Debido a lo anteriormente descrito, los reportes de sostenibilidad no son estandarizados, ya que son determinados por los aspectos, indicadores, materialidad, y calidad de datos seleccionados. En otras palabras, no hay estandarización de criterios, terminología y metodología propuesta, dificultando la comparabilidad en el desempeño de la sostenibilidad, ya que se puede prestar para interpretación subjetiva de los intereses de las partes interesadas y ocultar prácticas reales por buscar implementar la herramienta que otorgue mejor calificación y con ello, incrementando la incertidumbre en la evaluación de la sostenibilidad (Siew, 2017).

Adicionalmente, se percibe la combinación de más de un tipo de SRT en el reporte de sostenibilidad de una organización, por ejemplo, usan una SRT de marco como estructura y una de tipo estándar como desempeño de las actividades gestionadas. Traduciéndose, en que cada organización otorga diferentes pesos a los criterios de análisis, obteniendo diferentes sistemas de puntaje y reportando los resultados en diferentes estructuras. Así mismo, las organizaciones no sólo están combinando SRT internacionales sino también nacionales, ligadas a propuestas de políticas nacionales de gobernanza. Teniendo como resultado, un panorama complejo para analizar la información (Escrig-Olmedo et al., 2010).

Tabla 12. Herramientas de Reporte de Sostenibilidad -SRT

SRT	TIPO	DESCRIPCIÓN	ENFOQUE	USO	COMPOSICIÓN
Iniciativa de Reporte Global - Guía G4 (GRI siglas en inglés)	Marco	Proporciona estándares confiables y utilizados en la presentación de informes de sostenibilidad para la toma de decisiones.	Comprender y comunicar el impacto del negocio en cuestiones críticas de sostenibilidad.	Guía global para la presentación de informes de sostenibilidad.	3 categorías: económica 4 aspectos, ambiental 12 aspectos, social 30 aspectos (prácticas laborales y trabajo digno, derechos humanos, sociedad y responsabilidad sobre productos)
Pacto Global	Marco	Promueve 10 principios aceptados en términos de derechos humanos, laborales y ambientales, y lucha contra la corrupción.	Marco de acción que facilita la legitimación social de los negocios y los mercados.	Herramienta de autoevaluación de sostenibilidad.	45 preguntas con un conjunto de 3 a 9 indicadores para cada pregunta
Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS)	Marco	Define prioridades de desarrollo sostenible a nivel mundial, aspiraciones y esfuerzos para objetivo y metas en común.	Ayudar a las empresas a alinear sus estrategias con los ODS y medir y gestionar su contribución.	Guía para la implementación de ODS.	5 pasos: entendimiento de ODS, definición de prioridades, establecer objetivos, integración, reporte y comunicación.
Estándares de desempeño IFC	Estándar	Proporciona orientación para identificar riesgos e impactos socioambientales, incluye la participación de las partes involucradas y obligaciones de divulgación del cliente en relación con las	Ayudar a evitar, mitigar y gestionar los impactos los riesgos e impactos como una forma de negocio de manera sostenible	El cliente debe cumplir con las normas de desempeño durante todo el ciclo de inversión de la IFC.	8 normas de desempeño: riesgos e impactos, trabajo y condiciones laborales, eficiencia del uso de recursos, salud y seguridad, adquisición de tierras y reasentamiento, conservación de la

SRT	TIPO	DESCRIPCIÓN	ENFOQUE	USO	COMPOSICIÓN
		actividades del proyecto.			biodiversidad, pueblos indígenas y patrimonio cultural.
Estándares AccountAbility AA1000	Estándar	Normas técnicas y guías para establecer sistemas de gestión asociados a la sostenibilidad.	Evaluar, atestiguar y fortalecer la credibilidad y calidad del informe de sostenibilidad. Aseguramiento de la sostenibilidad Y mejoramiento de las condiciones laborales en el mundo	Herramienta de responsabilidad social corporativa.	Auditorías externas / tres principios: inclusividad, capacidad de respuesta y materialidad.
Junta de estándares de contabilidad de sostenibilidad (SASB siglas en inglés)	Estándar	Establecer normas de sostenibilidad basadas en la industria, reconocimiento, divulgación de material ambiental, social y gobierno.	Divulgación de información de sostenibilidad de importancia financiera por parte de las empresas a sus inversores.	Desarrollo de indicadores clave de rendimiento de la sostenibilidad e Identifica problemas de importancia financiera.	26 temas de sostenibilidad bajo cinco dimensiones de sostenibilidad: ambiente, capital social, capital humano, modelo de negocios e innovación, liderazgo y gobernabilidad.
ISO 9001	Estándar	Proporciona requisitos para la gestión de calidad en una empresa, con un enfoque basado en procesos.	Referencia de procesos de satisfacción de necesidades del cliente y cumplimiento de requisitos legales y reglamentarios.	Certificación por tercero para regular los Sistemas de Gestión de la Calidad	Auditoría externa e interna / bases de soporte, operación, evaluación del desempeño y mejora.
ISO 14001	Estándar	Proporciona requisitos para la gestión del ambiente, pero no niveles de rendimiento.	Referencia común en la comunicación de criterios ambientales, para satisfacer la demanda de los consumidores y	Certificación por tercero para regular el Sistema de Gestión Ambiental	Auditoría externa e interna / procedimientos, formalización, implementación de programas de riesgo y funcionamiento, revisión,

SRT	TIPO	DESCRIPCIÓN	ENFOQUE	USO	COMPOSICIÓN
			agencias gubernamentales con mayor responsabilidad ambiental.		control, ensayos de emergencias y acciones correctivas.
OHSAS 18001 /ISO 45001:2018	Estándar	Especificación internacional de seguridad y salud ocupacional en el trabajo.	Planificación para la identificación de peligros, evaluación de riesgos, formación, sensibilización y competencia Control operativo, de seguimiento y mejora	Certificación por tercero para regular el Sistema de Gestión de Seguridad y salud ocupacional.	Auditoría externa e interna / gestión de riesgo, gestión de contratistas, mejora continua, información documentada.
Estándares Británicos BS8900	Estándar	Proporciona un esquema para incorporar un enfoque sistémico a la sustentabilidad en las prácticas diarias y en la toma de decisiones de la empresa.	Integración de manera eficaz y rentable de principios de sostenibilidad en organizaciones comerciales y no comerciales.	Certificación por tercero de implementación de sostenibilidad corporativa.	Auditorías externas internas / prácticas de integración
Índice de Sostenibilidad Dow Jones (DJSI)	índice	Identifica y clasifica las principales empresas sostenibles	Evaluar la sostenibilidad por medio de un cuestionario basado en las dimensiones: ambiental, social y económico, con diferentes pesos específicos dependiendo de la empresa.	Estímulos a la atención de aspectos de responsabilidad ambiental en las empresas – sostenibilidad corporativa, y medición del desempeño.	Analiza más de 600 variables en factores económicos, ambientales, sociales y de gobernanza.

Fuente: Elaborado a partir de (GRI et al., 2015; IFC, 2012; ISO, 2018; Kinderyte et al., 2010; Siew, 2015).

Cabe aclarar que, reconocen que los estándares internacionales aportan control a la organización y ayudan a superar las barreras de incorporación de la sostenibilidad. Sin embargo, de este modo se enfatiza más en los atributos del negocio más que el relacionamiento con los grupos de interés. Factor que se reconoce como una de las principales causas del conflicto entre las comunidades y la ejecución de este tipo de proyectos, ocasionando pérdida en la legitimidad del negocio y alta sensibilidad ante la postura de los directivos, y con ello, a la “voluntariedad” de reportar el desempeño de la sostenibilidad (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Así mismo, el uso de modelo como las normas ISO, son herramientas de ciclo cerrado que presentan dificultadas en el alcance y aplicación debido que sólo demuestran mejoras en el manejo de aspectos e impactos ambientales, de seguridad o calidad, pero no en un verdadero indicador del mejoramiento en el desempeño global de la organización (Torres Romero, 2012). Además, estas normas no son suficientes para diseñar, implementar y evaluar la estrategia de sostenibilidad, ya que es altamente sensible a especificaciones del entorno y no están representadas en el estándar (Polanco et al., 2016).

Cabe resaltar que, otro de los estándares internacionales de sostenibilidad más relevantes es el Índice de Sostenibilidad Dow Jones (DJSI siglas en inglés), el cual es un estímulo a la competencia que lleva a las empresas reconocidas a mantenerse en la sostenibilidad, evaluando su desempeño actual e incluyendo nuevas iniciativas en este ámbito. Tiene como ventajas que considera algunas relaciones entre las dimensiones, permite la comparación con otras empresas y posibilita encontrar brechas y oportunidades de mejora para contribuir con la sostenibilidad de la empresa. Sin embargo, el indicador de gobierno corporativo se encuentra inmerso dentro de la dimensión económica, lo cual hace que se trate de un indicador de desempeño más que en uno de gobernanza de la sostenibilidad (Polanco et al., 2016; Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Por lo general, este índice se implementa cuando las organizaciones ya realizan reportes de sostenibilidad y son consideradas como sostenibles, empleándose para mantener esta cualidad y su cotización en el mercado.

Por otra parte, los GRI son una guía para la elaboración de informes de sostenibilidad, que se basa en los principios para determinar el contenido y la calidad. Se enfoca en las dimensiones económica, ambiental y social. Teniendo como ventajas que la identificación de los temas ambientales y su aplicación mediante la Guía GRI G4 siendo más específico el reporte de la sostenibilidad al sector energético. Así mismo, apuntado a estandarizar los reportes de sostenibilidad par que sean equiparables a reportes financieros en términos de credibilidad y comparabilidad. Sin embargo, presenta como desventaja que las dimensiones las toma por separado y no toma en cuenta sus interacciones, y los que los resultados son limitados, dado que no refleja una sensibilidad al contexto geográfico de los proyectos (Polanco et al., 2016; Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa,

2017). A continuación, se presenta las generalidades de la metodología GRI para la elaboración de informes de sostenibilidad.

Tabla 13. Generalidades Metodología GRI.

ÍTEM	CONTENIDO
Principios para determinar el contenido	<ul style="list-style-type: none"> -Participación de los grupos de interés -Contexto de sostenibilidad -Materialidad -Exhaustividad
Principios para determinar la calidad	<ul style="list-style-type: none"> -Equilibrio -Comparabilidad -Precisión -Puntualidad -Claridad -Fiabilidad
Declaración de conformidad	<ul style="list-style-type: none"> -Esencial -Exhaustiva
Contenidos básicos generales	<ul style="list-style-type: none"> -Estrategia y análisis -Perfil de la organización -Aspectos materiales y cobertura -Participación de los grupos de interés -Perfil del informe -Gobierno -Ética e integridad
Contenidos básicos específicos	<ul style="list-style-type: none"> -Directrices para la información sobre el enfoque de gestión -Directrices para los indicadores y la información específica sobre el enfoque de gestión: Económicos (13 indicadores), Ambiental (32 indicadores) y Desempeño social (prácticas laborales y trabajo digno. Derechos humanos, Sociedad, Responsabilidad sobre productos: 40 indicadores)
Motivos de omisión	<ul style="list-style-type: none"> -No procede -Confiabilidad -Prohibiciones jurídicas -Información no disponible

Fuente: Obtenido de GRI (2013b, 2013a).

Según la Superintendencia Financiera de Colombia (2021), las empresas publican informes de sostenibilidad bajo marcos reconocidos internacionalmente, siendo el GRI el más usado, ocasionando que esta SRT haya influenciado en los temas y tipos de indicadores sobre las cuales las empresas están divulgando su desempeño en asuntos sociales, ambientales y de gobernanza, y así mismo, en la estructura de los informes. Se realiza hincapié en que, estos informes reportan la sostenibilidad, en un estado actual, y su desempeño, con respecto a un estado anterior y hacia un

futuro de acuerdo con las metas propuestas y estrategias adquiridas. En otras palabras, proporciona información progresiva y continua de un estado más que de un hecho final de sostenibilidad, es decir, una instantánea para tomar decisiones.

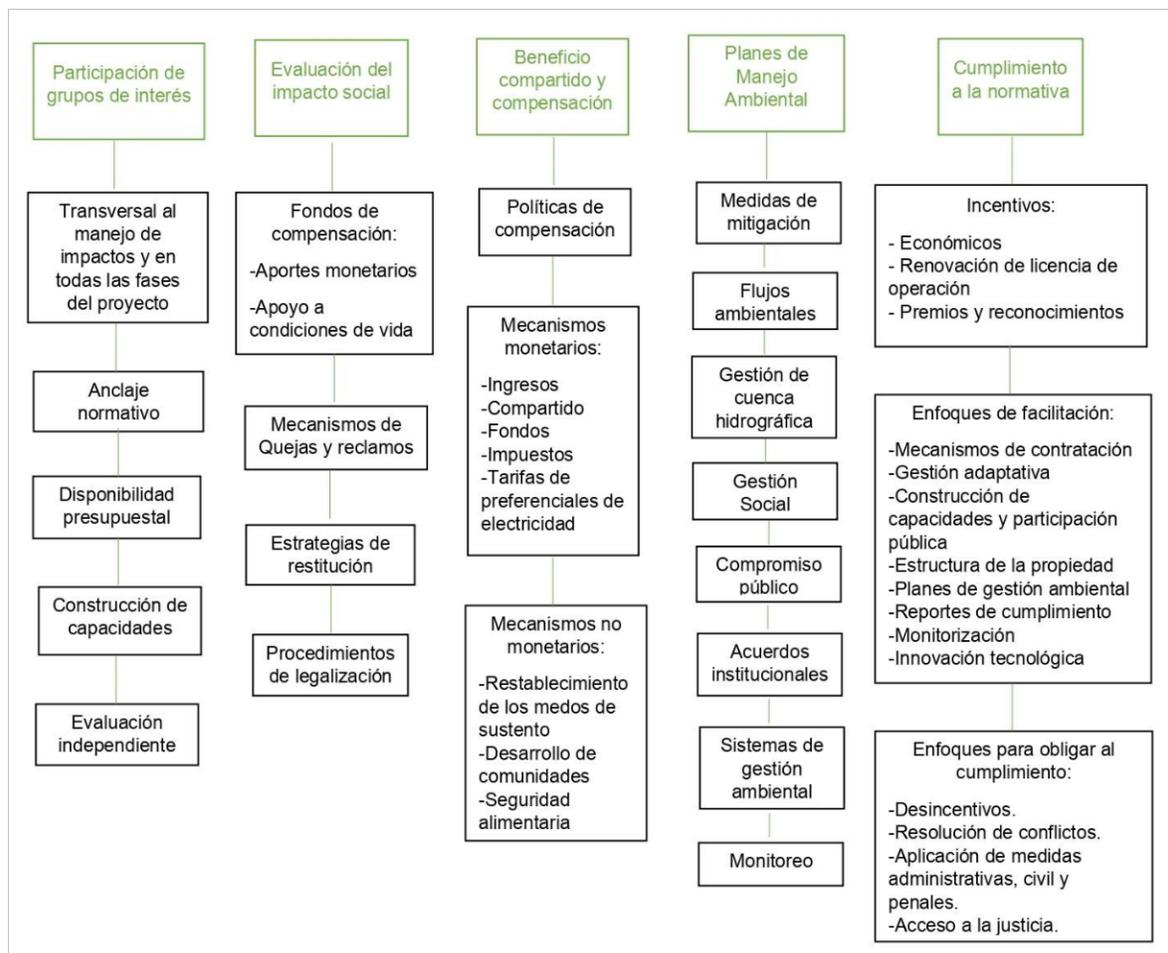
El reporte de sostenibilidad deberá regir bajos principios estratégicos, conectividad, materiales, deberá ser conciso, confiable y comparable. Y deberá de contener mínimo los siguientes temas (Pérez, 2021):

- Identificación de impactos económicos, ambientales y sociales generados por el proyecto.
- Manejo de los impactos generados por el proyecto. En la siguiente ilustración, se muestran los componentes de las prácticas de gestión a los impactos generados en una central hidroeléctrica, en los componentes de participación de grupos de interés, evaluación del impacto social, beneficio compartido y compensación, planes de manejo ambiental y cumplimiento a la normatividad (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017).
- En consecuencia, de consulta con los grupos de interés, se identificará los aspectos y criterios de sostenibilidad y materiales.
La materialidad, refleja los impactos económicos, ambientales y sociales significativos, identifica los problemas críticos que afecta a la organización e influencia las evaluaciones y decisiones de los grupos de interés. Su determinación se debe de realizar a través de análisis cualitativo, evaluación cuantitativa y discusión de los resultados, para que su selección vaya direccionado a las estrategias de sostenibilidad deseada y propuesta, y que sean relevantes para los grupos de interés. Los asuntos claves para tener en cuenta en la selección de materialidad son: estrategia, universalidad, medición para la acción, especificidad, diversidad, relatividad, verdadera importancia, disparidad, propia sociedad, grupos de interés materiales, heterogeneidad, y prioridad.
- Construcción de la base de planeación, gestión, divulgación y relacionamiento con los grupos de interés.
- Selección y evaluación de indicadores.
- Medición evaluación del estado de sostenibilidad, en un estado actual, y su desempeño, con respecto a un estado anterior y hacia un futuro de acuerdo con las metas propuestas y estrategias adquiridas.
- Medición del desempeño y contribución de las actividades de la organización hacia los ODS.
- Determinación de aspectos de mejora y las estrategias de para su corrección.
- Índice de seguimiento al desempeño de la sostenibilidad.

Se recomienda que, la construcción del reporte de sostenibilidad sea basado en un sistema de medición adaptado a las necesidades reales del proyecto, como lo proporciona el método CCDS, su estructura deberá seguir las recomendaciones dadas por los grupos de interés, especialmente en cuestiones de materialidad. Así mismo, de acuerdo con los análisis obtenidos en los informes de sostenibilidad,

evaluar la posibilidad de integración con otras SRT tanto internacionales como estándares e índices, como nacionales.

Ilustración 12. Manejo de los impactos generados en una Central Hidroeléctrica



Fuente: Modificado a partir de lo presentado en el Proyecto de Embalses y Desarrollo (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017; UNESCO 2017).

Por último, se destacan tres herramientas que pueden contribuir tanto al desempeño como a los atributos de sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos, especialmente en las etapas de construcción, operación y mantenimiento. Estos sistemas al ser certificables pueden presentarse como evidencia al nivel de sostenibilidad reportado y, por lo tanto, de verificación de la sostenibilidad. El primero, son los Proyectos para la Divulgación de Carbono (CDP siglas en inglés) para validar las acciones para reducir las emisiones de CO₂ y para medir los impactos generados, y con ello, la gestión realiza a los mismos. El segundo, la metodología de Modelado de la Información de Construcción (BIM siglas en inglés) que fortalece la toma de decisiones de manera inmediata con respecto a evaluación

de potenciales riesgos, eficiencia y aprovechamiento de recursos, materiales y diseño, especialmente en las etapas de preparación y construcción. Y en tercero, la certificación en Liderazgo de Energía y Diseño Ambiental (LEED siglas en inglés) de válida los beneficios e impactos positivos por realizar la construcción en un enfoque sostenible.

Tabla 14. Herramientas de evidencia de sostenibilidad.

ÍTEM	CDP	BIM	LEED
DESCRIPCIÓN	Sistema de reporte de sostenibilidad de alcance mundial, permite a las empresas medir y gestionar sus impactos ambientales	Método de trabajo colaborativo para recolección de datos y facilitar la gestión de proyectos de construcción, consiguiendo mejoras en el resultado y eficacia de procesos.	Sistema de construcción ecológica de todo tipo de edificios, en todas las fases de construcción, incluido construcción nueva, equipamiento interior, operaciones, mantenimiento, núcleo y cubierta.
ENFOQUE	Referencia mundial de tratamiento de datos sobre huella de carbono y clasifica a las empresas según la reducción de emisiones de CO2 y medición de impactos ambientales de sus acciones	Referente para la toma de decisiones a lo largo del desarrollo del proyecto, desde una fase de diseño hasta la construcción e instalación, llevando a cabo proyectos de manera global e integrada. Y constituye una base para certificaciones en construcción sostenible.	Referencia para crear edificaciones que contribuyan a reducir el cambio climático, mejorar la salud humana y calidad de la comunidad, proteger y restaurar recursos hídricos, de biodiversidad y servicios ecosistémicos y promover ciclos de materiales sostenibles y regenerativos.
USO	Proporciona un sistema de informes globales, de información de organizaciones y ciudades sobre: riesgos de cambio climático, oportunidades, estrategias y rendimiento, e impacto a los recursos naturales.	Proporciona un modelo 3D vinculado a bases de datos y geometrías, proporcionando transparencia en la información.	Proporcionan certificado e insignias que avala un sistema de gestión de rendimiento y proyectos de edificios ecológicos, con triple resultado ante personas, el planeta y las ganancias.

ÍTEM	CDP	BIM	LEED
COMPOSICIÓN	Mediante puntuación proporciona una instantánea de la divulgación y el desempeño ambiental de una empresa. Puntuación obtenida por cuestionarios en cambio climático, bosques y seguridad hídrica. Y 4 niveles: Divulgación, Conciencia, Gestión, Liderazgo.	Mediante el modelo y el uso de herramientas de ingeniería de estructuras y arquitectura, se realiza seguimiento a los proyectos de manera global y se desarrolla parámetros para la toma de decisiones.	Mediante puntuación por adherencia al proyecto requisitos de carbono, energía, agua, desechos, transporte, materiales, certificación de salud y calidad ambiental interior. 4 niveles de certificación: certificado (49 puntos), plata (50-59 puntos), oro (60 a 79 puntos) y platino (80 puntos)
OBSERVACIÓN	Alineada con Grupo de Trabajo para Divulgaciones Financieras relacionadas con el clima (TCFD) y estándares ambientales. Y de Datos comparables en todo el mercado	Alineado con criterios de sostenibilidad por reducir costos y errores, aumenta la productividad, mejora el acceso a la información y reduce conflictos, uso eficiente de recursos generando reducción de residuos, eficiencia en uso de agua y energía.	Alineados con criterios de sostenibilidad, ahorra costos, mejora eficiencia, reduce emisiones de carbono, crean lugares saludables

Fuente: Elaborado a partir de (ALLPLAN, 2022; CDP, 2023; EDINFRA, 2021; USGBC, 2022).

4 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA GUÍA EN COLOMBIA Y EXPERIENCIAS

La guía metodológica para la evaluación de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas propuesta se debe de considerar los siguientes aspectos al momento de su aplicación al caso colombiano.

Como se ilustra, una vez determina la etapa de ciclo del proyecto a la que se realizará la evaluación de sostenibilidad, se procede a la identificación de los impactos económicos, ambientales y sociales generados por el proyecto y se determinan los criterios de sostenibilidad aplicables a ese ciclo de vida. Una vez realizados estos pasos, se procede a la selección de los indicadores y construcción del sistema para el cálculo a través del método CCDS.

Donde la selección de estos indicadores debe de ser de acuerdo con la disponibilidad, cantidad, calidad de datos que se tenga acceso. Adicionalmente, estos datos deben de tener continuidad en el tiempo seleccionado que abarque la etapa del ciclo de vida del proyecto a evaluar. Para ejemplificar, se trae a colación el estudio del caso presentando en el trabajo de Zhang et al. (2021), al cual se le hizo la evaluación de sostenibilidad a la etapa construcción de una central hidroeléctrica, la cual tuvo una duración de 18 años en ejecutarse y, por lo tanto, los indicadores seleccionados fueron evaluados en ese mismo periodo de tiempo

En esta situación, las empresas dueñas o los participantes directos de los proyectos hidroeléctricos no tendrán grandes dificultades en la obtención de datos necesarios para la creación del sistema y posterior cálculo. Incluso, la mayoría de los datos ya pueden estar comprendidos dentro de sus sistemas de gestión documental de control y operación, lo cual garantiza la flexibilidad y bajo costo de la implementación del método. En donde, las dificultades se podrían presentar al momento del cálculo o del uso del software para obtener el pesaje de los índices y la sostenibilidad del sistema.

En el trabajo realizado por Bautista Rodríguez (2015), se realiza *“La evaluación de sostenibilidad de la producción de biodiésel en Colombia”*, en cual determinan indicadores ambientales, sociales, económicos, políticos y tecnológicos, y los procesa a través de AHP y modelamiento SD. Del cual, a modo de ejemplo, se presentan los datos utilizados en un indicador económico (precio de biodiésel), uno ambiental (variación de bosques y ecosistemas terrestres) y uno social (población pobre) en 14 años. Esta muestra se realiza, con el fin de tener una visualización de la calidad y disponibilidad de datos que requiere en el método CCDS.

Ilustración 13. Ejemplo de cálculo en indicador económico (Precio de Biodiésel).

5	Biodiesel price													BdPrice		
The price of biodiesel was obtained from the report submitted by the UPME. The original price was reported in pesos per gallon, changing units was made biodiesel with a density of 0.88 kg / l, and converted to dollars using an annual average exchange rate given by the Bank of the Republic of Colombia.																
Year	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
BdPrice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1209.38	1072.67	1267.4	1513.81	1422.86	1319.37	
PalmOil Price	377	261	238	357	410	435	368	417	719	634	644	809	966	845	764	
Data utilized: 2008-2013																
Regression Analysis: BdPrice versus PalmOilPrice																
The regression equation is																
BdPrice = 417 + 1.14 PalmOilPrice																
Predictor	Coef	SE Coef	T	P												
Constant	416.8	191.6	2.17	0.095												
PalmOilPrice	1.1379	0.2440	4.66	0.010												
S = 68.8619 R-Sq = 84.5% R-Sq(adj) = 80.6%																
Analysis of Variance																
Source	DF	SS	MS	F	P											
Regression	1	103165	103165	21.76	0.010											
Residual Error	4	18968	4742													
Total	5	122133														
Final equation : if time>8 then 417+1.14*PalmOilPrice else 0																

Fuente: Tomado de (Bautista Rodríguez, 2015).

Ilustración 14. Ejemplo de cálculo en indicador ambiental (Variación de bosques y ecosistemas terrestres).

36	Variation of forest and ecosystems lands													VarForEcosLand		
Year	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
VarForEcosLand	-57009.5	-57009.5	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-68016.4	-64669.5	-34197.6	-34101.8	-25504.5	
ForEcosLand	12949612.5	13892603	12824586.6	2756570.2	12688553.8	12620537.4	2552521	12484504.6	12416488.2	12348471.8	12280455.4	1215785.9	12181588.3	12147486.3	12121982	
LivLand	23176242.8	23235519	22947711	23283059	23259712	23579130	23861161	23757924	23785137	23985105	23830695	24068360	23268239	23756137.3	24073518.3	
PopPalm	4141743	4181458	4237512	4298187	4366354	4434543	4488736	4556952	4639004	4707649	4776817	4846818	4917577	4988642	5060183	
Data utilized: 1999-2013																
Regression Analysis: VarForEcosLa versus Forests_and_ Livestock_La, ...																
The regression equation is																
VarForEcosLand = - 4909713 + 0.296 ForEcosLands- 0.0128 LivLand + 0.317 PopPalm																
Predictor	Coef	SE Coef	T	P												
Constant	-4909713	705735	-6.96	0.000												
ForEcosLands	0.29637	0.03948	7.51	0.000												
LivLand	-0.012846	0.005044	-2.55	0.027												
PopPalm	0.31676	0.03548	8.93	0.000												
S = 4420.18 R-Sq = 93.1% R-Sq(adj) = 91.3%																
Analysis of Variance																
Source	DF	SS	MS	F	P											
Regression	3	2913828040	971276013	49.71	0.000											
Residual Error	11	214917881	19537989													
Total	14	3128745921														
Final equation: - 4909710 + 0.296*ForEcosLand - 0.0128*LivLand + 0.317*PopPalm																

Fuente: Tomado de (Bautista Rodríguez, 2015).

Ilustración 15. Ejemplo de cálculo en indicador social (Población pobre).

Year	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PoorPop	2652657	2678981	2699966	2723175	2758452	2359167	2291640	2287760	2273035	1878043	1842059	2311804	2254761	2122471	2004001
LandP	149765	156069	167346	181688	206801	238927	270027	292570	306879	336956	360536	404103	427368	452435	476782

Data utilized: 1999-2013

Regression Analysis: PoorPop versus Land_for_Palm_Cultivation_1

The regression equation is
 $PoorPop = 2987016 - 2.18 LandP$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2987016	143325	20.84	0.000
LandP	-2.1831	0.4560	-4.79	0.000

s = 190506 R-Sq = 63.8% R-Sq(adj) = 61.0%

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	8.31808E+11	8.31808E+11	22.92	0.000
Residual Error	13	4.71803E+11	36292524857		
Total	14	1.30361E+12			

Final equation: $2987016 - 2.18 * LandP$

Fuente: Tomado de (Bautista Rodríguez, 2015).

Por otra parte, las personas externas e indirectas a los proyectos hidroeléctricos, que quiera realizar la evaluación de la sostenibilidad a un caso estudio, encontrará dificultades en la minería de datos, debido a la confiabilidad de la información y clasificación de esta, haciéndolo dependiente a la voluntariedad y cooperación entre las partes. Así mismo, para la obtención y calidad de datos de libre acceso dependen de la academia y del estado, donde la, mayoría de datos son puntuales, desactualizados, sin continuidad en el tiempo y de un estrecho portafolio.

En congruencia a esta situación, y en apoyo a la obtención de datos existentes, medibles y aplicables al sector hidroeléctrico, para incrementar la precisión, alcance y un menor costo en la evaluación de la sostenibilidad, se presenta en la siguiente tabla, una propuesta de otros indicadores cuantificables.

Estos indicadores son aplicables al sector de la energía hidroeléctrica y son el resultado de diferentes investigaciones sobre sostenibilidad desde las dimensiones ambiental, social y económicos, pretendiendo valores cuantificables ante que estimaciones cualitativas, debido a su dependencia ante la percepción de grupos de interés y la dificultad o inversión requerida para su obtención. Los indicadores fueron tomados de los trabajos realizados por Briones-Hidrovo et al. (2021b); Colla et al. (2020); Kuriqi et al. (2019); y Liu et al. (2013)

Tabla 15. Indicadores cuantitativos para la medición de sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos.

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
1	ECONÓMICO	Viabilidad financiera del proyecto – Riesgos financieros de la inversión	Costo de capital promedio ponderado (WACC)	$WACC = r_{eq} \cdot \frac{E_c}{V} + r_d \cdot \frac{D}{V} (1 - T)$ <p>E_c es el valor de mercado de los fondos propios, D es el valor de mercado de la deuda, $V = E_c + D$, r_{eq} denota el rendimiento del capital propio, r_d es la tasa de interés de la deuda, T es el tipo de impuesto de sociedades.</p>	(Colla et al., 2020)
2		Viabilidad financiera del proyecto - Beneficios del proyecto	Costo total del ciclo de vida (TLCC)	$TLCC = \sum_{t=1}^{LT} \frac{C_{tot,t}}{(1+r)^t}$ $r = \frac{1+r_{nom}}{1+R_{infl}} - 1 \approx r_{nom} - R_{infl}$ <p>r es la tasa de descuento real, r_{nom} es la tasa de descuento nominal, R_{infl} es la tasa de inflación.</p>	(Colla et al., 2020)
3		Viabilidad financiera del proyecto	Valor Actual Neto (NPV)	$NPV (\$) = -CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}$ <p>N es la duración de la inversión, CF_0 es el flujo de caja en el año 0, CF_t son los flujos de efectivo libres del periodo t.</p>	(Colla et al., 2020)
4		Viabilidad financiera del proyecto	Relación beneficios costos (BCR)	$BCR (-) = \frac{\sum_{t=1}^{LT} \frac{B_{tot,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{LT} \frac{C_{tot,t}}{(1+r)^t}}$	(Colla et al., 2020)

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
		- Beneficios del proyecto		$B_{tot,t}$ son los beneficios totales en el año t, $C_{tot,t}$ son los costes totales en el año t. Examina si los beneficios del proyecto son mayores que los costos.	
5		Viabilidad financiera del proyecto -Beneficios del proyecto.	Tasa interna de retorno (IRR)	$IRR (\%) = \sum_{t=1}^{LT} \frac{B_{tot,t} - C_{tot,t}}{(1 + IRR)^t}$ <p>$B_{tot,t}$ son los beneficios totales en el año t, $C_{tot,t}$ son los costes totales en el año t. Examina la máxima IRR económicamente viable para un flujo de caja supuesto.</p>	(Colla et al., 2020)
6		Viabilidad económica y técnica del proyecto	Costo nivelado de electricidad (LCOE)	$LCOE \left(\frac{\$}{Wh} \right) = \frac{\sum_{t=1}^{LT} \frac{C_{tot,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{LT} \frac{ANEP_t}{(1+r)^t}}$ <p>$C_{tot,t}$ son los costes totales en el año t, $ANEP_t$ es la producción neta de electricidad en el año t (Wh) y r es la tasa de descuento real.</p>	(Colla et al., 2020)
7		Viabilidad económica y técnica del proyecto	Costo nivelado evitado de electricidad (LACE)	$LACE \left(\frac{\$}{Wh} \right) = \frac{\sum_{y=1}^Y (Pgm_y \cdot He_y) + CP \cdot CC}{Hgpa}$ <p>Pgm_y es el precio de generación marginal, He_y son las horas de envío, CP es el pago del capital, CC es el pago del crédito, $Hgpa$ son las horas de generación previstas anuales.</p>	(Colla et al., 2020)
8		Viabilidad económica	Necesidades brutas de energía	$GPER (J) = PE_{montaje} + PE_{operación} + PE_{desmantelamiento}$	(Colla et al., 2020)

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
		y técnica del proyecto	primaria (GPER)	Es la suma de la energía primaria requeridas para ensamblar diferentes componentes hacia la producción, la energía primaria de operación directa e indirecta y la energía primara de desmantelamiento.	(Colla et al., 2020)
9		Viabilidad financiera y económica del proyecto	Tiempo de amortización de energía (EPBT).	$EPBT (y) = \frac{E_r}{ANEP}$ <p>E_r es la energía directa e indirecta requerida para un proyecto (J o Wh), $ANEP$ es la producción neta anual de energía J o Wh).</p>	(Colla et al., 2020)
10		Viabilidad financiera del proyecto -Beneficios del proyecto.	Rendimiento energético (NEY) y energía devuelta invertida (EROI)	$EROI = \frac{E_d}{E_r}$ $NEY = E_d - E_r$ <p>E_d es la energía devuelta a la sociedad (J o Wh), E_r es la energía directa e indirecta (J o Wh) necesaria para proporcionar E_d.</p>	(Colla et al., 2020)
11		Viabilidad financiera del proyecto -Beneficios del proyecto.	Eficiencia energética del sistema (SEE) y energía devuelta del sistema (SER)	$SEE = \frac{E_d}{(E_r + E_f)_{tot}}$ $SEE = \frac{E_d}{(E_r + E_f)_{NR}}$ <p>E_f es la energía de la materia prima (J), y los sufijos NR y tot significa no renovable y total, respectivamente.</p>	(Colla et al., 2020)
12		Sostenibilidad del	Costo de reemplazo de	$ERC_H = \frac{\sum ERC_F \cdot m_F + \sum ERC_N \cdot m_N}{3.6}$	(Briones-Hidrovo)

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
		agotamiento de los recursos no renovables.	exergía (ERC)	ERC_H es el coste total de sustitución de la exergía hidroeléctrica en TWh _{ex} , ERC y m son el costo de sustitución de la exergía (GJ/t) y la cantidad (t) de combustible F y minerales no combustibles N utilizados a lo largo del ciclo de vida.	et al., 2021)
13		Viabilidad financiera y económica del proyecto. - Beneficios del proyecto.	Periodo de recuperación de la inversión (PBP)	$PBP = \frac{C_t}{NPV}$	(Kuriqi et al., 2019)
				C_t es el coste de la suma de la inversión inicial y el coste de operación y mantenimiento, NPV es el valor neto medio preestablecido teniendo en cuenta 30 años de vida útil de la planta hidroeléctrica.	
14	SOCIAL	Requisitos y cambios de uso de la tierra	Impacto en el uso de la tierra (ILU)	$ILU = LA \cdot t_{LA}$ LA es la superficie total de terreno necesaria para la construcción y operación del proyecto por unidad de energía producida (m^2/J o Wh), t_{LA} es la cantidad de tiempo que la superficie del terreno estará ocupada por el proyecto (y).	(Colla et al., 2020)
15		Generación de empleos	Creación de empleos directos e indirectos (JC)	$JC = \frac{\sum_{i=1}^l (JC_i \cdot t_i)}{P_{tot}}$ JC son los empleos creados a lo largo del proyecto (puestos de trabajo/ (Wh o J)), JC_i es el número de puestos de trabajo creados durante la fase del ciclo de vida i	(Colla et al., 2020)

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
				(años), t_i es la duración del empleo en la fase i (años), P_{tot} es la energía total generada durante la fase del ciclo de vida	
16		Alteración de la Salud pública	Años de vida afectados por discapacidad (DALY)	$DALY = YLL + YLD$ $YLL = N \cdot L$ $YLD = (I \cdot LD) \cdot W = P \cdot W$ <p>N es el número de muertes en la población, L es la esperanza de vida restante media de la población (años), I es el número de incidentes de una condición particular en la población, LD es la duración media de discapacidad de una condición en particular, P es la prevalencia de la condición, W es el peso de discapacidad asociado con la condición.</p>	(Colla et al., 2020)
17		Valor y servicio para las comunidades	Eficiencia de los servicios ecosistémicos en hidroeléctricas (ESE_H)	$ESE_H = \frac{ES_a}{ES_b}$ <p>ES es el valor total de todos los servicios ecosistémicos suministrados antes (a) y después (b) de la construcción del proyecto hidroeléctrico.</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)
18	AMBIENTAL	Emisiones de GEI	Huella de Carbono de energía hidroeléctrica (CF_H)	$CF_H = C + E + R + X$ <p>C, R y X, son las emisiones de GEI generadas por la construcción, el embalse, las turbinas, los vertederos y las descargas, E representa la pérdida de ecosistemas terrestres y por lo tanto, la pérdida de la capacidad de secuestro y almacenamiento de carbono.</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
19		Integridad Ecológica	Evaluación de integridad ecológica (EI)	$EI = \sum_{i=1}^n C_i \cdot W_i$ <p>C_i es la puntuación de evaluación de un índice individual, W_i es el peso de C_i, n es el número de el índice.</p>	(Liu et al., 2013)
20		Cantidad y calidad del recurso hídrico	Huella Hídrica de la energía hidroeléctrica (WF_H)	$WF_H = \frac{(E_0 - E_1) + W_{d,w}}{P}$ <p>E_1 es la evaporación del embalse ($\text{hm}^3/\text{año}$), E_0 es la evapotranspiración antes de la construcción de la presa ($\text{hm}^3/\text{año}$), $W_{d,w}$ es el volumen de agua desviado que no retorna a la cuenca ($\text{hm}^3/\text{año}$), P es la generación hidroeléctrica promedio ($\text{GWh}/\text{año}$).</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)
21		Enlace entre recurso hídrico y emisiones de carbono	Nexo carbono-agua de la energía hidroeléctrica (WCN_H)	$WCN_H = \frac{W_c}{(CF_1 - CF_2) \cdot P}$ <p>W_c Es el total anual de agua consumida ($\text{m}^3/\text{año}$), CF_1 y CF_2 son las emisiones de GEI del reemplazo de las plantas de energía de combustible fósil reemplazadas localmente y el proyecto hidroeléctrico, respectivamente ($\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{MWh}$), P es la generación hidroeléctrica promedio ($\text{MWh}/\text{año}$).</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)
22			Impacto a la biocapacidad	$Bi_H = \frac{Em_h}{Em_c}$	(Briones-Hidrovo

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
		Capacidad ecosistémica	por hidroeléctrica (Bi_H)	Em_h es la emergencia relacionada con la pérdida de los servicios ecosistémicos y la extracción de los recursos locales no renovables involucrados en la construcción del proyecto hidroeléctrico, Em_c es el total de insumos renovables de emergencia en un país.	et al., 2021)
23		Sostenibilidad del sistema	Índice de sostenibilidad ambiental de hidroeléctrica (ESI_H)	$ESI_H = \frac{EYR_H}{ELR_H} = \frac{\frac{U}{F + L_{ES}}}{\frac{N + F_N + L_{N-ES}}{R + F_R}}$ <p>U es el uso total de emergencia, N son los recursos locales no renovables libres, R son los recursos locales renovables libres, F es el total de recursos adquiridos de la economía (insumos), F_N es la fracción no renovable de los insumos adquiridos, F_R es la fracción renovable de los insumos adquiridos, L_{ES} es la pérdida de servicios ecosistémicos que se consideran no renovables (L_{N-ES}).</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)
24		Régimen de flujo hídrico	Índice de desviación aguas abajo (DDI)	$DDI(Q) = \frac{\bar{Q}_{nfr} - \bar{Q}_{afr}}{\bar{Q}_{nfr}}$ <p>\bar{Q}_{nfr} es el régimen de flujo natural medio diario antes del desvío, \bar{Q}_{afr} es el régimen de flujo medio alterado que queda en el río después de la desviación.</p>	(Kuriqi et al., 2019)
25		Régimen de flujo hídrico	Índice de alteración	$I_{ij}(HI_{ij}) = \left(\sum_{i=1}^n \left \frac{HI_{ij}nfr - HI_{ij}afr}{HI_{ij}nfr} \right \right) \cdot \left(\frac{1}{\#HI_{ij}} \right)$	

No	Dimensión	Aspecto de sostenibilidad	Nombre del indicador	Fórmula	Referencia
			hidrológica (I_{ij})	I_{ij} es el índice de alteración considerando el indicador hidrológico i por cada grupo j , HI_{ijnfr} es el indicador hidrológico relacionado con el régimen de flujo natural, $HI_{ij afr}$ es el indicador hidrológico relacionado con el régimen de flujo alterado, $\#HI_{ij}$ representa el número de indicadores hidrológicos para cada grupo. La escala es de 0 a 1, donde 0 representa la no alteración y 1 alta alteración.	(Kuriqi et al., 2019)
26		Cantidad y calidad de combustibles	Energía retomada en energía invertida en hidroeléctricas ($EROI_H$)	$EROI_H = \frac{E_D}{E_R}$ <p>$EROI_H$ es la energía retornada en la inversión de energía de la hidroeléctrica, E_D es la energía suministrada por el sistema, E_R es la energía necesaria para E_D.</p>	(Briones-Hidrovo et al., 2021)

Fuente: Elaboración a partir de Briones-Hidrovo et al. (2021b); Colla et al. (2020); Kuriqi et al. (2019) y Liu et al. (2013).

De esta manera, una vez obtenidos los pesos de los sistemas, incluido los indicadores, se muestra que, los de mayor valor tienen mayor peso y en base a esto, se califica su importancia, mostrando que si un impacto es positivo representa un beneficio hacia la sostenibilidad, y si el impacto es negativo representa un aspecto de mejora en la sostenibilidad, al cual se deberá de dirigir las estrategias de gestión y desempeño. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el estudio de caso de la evaluación de una central hidroeléctrica realizado en el trabajo de Zhang et al. (2021). Esta muestra se realiza, con el fin de tener una visualización de los resultados esperados una vez de efectuó el método CCDS.

Primero, a modo de ejemplo, se presenta los pesos resultantes de los índices con su impacto, y el de las dimensiones económico, ambiental y social. En este caso, se obtuvo que el de mayor peso (ponderación) es la dimensión ambiental, traduciéndose en mayor importancia e influencia ante los otros sistemas

Ilustración 16. Ejemplo de pesos del sistema.

System layer	Weight	Index layer	Weight	Impact
Economic	0.25	GDP	0.05972	+
		Project investment	0.03611	-
		Total investment in fixed assets	0.05556	+
		Inland river transport	0.04097	+
		Number of agricultural employees	0.03819	+
Social	0.25	Number of mining employees	0.01944	+
		Average wages	0.06036	+
		Number of registered unemployed persons at year-end	0.05782	-
		Passenger volume	0.03804	+
		Number of employees in culture, sport and entertainment	0.02892	+
Environmental	0.35	Human health	0.06486	+
		Submergence	0.01411	-
		Seismic activity	0.02823	-
		Reservoir bank collapse & Landslide	0.02523	-
		Reservoir leakage	0.01128	-
		River discharge	0.03967	+
		Sediment runoff	0.02860	+
		Temperature	0.02485	-
		Humidity	0.01553	+
		Wather Temperature	0.02204	-
		DO (Dissolved Oxygen)	0.02950	+
		pH	0.01288	+
		Soil fertility	0.01126	+
Technical	0.15	Soil erosion	0.02912	-
		Terrestrial organism	0.01923	+
		Aquatic organism	0.03846	+
		Project duration	0.02625	-
		Installed capacity	0.04125	+
		Annual energy output	0.03656	+
		Total storage	0.04594	+

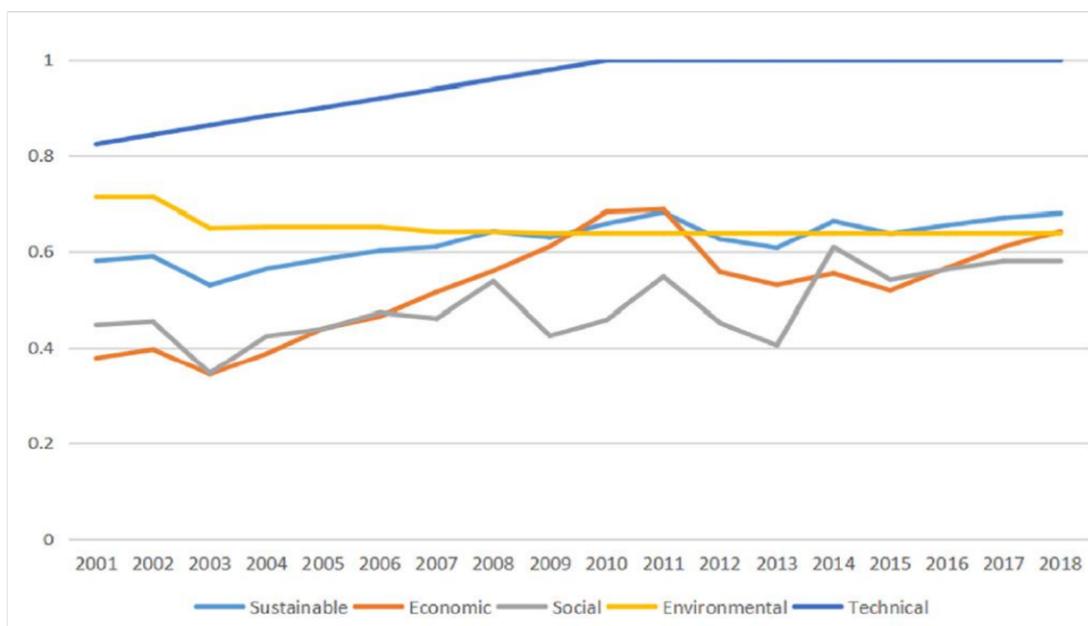
Fuente: Tomado de (Zhang et al., 2021).

En este punto, debido a las características socioeconómicas y políticas de Colombia, en conjunto con un marco regulatorio débil y con bajos niveles de compromiso con la transparencia, es de esperarse obtener bajos niveles en los indicadores de seguridad, desarrollo económico y gobernanza (Lyon, 2020) . Por tal motivo, es un buen indicativo (buena salud del sistema creado) tener como resultado que el peso ponderado mayor sea el correspondiente a la dimensión social, seguido de la ambiental y continuando con el económico y/o técnico.

Adicionalmente, se debe de tener en cuenta que la percepción que tienen las comunidades hacia los proyectos hidroeléctricos es negativa y ha sido históricamente hablando, uno de los riesgos más grande a la hora de ejecutar un proyecto de este tipo, ya sea por detención parcial o total. Esta situación, fue propiciada en gran parte, por no tener en cuenta los intereses de estos actores claves en la implementación y ejecución de este tipo de proyectos (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Por lo tanto, se deben de mejorar las relaciones con los grupos de interés, especialmente en cuestiones de participación e inclusión, para obtener mejores niveles de sostenibilidad del proyecto.

Así mismo, una vez, obtenidos los pesos del sistema, estos proceden a graficarse para ilustrar los niveles de sostenibilidad obtenidos. A continuación, a modo de ejemplo, se muestra una gráfica típica esperada al emplear el método CCDS y de medición la sostenibilidad.

Ilustración 17. Ejemplo de los niveles de sostenibilidad de casa sistema

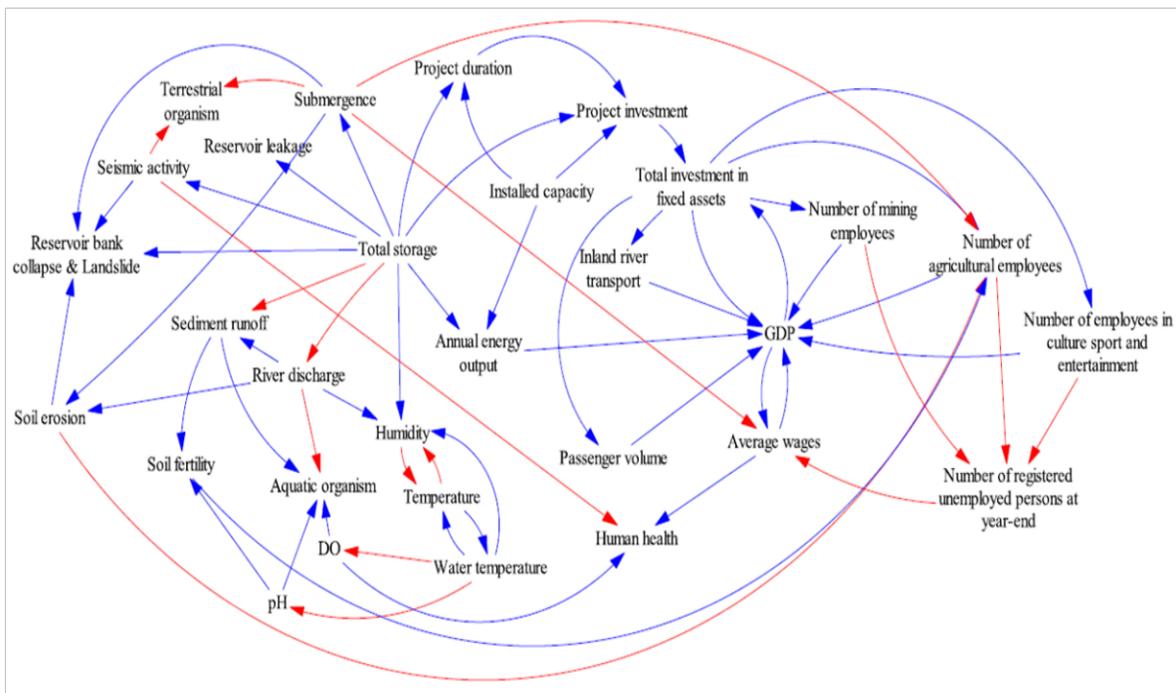


Fuente: Tomado de (Zhang et al., 2021).

Como componente del método CCDS, se encuentran los diagramas de causalidades, que son la representación de como los indicadores influyen entre ellos, tanto dentro de la propia dimensión como la sinergia entre ellas, y el tipo de influencia ejercida, si es positiva o negativa. A continuación, a modo de ejemplo, se puede visualizar las relaciones causales del estudio de caso de Zhang et al. (2021), la cual sirve como referencia de diagrama causal esperado resultante de la medición de la sostenibilidad de una central hidroeléctrica.

Por otra parte, el diagrama causal obtenido después de la implementación del método CCDS, se puede comparar con los diagramas causales determinados en el trabajo de Voegeli et al. (2019), con el fin de buscar síntomas de buena salud del sistema evaluado. Voegeli et al. (2019), determinó a través de diagramas causales la estructura y representación de los impactos en una central hidroeléctrica, y con ellos evaluar la sostenibilidad, esto realizaron bajo los de temas de ecosistemas y biodiversidad, calidad de agua, peligros naturales y riesgos, aspectos económicos y financieros, salud pública, aceptación y cohesión social, servicios de energía, servicios de energía adicional, y clima.

Ilustración 18. Ejemplo de diagrama causal



Fuente: Tomado de (Zhang et al., 2021).

En el país, los reportes de sostenibilidad principalmente se realizan más en base a estándares internacionales, que a herramientas nacionales. Según, la Superintendencia Financiera de Colombia (2021), las GRI son las de mayor uso, influenciado en la determinación de temas, tipo de indicadores para divulgar el desempeño de la sostenibilidad y estructura de los informes. Así mismo, dio a conocer que las empresas conocen la existencia de una estructura para la construcción y elaboración de informes, pero no tiene conocimiento sobre la calidad de la información presentada (Superintendencia Financiera de Colombia, 2021).

De las empresas del sector hidroeléctrico que realizan reportes de sostenibilidad, en su mayoría lo reportan bajo una combinación de GRI, Pacto Global y estándares *AccountAbility* (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Las empresas identificadas en la base de datos de GRI son: AES Chivor, Centrales Hidroeléctricas del norte de Santander S.A.ESP (CENS), Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Grupo de Energía de Bogotá (EEB), ESP, Electrificadora de Santander (ESSA), ISA Inter Colombia, ISA Interconexión eléctrica S.A.E.S.P, Empresa de Energía del Quindío S.A. E.S.P-EDEQ (EDEQ), Empresas Públicas de Medellín (EPM), ISAGEN, Condensa – Emgesa, XM, entre otros (Mejía González, 2019).

Sin embargo, sólo se tiene conocimiento de las evaluaciones de la sostenibilidad, de cuatro proyectos hidroeléctricos Cañafisto de ISAGEN (Etapa Preparación, 960 MW), Santo Domingo de HZ Energy (Etapa Preparación, 56 MW), Sogamoso (Etapa Implementación, 820 MW) y Miel I (Etapa Operación, 396 MW) ambas de ISAGEN, las cuales se les realizó evaluaciones oficiales de sostenibilidad a través del HSAP (Lyon, 2020). Por lo tanto, no se tiene conocimiento de como las empresas de energía que tienen asociados proyectos hidroeléctricos realizaron la evaluación de sostenibilidad de estos y de la información que están reportando, como es el caso de EPM, ESSA, EDEQ, CENS, entre otros.

En el caso de estudio realizado en el sistema La Miel I perteneciente a ISAGEN, se reporta el desempeño de sostenibilidad integrado bajo la guía GRI G4 – Información sobre el sector de servicios públicos de energía. En este informe incluyeron las acciones de cumplimiento de los principios del Pacto Global y Objetivos de Desarrollo del Milenio, y fue verificado por INCONTEC con base en los estándares AA1000AS e ISAE3000 (Polanco López de Mesa & Ramírez Atehortúa, 2017). Cabe resaltar que, en el trabajo realizado por Gómez Romero et al. (2020) se propone que la evaluación de la sostenibilidad, especialmente de aquellos reportes basados en el HSAP, se puede beneficiar en términos de complementar la información de los modelos dados por los estándares AA1000:2015, BS 8900:2013 y GRI.

Por otra parte, se presenta que las empresas grandes, medidas por la capitalización de bursátil, proporcionan una mayor divulgación del reporte de sostenibilidad a comparación de las empresas pequeñas, y es debido a la disponibilidad de recursos. Así mismo, se socializa que, en los informes de sostenibilidad, se hace referencias a la alineación de las actividades con los ODS, pero no se reporta el

desempeño o contribución en el logro de estas metas. De manera similar, se evidencia debilidades en el análisis de materialidad, debido a que se excluyen temas que son relevantes para el sector, y en algunos casos, la unidad de medida de los indicadores reportados no era uniforme, lo cual no permite ni la comparabilidad ni la estandarización de los resultados obtenidos (Superintendencia Financiera de Colombia, 2021). A continuación, se presenta un cuadro comparativo de los temas de materialidad reportados en los informes de sostenibilidad de empresas de eléctricas del país, que tiene asociados proyectos hidroeléctricos. Esta muestra, permite tener una visualización y punto de referencia de los posibles temas de materialidad que puedan determinarse para la construcción y realización de reportes de sostenibilidad.

Tabla 16. Materialidad en empresas eléctricas del país

No	CODENSA - EMGESA	AES Chivor	ISAGEN – Sistema La Miel I	ESSA	CENS /CHEC/ EDEQ
1	Fortaleza financiera	Desempeño financiero	Desempeño financiero	Acceso a la comparabilidad	Acceso y comparabilidad
2	Energías renovables	Gestión integral del cliente	Energía renovable y eficiencia energética	Energías renovables e innovación	Energías renovables
3	Buen gobierno corporativo	Buen gobierno	Crecimiento	Calidad y seguridad del servicio eléctrico	Calidad y seguridad de los productos y servicios
4	Conducta corporativa justa	Optimización del portafolio	Recursos naturales y biodiversidad	Clima organizacional y calidad de vida	Clima organizacional
5	Tecnologías tradicionales	Talento	Gestión del agua y cambio climático	Contratación responsable	Contratación responsable para el desarrollo local
6	Innovación y eficiencia operacional	Excelencia operativa	Desarrollo regional- generación y fortalecimiento institucional	Derechos humanos	Derechos humanos
7	Eficiencia energética y servicios	Seguridad	Gestión del riesgo	Tarifas y precios	Tarifas y precios
8	Calidad en el relacionamiento con los clientes	Aporte al desarrollo	Ética y transparencia	Transparencia	Transparencia

No	CODENSA - EMGESA	AES Chivor	ISAGEN – Sistema La Miel I	ESSA	CENS /CHEC/ EDEQ
		local y regional			
9	Uso responsable de recursos hídricos	Mitigación y adaptación al cambio climático		Agua y biodiversidad	Agua y biodiversidad
10	Estrategia frente al cambio climático			Estrategia climática	Estrategia climática
11	Gestión, desarrollo y motivación de empleados				Solidez financiera
12	Salud y seguridad ocupacional				
13	Relaciones responsables con las comunidades				
14	Apoyo y desarrollo de comunidades locales				
15	Sostenibilidad de la cadena de suministros				
16	Mitigación de los impactos ambientales				
17	Biodiversidad y protección al capital natural				

Fuente: Elaborado a partir de (AES COLOMBIA, 2020; CENS, 2021; CODENSA - EMGESA, 2015; EDEQ, 2021; Mejía González, 2019; Polanco et al., 2016).

Por último, las organizaciones que cuentan con reporte de sostenibilidad y un sistema de gestión ambiental, llevan indicadores de sostenibilidad como parte de su gestión documental de control y seguimiento. Y las áreas que deben de llevar la gestión de estos indicadores de sostenibilidad son las áreas de gestión del riesgo, planeación estratégica y la gestión del desempeño. Cabe resaltar que, una forma de mejorar el desempeño de la sostenibilidad y de dar soporte a los reportes, es la

implementación de planes de acción para abordar lagunas identificadas y bajos rendimientos (Hernández Medina et al., 2019).

Este proceso de monitoreo y evaluación del desempeño de la sostenibilidad debe ser medido hacia adentro de la organización en términos de eficacia y eficiencia, y hacia afuera en términos de cambios generados por el proyecto. Donde la pregunta clave para dar seguimiento al desempeño de la sostenibilidad es, ¿si las acciones y estrategias que conducen el proceso de la sostenibilidad van hacia la dirección esperada o no? Y se evidencia en la medida de que la situación ambiental y social del espacio geográfico donde se desenvuelve el proyecto, mejora o se mantiene (Hernández Medina et al., 2019).

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

CONCLUSIONES

Esta guía ofrece un paso a paso de cómo realizar una evaluación de la sostenibilidad de centrales hidroeléctricas, donde todo su contenido se encuentra enmarcado y fue específicamente desarrollado para este tipo de proyectos. Por lo tanto, no es transferido ni adaptado de otros sectores, con el fin de disminuir brechas, sesgos o imposibilidad de ejecución.

En donde, los aspectos e impactos de sostenibilidad que se consideraron como línea base para identificar los impactos económicos, ambiental y sociales generados, fueron obtenidos a través de revisión bibliográfica y estudios de caso en el país, que plasmaran impactos reales generados por este tipo de proyectos.

Así mismo, los criterios de sostenibilidad ofrecidos para ser evaluados en aplicabilidad al proyecto, según sus características y etapa del ciclo de vida de evaluación, fueron adquiridos por las directrices internacionales de energía hidroeléctrica. Siendo las propuestas por el IHA la que abarca en mayor complejidad los criterios de sostenibilidad, y que puede ser complementada por las propuestas por MCR-RSAT y WCD.

Por otra parte, la lista de indicadores ofrecidos de los cuales se realiza la evaluación de acuerdo con la disponibilidad de datos para el proyecto a evaluar, son los que tienden por referencias bibliográficas mayor probabilidad de disponibilidad de libre acceso (Zhang et al., 2021). Y el modelo CCDS, fue diseño para el contexto de hidroeléctricas, y su aplicabilidad se realizó en el mismo sector.

Y para el reporte de la sostenibilidad, se analizaron las HST relacionadas o que sido implementadas tanto a nivel internacional como nacional, para este de proyectos. Se encontró que la de mayor uso son la GRI, que puede presentar grandes mejoras al ser complementadas con los estándares AA1000 y BS8900. En donde se entregó también, una estructura complementaria de los aspectos mínimos que debe de contener un reporte de sostenibilidad, incluyendo la gestión realizada por impactos generados, los temas de materialidad y posibles soportes de evidencia de gestión por uso de herramientas de certificación como lo son CDP, LEED y BIM.

Por lo tanto, esta guía esta complementa mente diseñada para el sector hidroeléctrico y su evaluación en la sostenibilidad. Adicionalmente, se muestra las posibles dificultades o aspectos a considera, al aplicar la guía en el contexto colombiano. En donde la mayor consideración, es la disponibilidad de datos, la priorización de la dimensión social en los pesos ponderados de los métodos, y los temas de materialidad que han estado reportando las empresas de energía que tiene manejo de centrales hidroeléctricas en su reporte de sostenibilidad.

Al realizar esta guía metodológica, se encontraron los siguientes aspectos que afectan la evaluación de la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica.

Esta situación de no reemplazo es un arma de filo, ya que por un lado la flota actual mundial de centrales hidroeléctricas está envejeciendo, y debido a los efectos del cambio climático, el recurso hídrico está en escasez y con ello, no se podrá crear nuevos proyectos hidroeléctricos. A pesar de esta situación y que los gobiernos, no se conoce los planes de gobierno con respecto a la flota de centrales del país, es más un tema tratado por los dueños de esta. Así mismo, se desconoce el estado actual de la sostenibilidad del complejo de centrales hidroeléctricas del país. Donde los pocos proyectos que hay realizado una evaluación de sostenibilidad, sus datos no son de libre acceso.

Es palpable la necesidad de realizar evaluaciones de sostenibilidad a centrales hidroeléctricas, en la revisión documental hay reportados muchos casos estudio donde se evalúa la sostenibilidad desde diferentes perspectivas, métodos, metodologías, componentes y se reporta de estos estados. Sin embargo, se desconoce que sucede después de un reporte de sostenibilidad, el desempeño de esta en un estado futuro, las retroalimentaciones, y las estrategias sostenibles que fueron en éxito en disminuir las brechas. Adicionalmente, estos estados de sostenibilidad no son reconocidos oficialmente.

Se desconoce que sucede con la central hidroeléctrica a la que le evaluaron su sostenibilidad, en caso de ser reconocida esta. Es decir, en los casos en que se reconozca estos estados de sostenibilidad, y se obtengan cotización de los mercados, y beneficios. No se tiene claridad si estos beneficios retornaran al proyecto a fortalecer y mejorar la sostenibilidad o si bajo las decisiones de las directivas se distribuirán dentro de su portafolio de servicios.

Se percibe el deseo de reportar la sostenibilidad, más no es perceptible la calidad de la información reportada. Los reportes no se ven retroalimentados por investigación con otras herramientas que puedan ser complementarias, más eficaces y que puedan disminuir brechas. El reporte se realiza por la tendencia de las demás organizaciones en reportar bajo cierta herramienta, y por lo tanto se acogen a ella, sin evaluar si es la mejor opción.

RECOMENDACIONES

Las evaluaciones de sostenibilidad, y en sí, sus reportes podrían repetirse cada determinado tiempo para registrar el progreso de hacia niveles más alto o a mantenerse en el tiempo.

Los reportes de sostenibilidad deben de ir acompañados por un plan de acción ambiental y social, dirigido a las brechas encontradas o identificadas, y consecuente a los indicadores de sostenibilidad, siendo útil a nivel estratégico y operativo.

En entornos donde los marcos regulatorios son débiles y de bajo compromiso con la transparencia. Se recomienda primar las dimensiones sociales y ambientales que las económicas y técnicas, utilizar las HST para mejorar la capacidad de gestionar los problemas ambientales y sociales del proyecto, especialmente de participación e integración entre los grupos de interés y hacer usos de incentivos. Y deben de ser consideradas como complemento y un sustituto

En los reportes de sostenibilidad, no sólo ligar los ODS con las actividades ejecutadas, sino mostrar con evidencias y datos como se está cumpliendo estos objetivos.

Dar seguimiento al desempeño de la sostenibilidad, para adquirir retroalimentación y evaluar estrategias de éxito en el desarrollo de este tipo de proyectos

FUTUROS TRABAJOS

Al proporcionar esta guía, se espera incentivar su uso y demostración en evaluar la sostenibilidad de centrales hidroeléctricas, no sólo a nivel país sino también a nivel latinoamericano, fomentando la construcción de una base de datos comparable, medible y reconocida en los mercados.

Así mismo, evaluar la posibilidad de aplicar esta guía para la evaluación de energía renovables no convencionales.

Por último, se invita a la investigación para estructurar modelos flexibles, universales, comparables, de bajo costo y escalables a la evaluación de la sostenibilidad en energía renovables convencionales y no convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOLGEN. (2022). *Capacidad instalada en Colombia*. <https://acolgen.org.co>
- AES COLOMBIA. (2020). *Informe de Sostenibilidad 2020 - AES Colombia*. <https://www.unglobalcompact.org/participation/report/cop/create-and-submit/active/454926>
- ALLPLAN. (2022, noviembre 21). *Construcción sostenible con la metodología BIM*. <https://blog.allplan.com/es/construccion-sostenible-con-la-metodologia-bim>
- Azócar, G., Link, Ó., Flores, P., Flores, E., & Meier, C. (2015). *INFORME FINAL: “Estándares Internacionales de Sustentabilidad para la Hidroelectricidad y Posibilidades de Implementación en Chile”*.
- Bautista Rodríguez, S. C. (2015). *SUSTAINABILITY ASSESMENT OF BIODIESEL PRODUCTION IN COLOMBIA*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bhandari, R., Saptalena, L. G., & Kusch, W. (2018). Sustainability assessment of a micro hydropower plant in Nepal. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0147-2>
- Blandón Díaz, J. A., & Henao Bedoya, E. L. (2018). *Metodología para la evaluación integrada en la conversión de líneas de transmisión de CA a CD*.
- Briones-Hidrovo, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2021). Hydropower and environmental sustainability: A holistic assessment using multiple biophysical indicators. *Ecological Indicators*, 127, 107748. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107748>
- CDP. (2023). *Who we are*. <https://www.cdp.net/en/info/about-us>
- CENS. (2021). *Informe de Sostenibilidad 2021 - CENS*. <https://unglobalcompact.org/participation/report/cop/create-and-submit/active/469357>
- CODENSA - EMGESA. (2015). *INFORME DE SOSTENIBILIDAD 2015 CODENSA - EMGESA*. <https://www.unglobalcompact.org/participation/report/cop/create-and-submit/advanced/255411>
- Colla, M., Ioannou, A., & Falcone, G. (2020). Critical review of competitiveness indicators for energy projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109794. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109794>
- Congreso de Colombia. (1994). *Ley 142 de 1994*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=2752
- Ley 143 de 1994, Pub. L. No. Ley 143 de 1994 (1994). https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=4631
- Ley 1715 de 2014, Pub. L. No. Diario Oficial No. 49.150 de 13 de mayo de 2014 (2014). http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- CORNARE. (2011). *DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS (DAA) CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS GENERADORAS - TÉRMINOS DE REFERENCIA DIAGNÓSTICO*

AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS (DAA) PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA HIDROELECTRICA. <https://www.cornare.gov.co/Tramites-Ambientales/TR/TR-DAA-CENTRALES-HIDROELECTRICAS-GENERADORAS.pdf>

- Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017a). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25, 375–390. <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939007.pdf>
- Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017b, julio). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 375–390. <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939007.pdf>
- CREG. (s/f). *Estructura del Sector*. Recuperado el 1 de enero de 2023, a partir de <https://www.creg.gov.co/sectores-que-regulamos/energia-electrica/estructura-del-sector-0/estructura-del-sector>
- Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia, Pub. L. No. Documento CONPES 3700 de 2011 (2011). https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3936
- Política de Crecimiento Verde, Pub. L. No. Documento CONPES 3934 de 2018 (2018). <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Pol%C3%ADtica%20CONPES%203934/Resumen%20Pol%C3%ADtica%20de%20Crecimiento%20Verde%20-%20diagramaci%C3%B3n%20FINAL.pdf>
- Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, Pub. L. No. Documento CONPES 3934 de 2018 (2018). <http://www.andi.com.co/Uploads/CONPES%203943%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Dhaubanjhar, S., Lutz, A. F., Gernaat, D. E. H. J., Nepal, S., Smolenaars, W., Pradhananga, S., Biemans, H., Ludwig, F., Shrestha, A. B., & Immerzeel, W. W. (2021). A systematic framework for the assessment of sustainable hydropower potential in a river basin – The case of the upper Indus. *Science of The Total Environment*, 786, 147142. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147142>
- EDEQ. (2021). *Informe de Sostenibilidad 2021 - EDEQ*. <https://www.unglobalcompact.org/participation/report/cop/create-and-submit/active/476061>
- EDINFRA. (2021). *Metodología BIM en el sector de la construcción*. <https://edinfra.es/metodologia-bim/>
- el Espectador. (2021). *Colombia podría aprovechar mejor su energía hidroeléctrica*. <https://www.elespectador.com/ambiente/colombia-podria-aprovechar-mejor-su-energia-hidroelectrica-article/>
- EMIS. (2021). *COLOMBIA RENEWABLE ENERGY SECTOR 2021/2022: An EMIS Insights Industry Report*. www.emis.com
- Enerdata. (2020). *Energy Report - Colombia July 2020*.
- Enerdata. (2021). *Energy Report – Colombia August 2021*. <https://www-emis-com.consultaremota.upb.edu.co/php/url-sharing/route?url=0cc0d6c977e4b5c2>

- Escrig-Olmedo, E., Muñoz-Torres, M. J., & Fernández-Izquierdo, M. Á. (2010). Socially responsible investing: sustainability indices, ESG rating and information provider agencies. *International Journal Sustainable Economy*, 2, 442–461. <https://doi.org/10.1504/IJSE.2010.035490>
- Gómez Romero, J. A., Soto Flores, R., & Garduño Román, S. (2020, diciembre). Selección de un modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante el método AHP. *REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA*, 117–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3835>
- González Guerrero, M. M. (2021). *Análisis de los Procesos de Gestión Ambiental de las Grandes Centrales Hidroeléctricas en Colombia en el Marco de los Requerimientos de la Normatividad y los Retos de Sostenibilidad* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/55524/Documento_TG_MMGG_VFINAL.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- GRI. (2013a). *G4 - GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MEMORIAS DE SOSTENIBILIDAD - Manual de aplicación*.
- GRI. (2013b). *G4 -GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MEMORIAS DE SOSTENIBILIDAD - Principio y contenido básico*.
- GRI, United Nations Global Compact, & WBCSD. (2015). *ODS*. <https://sdgcompass.org/>
- Gunnarsdóttir, I., Davíðsdóttir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdóttir, S. (2021). It is best to ask: Designing a stakeholder-centric approach to selecting sustainable energy development indicators. *ELSEVIER*, 74(2214–6296). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101968>
- Gutiérrez Ossa, J. A., & Mira Olano, L. E. (2019, julio). Estado del arte del derecho y la legislación en el sector hidroeléctrico, hidrocarburíferos y de minería para Colombia. *Estado & Comunes, Revista de Políticas y Problemas Públicos.*, 383–408. https://revistas.iaen.edu.ec/index.php/estado_comunes/article/view/134/129
- Hernández Medina, C. A., Báez Hernández, A., & Carrasco Fuentes, M. A. (2019). Evaluación de sostenibilidad en proyectos de desarrollo. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 34–39. <https://doi.org/10.21500/20275846.3939>
- IFC. (2012). *Normas de Desempeño sobre Sostenibilidad Ambiental y Social*. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_handbook_pps
- Iglesias Carvajal, S. (2011). *GUÍA DE IMPACTO AMBIENTAL PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS*.
- IHA. (2020a). *Análisis de Brechas Ambientales, Sociales y Gobernanza en la Sostenibilidad de Hidroeléctricas*. https://static1.squarespace.com/static/5c1978d3ee1759dc44fbd8ba/t/5eb3e90585b9d62204f30d30/1588848916382/HESG+document_07-05-20.pdf
- IHA. (2020b). *Directrices de Sostenibilidad de la Energía hidroeléctrica sobre las Buenas Prácticas Industriales Internacionales*. <https://static1.squarespace.com/static/5c1978d3ee1759dc44fbd8ba/t/61078a7>

- 09fa31818f6d0b4f2/1627884197361/Hydropower+Sustainability+Guidelines+-+May+2020.pdf
- IHA. (2020c). *Protocolo de Evaluación de la Sostenibilidad de la Energía Hidroeléctrica*. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e0f0d7fd2619e365e8e5_hydropower_sustainability_assessment_protocol_07-05-20.pdf
- IHA. (2021a). *2021 Hydropower Status Report – Sector trends and insights*. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/60c37321987070812596e26a_IHA20212405-status-report-02_LR.pdf
- IHA. (2021b). *Hydropower Sustainability Assessment Protocol - Published HSAP Assessments*. <https://www.hydrosustainability.org/assessment-protocol>
- IHA. (2021c). *Hydropower Sustainability Tools*. <https://www.hydrosustainability.org/hydropower-sustainability-tools>
- IHA. (2022). *2022 Hydropower Status Report Contents Contents*. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf
https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf
- Imhof, A., Wong, S., & Bosshard, P. (2002). *Guía Ciudadana sobre la Comisión Mundial de Represas*.
- IRENA. (2022). *Renewable energy and jobs annual review 2022*. <https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>
- ISO. (2018). *ISO 45001:2018 - Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo*. www.iso.org
- Kinderyte, L., Ciegis, R., & Staniskis, J. K. (2010). Assessment of Enterprise Performance for Efficient Sustainability. En *TRANSFORMATIONS IN BUSINESS & ECONOMICS* (Vol. 9, Issue 3).
- Kumar, D., & Katoch, S. S. (2015). Sustainability assessment and ranking of run of the river (RoR) hydropower projects using analytical hierarchy process (AHP): A study from Western Himalayan region of India. *Journal of Mountain Science*, 12(5), 1315–1333. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3156-4>
- 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>
- Liu, S., Zhao, Q., Wen, M., Deng, L., Dong, S., & Wang, C. (2013). Assessing the impact of hydroelectric project construction on the ecological integrity of the Nuozhadu Nature Reserve, southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(7), 1709–1718. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0708-z>

- Lyon, K. (2020). *Using the Hydropower Sustainability Tools in World Bank Group Client Countries Lessons Learned and Recommendations*. www.worldbank.org/gwsp
- Mejía González, J. D. (2019). *Desarrollo de la Etapa de Planeación con el Ciclo PHVA para el Informe de Sostenibilidad ESSA 2019 bajo la Metodología Estándares GRI*.
- Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible: “Hacia una cultura de consumo sostenible y transformación productiva”, (2010). https://rds.org.co/apc-aa-files/ba03645a7c069b5ed406f13122a61c07/polit_nal_produccion_consumo_sostenible-2010.pdf
- Resolución 1503 de 2010, Pub. L. No. Diario oficial 47792 del 05-ago-2010 (2010). https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema_Gestion_de_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20Vigente/Normatividad_Gnl/Resolucion%201503%20de%202010-Ago-04.pdf
- Decreto 1076 de 2015, Pub. L. No. Decreto 1076 de 2015 (2015). https://funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=78153
- Resolución 1519 de 2017, Pub. L. No. Diario Oficial No. 50.308 de 28 de julio de 2017 (2017). https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minambiente_1519_2017.htm
- Mondragón Pérez, A. R. (2002). ¿Qué son los indicadores? *Revista de Información y Análisis*, 19. <http://dsp.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2013/12/Que-son-los-indicadores-2019-20.pdf>
- MRC. (2010). *Herramienta de Evaluación Rápida de la Sostenibilidad de Hidroeléctricas en un contexto amplio de cuenca*. <https://www.mrcmekong.org/assets/Publications/Reports/RSAT-Revision-3-for-printingOCT-3-2010-Corrected-FINAL.PDF>
- Nautiyal, H., & Goel, V. (2020). Sustainability assessment of hydropower projects. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121661. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121661>
- Ortegón Romero, F. (2019, noviembre 4). *La importancia de aprender a medir la sostenibilidad empresarial*. <https://www.linkedin.com/pulse/la-importancia-de-aprender-medir-sostenibilidad-felipe-orteg%C3%B3n-romero/>
- Pérez, M. (2021). *Bases Metodológicas para la medición de la sostenibilidad*.
- Polanco, J., Ramírez, F., & Orozco, M. (2016). International standards effect on corporate sustainability: A senior managers' perspective. En *Estudios Gerenciales* (Vol. 32, Issue 139, pp. 181–192). Universidad Icesi. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.05.002>
- Polanco López de Mesa, J. A., & Ramírez Atehortúa, F. H. (2017). *Evaluación de la sostenibilidad en empresas de energía. Una investigación aplicada a centrales de generación hidroeléctrica* (1a ed.).
- Pracheil, B. M., McManamay, R. A., Parish, E. S., Curd, S. L., Smith, B. T., DeRolph, C. R., Witt, A. M., Ames, S., Day, M. B., Graf, W., Infante, D., McCoskey, D. N., Rugani, K., Vezina, C., Welch, T., & West, A. (2019). A Checklist of River

- Function Indicators for hydropower ecological assessment. *Science of The Total Environment*, 687, 1245–1260.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.049>
- Rosso, M., Bottero, M., Pomarico, S., la Ferlita, S., & Comino, E. (2014). Integrating multicriteria evaluation and stakeholders analysis for assessing hydropower projects. *Energy Policy*, 67, 870–881.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.12.007>
- Sectorial - Sectorial Reports. (2020). *Informe sector energía eléctrica - noviembre 2020*.
- Siew, R. (2015). A review of corporate sustainability reporting tools (SRTs). *Journal of Environmental Management*, 164, 180–195.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.09.010>
- Siew, R. (2017, octubre 6). *Sostenibilidad. Sabemos que es importante, pero ¿cómo la medimos?* Foro Económico Mundial.
<https://es.weforum.org/agenda/2017/10/sostenibilidad-sabemos-que-es-importante-pero-como-la-medimos>
- Superintendencia Financiera de Colombia. (2021). *DOCUMENTO TÉCNICO: Divulgación de información de sostenibilidad o ESG de COLOMBIA*.
<https://unepinquiry.org/wp-content/uploads/2020/04/presenta>
- Tahseen, S., & Karney, B. W. (2017). Reviewing and critiquing published approaches to the sustainability assessment of hydropower. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 225–234.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.031>
- Torres Romero, L. F. (2012). *Propuesta para la integración de los sistemas de gestión NTC-ISO 9001, NTC-ISO 14001 Y NTC-OHSAS 18001 PARA EMPRESAS DEL SECTOR DE INFRAESTRUCTURA EN OBRAS CIVILES SUBTERRÁNEAS*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Trufanov, V. V. (2013). Modeling development options of electric power systems in conditions of multiple stakeholders. *Thermal Engineering*, 60, 931–937.
<https://doi.org/https://doi-org.consultaremoti.upb.edu.co/10.1134/S0040601513130107>
- UPME. (2020). *PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN – TRANSMISIÓN 2020 – 2034*.
http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2020/Volumen1_Plan_Expansion_Generacion_Transmision_2020_2034_Final.pdf
- USGBC. (2022). *LEED*. <https://www.usgbc.org/leed>
- Voegeli, G., Hediger, W., & Romerio, F. (2019). Sustainability assessment of hydropower: Using causal diagram to seize the importance of impact pathways. *Environmental Impact Assessment Review*, 77, 69–84.
<https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.03.005>
- Wang, S., Shen, W., Tang, W., Wang, Y., Duffield, C. F., & Hui, F. K. P. (2019). Understanding the social network of stakeholders in hydropower project development: An owners' view. *Renewable Energy*, 132, 326–334.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.07.137>

- WCD. (2000). *Dams and Development - A new framework for decision-making: The report of the World Commission on Dams*.
https://archive.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf
- XM. (2022). *Capacidad efectiva por tipo de generación*.
<http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Zhang, Y., Ma, H., & Zhao, S. (2021). Assessment of hydropower sustainability: Review and modeling. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128898.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128898>

ANEXOS

Anexo 1. Anteproyecto de grado

Anteproyecto de grado: “Guía Metodológica para la evaluación de la sostenibilidad en centrales hidroeléctricas”