



Energías renovables no convencionales en Colombia y su proyección para el año 2030

Laura Rocío Andrade Ríos

Sergio Cardona Escobar

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental

Asesor

Sebastian Heredia Quintana, Ingeniero Mecánico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2021

Cita	Andrade Ríos y Cardona Escobar [1]
Referencia	[1] A. Andrade Ríos y S. Cardona Escobar, “Energías renovables no convencionales en Colombia y su proyección para el año 2030.”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.
Estilo IEEE (2020)	



Especialización en Gestión Ambiental, Cohorte XI.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesus Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodriguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
3. CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN	13
4. METODOLOGÍA.....	26
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
5.1 Regiones en Colombia con mayor potencial de generación de energías renovables no convencionales	28
5.1.1 Regiones con potencial de generación de energía eólica.....	28
5.1.2 Regiones con potencial de generación de energía solar.....	36
5.1.3 Potencial de generación de hidrógeno verde	39
5.2 Estado actual de los principales proyectos de generación de energía inscritos en la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME	42
5.3 Impacto en la reducción de emisiones de GEI a través de la generación de energías solar, eólica y la producción de hidrógeno.....	53
5.4 Componentes principales de una estrategia de transición energética exitosa en el país para el año 2030 y sus beneficios en materia ambiental	60
6. CONCLUSIONES.....	64
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Demanda de energía primaria en el mundo y emisiones de CO ₂ por escenario.....	10
Figura 2. Capacidad efectiva instalada en Colombia 2019.....	17
Figura 3. Tendencia de la capacidad instalada para la energía fotovoltaica en Colombia	18
Figura 4. Problemas para la implementación de la energía solar fotovoltaica en Colombia.....	19
Figura 5. Tendencia de la capacidad instalada de energía eólica en Colombia.....	20
Figura 6. Velocidad promedio del viento a 10 m de altura.....	30
Figura 7. Velocidad máxima del viento a 10 m de altura	32
Figura 8. Densidad de energía eólica a 80 m de altura	34
Figura 9. Posición nacional referente a los promedios anuales de velocidad del viento	36
Figura 10. Irradiación global horizontal anual.....	38
Figura 11. Evolución del LCOH en Colombia	41
Figura 12. Evolución de proyectos vigentes según el tipo de energía.....	44
Figura 13. Proyectos de energía solar vigentes.....	46
Figura 14. Proyectos de energía solar vigentes.....	47
Figura 15. Capacidad (MW) de proyectos vigentes según el tipo de energía.....	48
Figura 16. Emisiones de CO ₂ año 2030.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Evolución de normatividad colombiana en materia de energías renovables	9
Tabla 2. Mercado de energías en Colombia 2016-2030. Capacidad instalada	23
Tabla 3. Capacidad y generación de energía dedicada a la producción de hidrógeno verde, Colombia.....	24
Tabla 4. Proyectos vigentes en la UPME.....	42
Tabla 5. Estado de proyectos presentados en la UPME.....	43
Tabla 6. Proyectos vigentes por departamento	45
Tabla 7. Capacidad (MW) de proyectos vigentes por departamento	49
Tabla 8. Capacidad (MW) de proyectos solares vigentes.....	50
Tabla 9. Capacidad (MW) de proyectos eólicos vigentes.....	51
Tabla 10. Ubicación de los principales proyectos solares vigentes	52
Tabla 11. Ubicación de los principales proyectos eólicos vigentes.....	53
Tabla 12. Cálculo de emisiones de CO ₂ e evitadas por generación de energía solar fotovoltaica	54
Tabla 13. Cálculo de emisiones de CO ₂ e evitadas por generación de energía eólica.....	55
Tabla 14. Descripción de escenarios.....	57
Tabla 15. Resumen de expansión con diferentes escenarios	58

GLOSARIO

Autogeneración

"Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento en que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin".

Autogeneración a gran escala

"Autogeneración cuya potencia máxima supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)".

Autogeneración a pequeña escala

"Autogeneración cuya potencia máxima no supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)".

Alternativas

"Una gama de opciones estratégicas que pueden alcanzar lo mejor posible el objetivo de la PPP en el costo más bajo y/o la ventaja más grande para el ambiente y la sostenibilidad, o que alcanza el mejor equilibrio entre los objetivos que están en conflicto (por ejemplo: exige la reducción, localizaciones alternativas, diversos tipos de desarrollo que puedan alcanzar el mismo objetivo)".

Cadena energética

"Es el conjunto de todos los procesos y actividades tendientes al aprovechamiento de la energía que comienza con la fuente energética misma y se extiende hasta su uso final".

Cogeneración

"Es el proceso mediante el cual a partir de una misma fuente energética se produce en forma combinada energía térmica y eléctrica, en procesos productivos industriales y/o comerciales para el consumo propio o de terceros y cuyos excedentes pueden ser vendidos o entregados en la red".

Eficiencia energética

"Es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles. A través de la eficiencia energética, se busca obtener el mayor provecho de la energía, bien sea a partir del uso de una forma primaria de energía o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre el ambiente y los recursos naturales renovables".

Energía eólica

"Llámesse energía eólica, a la energía que puede obtenerse de las corrientes de viento".

Energía solar

"Llámesse energía solar, a la energía transportada por las ondas electromagnéticas provenientes del sol".

Energía de biomasa

"Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o haya estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad".

Energía de los mares

"Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que comprende fenómenos naturales marinos como lo son las mareas, el oleaje, las corrientes marinas, los gradientes térmicos oceánicos y los gradientes de salinidad, entre otros posibles".

Energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos

"Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en los cuerpos de agua a pequeña escala".

Energía geotérmica

"Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en el calor que yace del subsuelo terrestre".

Excedente de energía

"La energía sobrante, una vez cubiertas las necesidades de consumo propias, producto de una actividad de autogeneración o cogeneración".

Fuentes convencionales de energía

"Son aquellos recursos de energía que son utilizados de forma intensiva y ampliamente comercializados en el país".

Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE)

"Son aquellos recursos de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCE la energía nuclear o atómica y las FNCE. Otras fuentes podrán ser consideradas como FNCE según lo determine la UPME".

Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCE R)

"Son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCE R la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares. Otras fuentes podrán ser consideradas como FNCE R según lo determine la UPME".

Generación Distribuida (GD)

"Es la producción de energía eléctrica, cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local (SDL). La capacidad de la generación distribuida se definirá en función de la capacidad del sistema en donde se va a conectar, según los términos del código de conexión y las demás disposiciones que la CREG defina para tal fin".

Gestión eficiente de la energía

"Conjunto de acciones orientadas a asegurar el suministro energético a través de la implementación de medidas de eficiencia energética y respuesta de la demanda".

Respuesta de la demanda

"Consiste en cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un patrón usual de consumo, en respuesta a señales de precios o incentivos diseñados para inducir bajos consumos".

Sistema energético nacional

"Conjunto de fuentes energéticas, infraestructura, agentes productores, transportadores, distribuidores, comercializadores y consumidores que dan lugar a la explotación, transformación, transporte, distribución, comercialización y consumo de energía en sus diferentes formas, entendidas como energía eléctrica, combustibles líquidos, sólidos o gaseosos, u otra. Hacen parte del Sistema Energético Nacional, entre otros, el Sistema Interconectado Nacional, las Zonas No Interconectadas, las redes nacionales de transporte y distribución de hidrocarburos y gas natural, las refinerías, los yacimientos petroleros y las minas de carbón, por mencionar solo algunos de sus elementos".

Transición energética

“Se define como un cambio estructural a largo plazo en los sistemas energéticos. Ha tenido lugar en el pasado, y sigue ocurriendo en todo el mundo”.

Zonas No Interconectadas (ZNI)

"Se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN)".

RESUMEN

El cambio climático es una realidad mundial y a través del acuerdo de París del año 2015 el mundo se compromete a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero – GEI y por consiguiente el aumento de la temperatura global. El uso de las energías renovables surge como una de las alternativas para cumplir con estos objetivos ya que genera beneficios ambientales relacionados con la disminución de la huella de carbono.

La Agencia Internacional de Energía en su informe de energía global para el año 2019, ilustra la demanda de los diferentes tipos de energía y sus respectivas emisiones de CO₂ en tres escenarios: Políticas establecidas, Desarrollo sostenible y Políticas actuales. Se puede observar que el escenario mas favorable es el de Desarrollo sostenible, en el cual se muestra una reducción de la demanda para el año 2040, un aumento o expansión de las energías renovables y una reducción de las emisiones de CO₂.

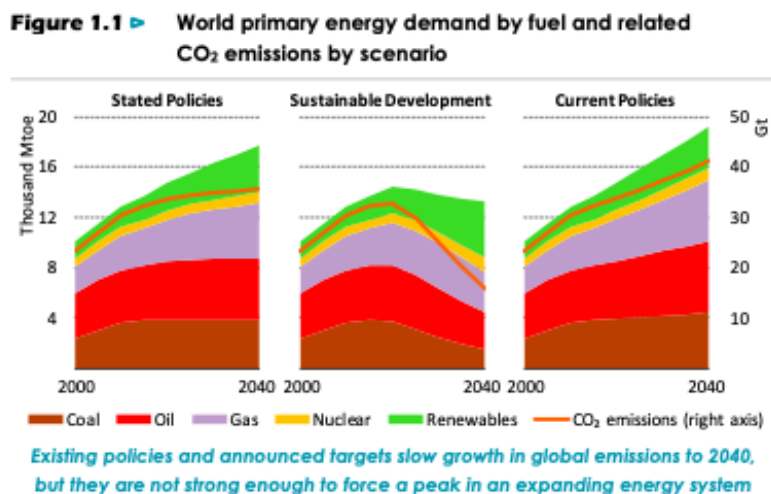


Figura 1. Demanda de energía primaria en el mundo y emisiones de CO₂ por escenario

Fuente: (Agencia Internacional de Energía, 2020)

Colombia es un país con gran variedad de recursos naturales. Sus condiciones geográficas hacen que la implementación de energías renovables no convencionales sea viable y efectiva.

Se analizará el potencial en la generación de energías renovables no convencionales en Colombia; tales como la energía eólica, la energía solar y la producción de hidrógeno verde, y se conocerá el estado actual y la proyección de estas energías para el año 2030 y su relación con los compromisos internacionales en la reducción de gases efecto invernadero – GEI.

En la presente investigación se realiza además un análisis de los principales componentes de una estrategia de transición energética; tales como políticas, transporte y logística, seguridad, enfoque social, enfoque ambiental y económico, conflictos, incentivos e igualdad.

Por último, a partir de la información consultada y el análisis realizado se procederá a dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Colombia cumplirá su compromiso en la reducción del 51% de gases efecto invernadero para el año 2030?

Palabras clave: Gases efecto invernadero, cambio climático, calentamiento global, energía eólica, energía solar, hidrógeno verde, transición energética, mercado energético.

ABSTRACT

Climate change is a global reality and according to the Paris agreement of 2015 the nations are committed to reduce emissions of Greenhouse Gases - GHG and therefore the increase in global temperature. The use of renewable energies emerges as one of the alternatives to reach these goals which generate environmental benefits related to the reduction of the carbon footprint.

Colombia is a country with a great variety of natural resources. Its geographical conditions make the implementation of non-conventional renewable energies viable and effective.

We will analyze the potential in the generation of non-conventional renewable energies in Colombia; such as wind energy, solar energy, and the production of green hydrogen, on the other hand we will know the current status and projection of these energies for the year 2030 and their relationship with international commitments in the reduction of greenhouse gases - GHG.

This research also includes an analysis of the main components of an energy transition strategy, such as policies, transportation and logistics, security, social approach, environmental and economic approach, conflicts, incentives, and equality.

We will quantify the potential that Colombia has in the generation of wind energy, solar energy, and production of green hydrogen for the year 2030 and a comparison will be made with the amount of greenhouse gases that will no longer be emitted thanks to the implementation of these energies.

Finally, we will solve the following question: ¿Will Colombia fulfill its commitment to reduce 51% of greenhouse gases by 2030?

Key words: Greenhouse gases, climate change, global warming, wind energy, solar energy, green hydrogen, energy transition, energy market.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el sector energético contribuye con el 35% de las emisiones de Gases Efecto Invernadero - GEI, seguido del sector agropecuario con 24%, el sector industria con 21%, el sector transporte con 14% y el sector vivienda con 6%. (Latin Clima, 2020). En Colombia, el sector energético contribuye con el 44%, el sector agro con el 43%, seguidos de los sectores asociados con residuos y procesos industriales (IDEAM, 2015).

El Gobierno Nacional actual, en informe presentado a los medios de comunicación y publicado en la página web del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, menciona que Colombia reducirá en un 51% sus emisiones de gases efecto invernadero para el año 2030. Este compromiso es ratificado en la publicación del libro “Transición Energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia”, en el cual también se menciona que el sector minero energético cuenta con un plan de gestión integral del cambio climático, con el cual contribuirá a la disminución en el equivalente de 11,2 millones de toneladas de dióxido de carbono para ese mismo año. El presidente manifestó que esto implica fortalecer acciones como la transición energética, la movilidad limpia, la lucha contra la deforestación, la siembra de 180 millones de árboles, el pago por servicios ambientales y la conservación de la Amazonía y de los páramos (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Según el libro “Transición energética en Colombia” publicado por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, Colombia por su ubicación geográfica y disponibilidad de recursos naturales, cuenta con una de las matrices energéticas más limpias del mundo, siendo el sexto país del mundo con mayor recurso hídrico renovable, sin embargo, esta ventaja también lo hace un país muy dependiente de la variabilidad climática. Igualmente cabe resaltar que departamentos como la Guajira gozan de una radiación solar que es un 60% más alta y con una velocidad de viento dos veces más rápida que el promedio mundial, por esta razón, se está buscando incorporar en la matriz energética de Colombia las energías renovables no convencionales tales como la eólica y la solar (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

A partir del análisis de la información anterior, resulta la siguiente inquietud: ¿Cumplirá Colombia con la meta propuesta para el año 2030 en reducción del 51% en sus emisiones de GEI? Para responder esa pregunta inicial, debemos responder entonces las siguientes preguntas específicas: ¿Cómo aportará el sector energético de Colombia en este compromiso? ¿La transición energética incluye una transición social? ¿Se está realizando un seguimiento permanente a la gestión de la transición energética en Colombia? ¿Se está realizando un seguimiento a la implementación de proyectos de energías renovables no convencionales? ¿Se está realizando un seguimiento a la curva de emisiones de gases efecto invernadero en el país y a las causas de su comportamiento? ¿Cuáles proyectos a corto y mediano plazo se han ejecutado a la fecha y cuál ha sido su impacto? Para dar respuesta a estas preguntas es necesario indagar en relación con el tipo sobre el tipo de acciones a implementar que garanticen el crecimiento de estas energías; normatividad, incentivos, instrumentos de control y capacidad técnica y tecnológica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Analizar el potencial de generación de energía solar, energía eólica y producción de hidrógeno verde en Colombia y su impacto en la reducción de GEI para el año 2030.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar y analizar las regiones en Colombia con mayor potencial de generación de energías renovables no convencionales.
- Identificar y analizar el estado actual de los principales proyectos de generación de energía inscritos en la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME.
- Evaluar cómo la generación de energía solar, eólica y la producción de hidrógeno impactan en la reducción de emisiones de GEI.
- Identificar los componentes principales que debe tener una estrategia que garantice una transición energética exitosa en el país para el año 2030 y sus beneficios en materia ambiental.

2. MARCO TEÓRICO

Gases de efecto invernadero y cambio climático

Los Gases de Efecto Invernadero son compuestos químicos en estado gaseoso como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) que se acumulan en la atmósfera de la tierra y que son capaces de absorber la radiación infrarroja del sol, aumentando y reteniendo el calor en la atmósfera (Ministerio de Ambiente, 2021). El efecto invernadero se asocia principalmente a los gases presentes en la atmósfera que retienen parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre tras ser calentada por el sol, manteniendo la temperatura del planeta a un nivel adecuado para el desarrollo de la vida.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático, IPCC (2014), concluye que la temperatura del planeta está aumentando como resultado del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los impactos del cambio climático afectarán principalmente la disponibilidad de recursos, la producción de alimentos, y en términos generales, el crecimiento económico, entre otros. Las proyecciones indican que el aumento en los eventos climáticos severos como olas de calor, inundaciones, tormentas e incendios forestales serán los responsables de 700.000 muertes por año para el 2030, convirtiéndose en el mayor desafío que el mundo ha enfrentado. (González, T. 2015).

Con 197 partes, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) cuenta con una composición casi universal, y es el tratado precursor del Acuerdo de París sobre el cambio climático de 2015. El objetivo principal del Acuerdo de París es mantener el aumento de la temperatura media mundial en este siglo muy por debajo de los 2 °C, e impulsar los esfuerzos para limitar aún más este aumento a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales¹.

¹ Durante las fechas en las cuales se finalizó este documento, en la ciudad de Glasgow (Escocia), se desarrolló la COP26, conferencia en la cual se ratificaron algunos acuerdos estipulados en el Acuerdo de París y se llegó al consenso en otros puntos de interés para mitigar los efectos del cambio climático.

La CMNUCC es también el tratado precursor del Protocolo de Kyoto de 1997. El objetivo último de todos los acuerdos de la CMNUCC es estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida una interferencia humana peligrosa en el sistema climático, en un marco temporal que permita a los ecosistemas adaptarse de forma natural y permita el desarrollo sostenible.

Energías renovables no convencionales

La energía es indispensable para el desarrollo económico de un país. El rápido crecimiento demográfico, la expansión del sector industrial, el acelerado crecimiento tecnológico, entre otros factores, han incrementado la demanda de energía, y, en consecuencia, el sistema eléctrico es cada vez más susceptible de no satisfacer el consumo de energía; además, la generación de energía, a partir de fuentes no renovables como los combustibles fósiles, impactan negativamente al medio ambiente. Por el contrario, la generación a partir de fuentes renovables soluciona la problemática ambiental y permite diversificar la matriz energética. Colombia posee gran variedad de recursos naturales. La mayor cantidad de energía generada en el país corresponde a fuentes renovables, principalmente a partir de hidroeléctricas. Es así como las energías renovables juegan un papel fundamental en la economía de Colombia. (Londoño, A. 2017).

Las energías renovables son un hito fundamental para lograr la estabilización de los GEI en la atmósfera. Estas se definen como aquellas fuentes de energía basadas en la utilización de recursos naturales tales como el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal y se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, sino recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente.

Las energías renovables no convencionales (ERNC) son todas aquellas fuentes de generación energética en las cuales no se incurre en el consumo, gasto o agotamiento de su fuente generadora. Dentro de ellas tenemos: energía solar, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz. La energía hidráulica es una energía renovable pero no se considera no convencional ya que se nutre energéticamente de la fuerza mecánica del agua, lo cual es un proceso de generación de tipo convencional.

Las ventajas de las ERNC, es que son energías que impactan positivamente en el medio ambiente dado a que en su proceso de generación se mitiga la emisión de gases de efecto invernadero, provienen de recursos de acceso gratuito e inagotable y contribuyen al autoconsumo eléctrico en los hogares. Dentro de sus desventajas se destacan el “alto costo” de producción comparado con las fuentes de energía de tipo convencional, la dependencia de las condiciones climatológicas, los sistemas de conectividad o accesibilidad y la viabilidad de la carga generada con la energía solar y eólica principalmente, lo cual genera inconvenientes frente al sistema de generación nacional.

A continuación, se describen las energías renovables no convencionales que abordaremos para efectos del presente trabajo:

Energía solar fotovoltaica

La energía solar es aquella que se obtiene del aprovechamiento de los rayos del sol. La energía eléctrica, se genera gracias a la utilización de paneles fotovoltaicos, los cuales están conformados por las celdas o células fotovoltaicas que permiten capturar la energía solar, para luego transformarla en electricidad.

Este tipo de energía puede producirse a escala comercial o también puede disponerse en configuraciones más sencillas para usarla en hogares o en microrredes. Esto es una ventaja para países en vía de desarrollo con buenos recursos de energía solar, ya que les da una alternativa de suministro de energía si no se encuentran cerca de una línea de transmisión.

Al introducirse la tecnología utilizada para el aprovechamiento de esta energía, los costos eran muy elevados, sin embargo, en la última década el costo de fabricación de paneles solares ha disminuido considerablemente haciéndola más asequible a nivel mundial.

Energía eólica

La energía eólica es aquella producida por el viento. El viento es empleado para producir electricidad a partir de la energía cinética generada en el aire por el movimiento. Para esto se utilizan las turbinas eólicas, donde el viento golpea las palas, estas giran y hace que gire la turbina. En ese momento la energía cinética pasa a convertirse en energía de rotación y se produce energía eléctrica a través del electromagnetismo.

La cantidad de energía eólica que se produzca depende de las dimensiones de la turbina y sus palas. Según información suministrada en la página web de IRENA, en teoría, cuando la velocidad del viento se duplica, el potencial de la energía eólica aumenta en un factor de ocho.

Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se genera a través de un proceso electroquímico conocido como electrólisis, el cual consiste en utilizar electricidad proveniente de fuentes renovables para separar el hidrógeno del oxígeno que está presente en el agua. En dicho proceso de producción no se presentan emisiones de gases efecto invernadero.

Según el libro “Transición Energética en Colombia” publicado por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, el hidrógeno es un vector energético que permite integrar la energía renovable no utilizada, favoreciendo la penetración de las energías renovables no convencionales en el sistema eléctrico. Además, facilita la sustitución de materias primas y combustibles usados en la industria, abriendo una nueva ruta tecnológica para sectores históricamente difíciles de descarbonizar.

Normatividad para energías renovables en Colombia

Castaño, D.M (2020) refiere que en Colombia existe muy poca normativa asociada a energías renovables no convencionales. Se deberá legislar, para que de cierto modo la normatividad ambiental aplicable a dichos procesos se flexibilice o, en su defecto, se estandarice debido a que procesos de esta índole ante las autoridades competentes son engorrosos y de amplio trámite.

El marco institucional para el sector eléctrico en Colombia involucra varios organismos que se encargan de promover los incentivos. El encargado de diseñar las políticas en materia energética es el Ministerio de Minas y Energía. Por su parte, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) es la encargada de la planeación y el apoyo para la formulación de políticas públicas. Asimismo, la encargada de regular el sector con el objetivo de asegurar la buena prestación del servicio es la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). De otro lado, la supervisión y el control del sector energético están a cargo de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y los aspectos judiciales a cargo de la Superintendencia de Industria y Comercio (Castaño Gómez, M. & García-Rendón, J. J. 2020).

En mayo de 2014 se aprobó la Ley 1715, que desarrolla una política pública para la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Esta ley tiene por

finalidad establecer un marco legal, instrumentos de acción y estímulos tributarios para promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable (Castaño, D. M. 2020).

Actualmente, los proyectos de energía renovable cuentan con un marco jurídico y regulatorio que pretende impulsar la diversificación energética que comienza con la Ley 1715 de 2014, el Decreto Reglamentario 2143 de 2015, la Resolución 030 de 2018 CREG, la Resolución 038-2018 CREG y el Decreto 570 de 2018 del Ministerio de Minas y Energía. (Collazos *et al.*, 2019). A partir del año 2019 se han seguido generando decretos o leyes enfocados en mejorar los incentivos y facilitar los trámites para radicación de proyectos de generación de fuentes de energías renovables no convencionales, como se puede observar en la Tabla 1.

A continuación, se presenta un resumen de la evolución de la normatividad colombiana en materia de energías renovables:

Tabla 1. Evolución de normatividad colombiana en materia de energías renovables

Normativa	Descripción
<p>Ley 51 de 1989 (Congreso de Colombia)</p>	<p>Se crea la Comisión Nacional de Energía que es la encargada de determinar funciones de planeación energética, además de “efectuar, contratar o promover la realización de estudios para establecer la conveniencia económica y social del desarrollo de fuentes y usos energéticos no convencionales y adoptar la política respectiva”.</p>

Normativa	Descripción
<p>Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia)</p>	<p>Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.</p> <p>El Ministerio tiene la función de realizar programas que sustituyan los recursos no renovables.</p>
<p>Ley 142 de 1994 (Congreso de Colombia)</p>	<p>Regulación de los servicios públicos domiciliarios en el país, incentivando una fuente no convencional de energía como lo es el gas natural.</p>
<p>Ley 143 de 1994 (Congreso de Colombia)</p>	<p>Conocida como la “Ley Eléctrica”. Se le atribuye a la UPME la función de elaborar y actualizar el Plan Energético Nacional (PEN).</p>
<p>Ley 697 de 2001 (Congreso de Colombia)</p>	<p>Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas. Creó el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE).</p>
<p>Decreto 70 de 2001 (MME)</p>	<p>Se incluye en las funciones del Ministerio de Minas y Energía adoptar la política sobre generación, transmisión, interconexión, distribución y establecimiento de normas técnicas en materia de energía eléctrica, sobre el uso racional de energía y el desarrollo de fuentes alternas.</p>
<p>Resolución 060 de 2007 (CREG)</p>	<p>Establece normas sobre la participación en la actividad de generación de energía eléctrica.</p>

Normativa	Descripción
<p>Ley 1715 de 2014 (UPME)</p>	<p>Tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable. Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional y se establecen diferentes incentivos.</p>
<p>Resolución 227 de 2015 (CREG)</p>	<p>Define la metodología para determinar la energía firme de plantas solares fotovoltaicas.</p>
<p>Decreto 348 de 2017 (MME)</p>	<p>Establece los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala.</p>
<p>Ley 1931 de 2018</p>	<p>Tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.</p>
<p>Decreto 2462 de 2018</p>	<p>Determinó que los proyectos de generación que empleen fuentes de energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, o de biomasa inferiores a diez megavatios no requieren el Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA).</p>
<p>Resolución 40791 de 2018 (MME)</p>	<p>Ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, por el cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas solares fotovoltaicas.</p>

Normativa	Descripción
Resolución 030-2018 CREG	Regula las actividades de autogeneración a pequeña y gran escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional (SIN).
Resolución 038-2018 CREG	Establece las reglas para la actividad de autogeneración en las Zonas No Interconectadas (ZNI).
Decreto 570 de 2018	Se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones.
Resolución 40591 de 2019 (MME)	Se convoca a la subasta de contratación de largo plazo para proyectos de generación de energía eléctrica y se definen los parámetros de su aplicación.
Ley 1955 de 2019	Se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 "PACTO POR COLOMBIA, PACTO POR LA EQUIDAD". Mejora los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014 y establece que entre un 8 y un 10% de las compras de energía de los comercializadores deben ser de fuentes de energía renovables no convencionales.
Decreto Ley 2106 de 2019	Dictan normas para simplificar, suprimir y reformar trámites, procesos y procedimientos innecesarios existentes en la Administración Pública. Incluyó dos artículos para agilizar la obtención de incentivos tributarios para fuentes renovables no convencionales.
Ley 2099 de 2021	Se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. Establece priorización de

Normativa	Descripción
	los trámites ambientales para proyectos del sector de energía que cumplan ciertas condiciones.
Decreto 099 de 2021	Permite a los operadores de red realizar ampliación de cobertura dentro de sus zonas de influencia a través de redes no físicas o logísticas, como soluciones solares individuales o microrredes.

Fuente: compilación propia, 2021

3. CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN

Cambio climático

Desde el año 2015 con la firma del Acuerdo de París, las naciones han entendido que la lucha para alcanzar la descarbonización es una realidad para lograr prevenir los impactos del cambio climático. Este acuerdo implica que cada parte establezca cual es su contribución con la lucha internacional para el cambio climático, que se definen como Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) y son el núcleo del acuerdo para lograr los objetivos de reducción de emisiones a largo plazo.

Bueno y Calcagno (2018), hacen una breve caracterización del proceso multilateral en la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y estudian las NDC presentadas por los diez países que generan mayor cantidad de emisiones totales de Gases Efecto Invernadero

- GEI a nivel global. La meta de reducción de emisiones de cada uno de los diez países es analizada para los años 2025 y 2030 junto con las respectivas estrategias para alcanzarla (Bueno, M. del P., & Calcagno, D. L. 2018).

Dentro del análisis mencionado anteriormente se destacan países como China, que es el principal emisor total de GEI con una participación total del 25% al 27%, y emite más del 21% de las emisiones globales solo como resultado del sector energético. La NDC de este país incluye una meta concreta respecto al sector energético y es llevar al 20% la participación de las energías renovables, sin embargo, esta ha sido cuestionada fuertemente por otras naciones. Así mismo se analiza la NDC de Estados Unidos, quien está catalogado como segundo emisor global, cuya meta involucra una contribución de reducir el 26 al 28% de sus emisiones a niveles de 2005 para el año 2025, pero es bastante escueta ya que no especifica metas por sector ni la proyección al año 2030. Las NDC de Estados Unidos y de China, fueron calificadas como críticamente insuficientes y altamente insuficientes, respectivamente, por *Climate Action Tracker*.

Más allá de las metas o NDC establecidas por las naciones, las cuales son el medio o vehículo para alcanzar la descarbonización, no hay que dejar de lado el componente humano en la lucha por el cambio climático. Portador (2020) define la “*seguridad humana*” como un concepto impulsado en la década de los noventa por la Organización de Naciones Unidas. Fue adoptada como eje rector de las directrices de organismos internacionales en distintas materias (migración, cambio climático, conflictos bélicos, crisis alimentarias y humanitarias). La seguridad humana se colocó prontamente en los discursos y las agendas de los organismos internacionales (Portador, T. 2020). Finalmente, ¿Quiénes pagan los costos del cambio climático? Los pobres, los países del sur global, sectores vulnerables de población (mujeres, niños, ancianos), debido a que sus recursos son limitados para afrontar las consecuencias del cambio climático. Urge continuar ampliando el conocimiento científico en torno a los efectos y medidas del cambio climático, pero no solo desde las ciencias exactas (Portador, T. 2020).

Transición energética

La lucha contra el cambio climático y las NDC establecidas por las naciones, han llevado a cada país a implementar estrategias para identificar sus potenciales fuentes de energías renovables y establecer políticas para su generación.

Según el libro “Transición Energética en Colombia” publicado por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, las direcciones de la política son claras: aumentar la participación de las energías renovables no convencionales de menos del 1% a más de 12% en la matriz energética para el 2022; elevar su objetivo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del 20% al 51% para 2030; y hacer de la “reactivación sostenible” la fuerza que impulsa su estrategia de recuperación económica.

Después de analizar lo anterior concluimos que el objetivo es claro, sin embargo, es importante preguntarse: ¿Cómo está gestionando Colombia su transición energética? Se cuenta con la Ley 1715 aprobada desde el 2014 y con ella se ha incentivado a la inversión en producción de energías renovables no convencionales, pero ¿es esto suficiente? Además de los incentivos tributarios, cuál es el camino a seguir para lograr el desarrollo de nuevas tecnologías, alineados a una equidad e inversión social. ¿Cuál es la estrategia o cuáles son los mecanismos apropiados para lograr ese 51% de reducción en emisiones al año 2030?

El seguimiento al objetivo de reducción de los GEI debe ser una tarea permanente e informada a las diferentes partes interesadas, puesto que las labores para alcanzar la disminución de las emisiones son un compromiso de todos los sectores productivos, en especial el sector energético. Es indispensable contar con los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero, pues es necesario identificar las fuentes de emisión en cada ciudad y así tomar decisiones para su reducción; teniendo en cuenta esto, Colombia, a través del Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM),

desarrolló una metodología para la estimación de emisiones de GEI, siguiendo “Las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI” y en el “Protocolo global para inventarios de emisión de gases de efecto invernadero a escala comunitaria” del World Resources Institute (WRI), el Grupo de Liderazgo Climático (C40), y el Local Governments for Sustainability (ICLEI); así mismo cuenta con una herramienta financiada por el Departamento de Estrategia Empresarial, Energética e Industrial (BEIS) del Reino Unido, del programa UK PACT (Partnering for Accelerated Climate Transitions, o Alianza para Transiciones Climáticas Aceleradas). Esta herramienta consiste en un archivo de Excel que puede ser consultado en <https://www.wwf.org.co/> y <https://www.minambiente.gov.co/>.

Colombia, al ser un país emergente, aún se encuentra explorando tecnologías para generación de energías renovables no convencionales y a la vez ha tenido que lidiar con altos costos de implementación. Por esta razón, se están generando políticas gubernamentales que apoyan estas iniciativas y facilitan su implementación a través de investigación, desarrollo e inversión financiera (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

La transición energética en el país está generando grandes cambios normativos, regulativos, económicos, técnicos, y tecnológicos, pero aún hay vacíos en la evaluación del impacto social y las garantías sobre los derechos de las comunidades de las áreas de influencia directa de los proyectos, los cuales no pueden perderse de vista y deben ser evaluados para garantizar su viabilidad.

Energías renovables no convencionales en Colombia

Colombia tiene grandes ventajas a nivel energético por estar ubicado en la zona ecuatorial y además por contar con climas y ecosistemas variados favoreciendo la generación de energía a partir de fuentes alternativas derivadas del viento, el sol y de los residuos de biomasa como los de la caña de azúcar, aceite de palma, arroz y plátano. (Giraldo, M. 2018).

Sin embargo, las energías renovables no convencionales, aún tienen un papel marginal en Colombia, solamente entre energía solar fotovoltaica (9,8 MW) y energía eólica (18,4 MW) suman el 0,98% de la generación de energía (Arango, M. 2019).



Figura 2. Capacidad efectiva instalada en Colombia 2019

Fuente: UPME, 2019

Si se quiere lograr una transición energética exitosa, se hace necesario indagar sobre el tipo de acciones a ejecutar que garanticen la implementación adecuada y el crecimiento continuo y gradual de estas energías tales como: ventajas, desventajas, costos, normatividad, incentivos, instrumentos de control, capacidad técnica y tecnológica para su producción y su impacto social o territorial.

Energía solar

En Colombia, el interés por el uso de la energía solar se revela en las cifras estadísticas de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), las cuales evidencian que, de las iniciativas radicadas durante el año 2019, el 88.3% tiene que ver con energía solar, en donde 9 de cada 10 propuestas para generar energía, usarán paneles solares. Para 2021, el Gobierno Nacional estima

cerrar con 754 MW de capacidad instalada de energía solar (UPME, 2021). Así mismo, la UPME y el Ministerio de Minas y Energía estiman que para antes de 2030 cerca del 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares (Ministerio de Minas y Energía. 2021).

En la Figura 3, se evidencia la tendencia de la capacidad instalada en MW de energía fotovoltaica para Colombia en los últimos 10 años, evidenciándose el crecimiento significativo a partir del año 2018.

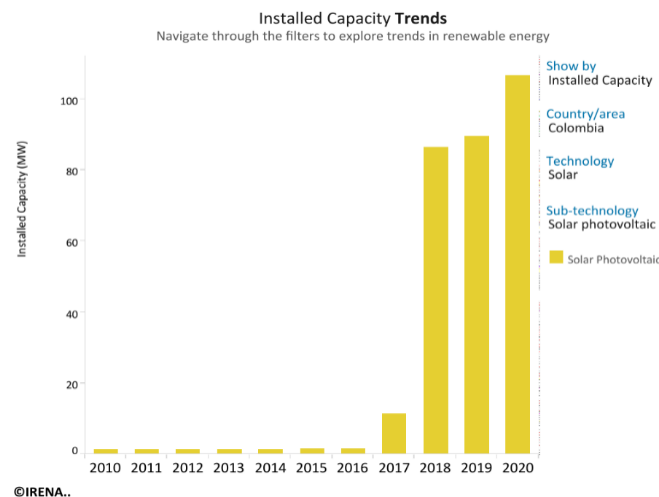


Figura 3. Tendencia de la capacidad instalada para la energía fotovoltaica en Colombia

Fuente: IRENA, 2021

Sin embargo, hay algunos obstáculos que intervienen en la implementación de este tipo de energía. Según el estudio “Solar PV Generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market” publicado el año 2019, los principales problemas están relacionados con la falta de intención o interés público, falta de conocimiento y que no se tengan suficientes incentivos económicos. En la Figura 4 se pueden observar estos problemas, según encuesta realizada en el estudio en mención.

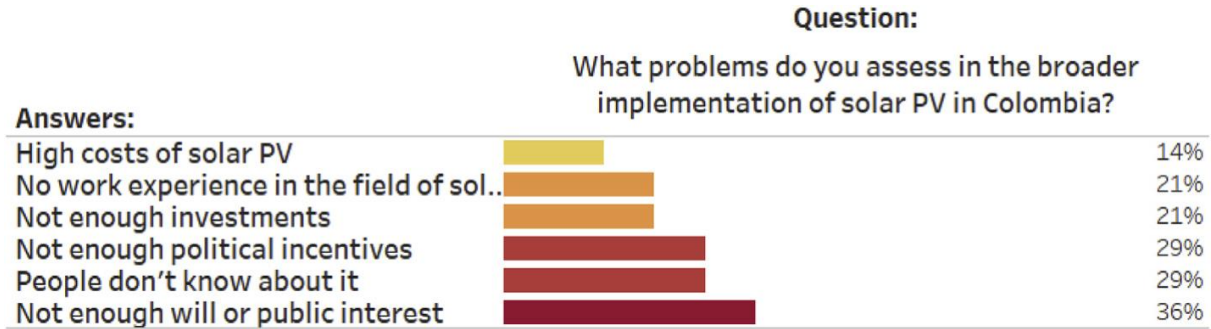


Figura 4. Problemas para la implementación de la energía solar fotovoltaica en Colombia

Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>

Energía eólica

Las turbinas eólicas surgieron hace más de un siglo. Tras la invención del generador eléctrico en la década de 1830, los ingenieros comenzaron a intentar aprovechar la energía eólica para producir electricidad. La generación de energía eólica tuvo lugar en el Reino Unido y los Estados Unidos entre 1887 y 1888, pero se considera que la energía eólica moderna se desarrolló por primera vez en Dinamarca, donde se construyeron turbinas eólicas de eje horizontal en 1891 y se inició la operación de una turbina eólica de 22,8 metros en 1897. (IRENA, 2021).

La energía eólica suministraría más de un tercio de la demanda total de electricidad para 2050 y está alineada con escenarios de transformación energética de varias instituciones, destacando claramente la importancia de ampliar la cuota de generación de energía eólica para descarbonizar el sistema energético en las próximas tres décadas. (IRENA, 2019).

La energía eólica presenta un gran potencial en el departamento de La Guajira y la parte costera de la región Caribe, de Santander y Norte de Santander, zonas específicas de Risaralda y Tolima, el Valle del Cauca, el Huila y Boyacá cuentan con recursos aprovechables con mayor potencial de Sur América. (Giraldo, M., Vacca Ramirez, R., & Urrego Quintanilla, A. 2018).

A continuación, se observa la tendencia de capacidad instalada en Colombia durante los últimos 10 años, evidenciándose un incremento significativo en el 2020:

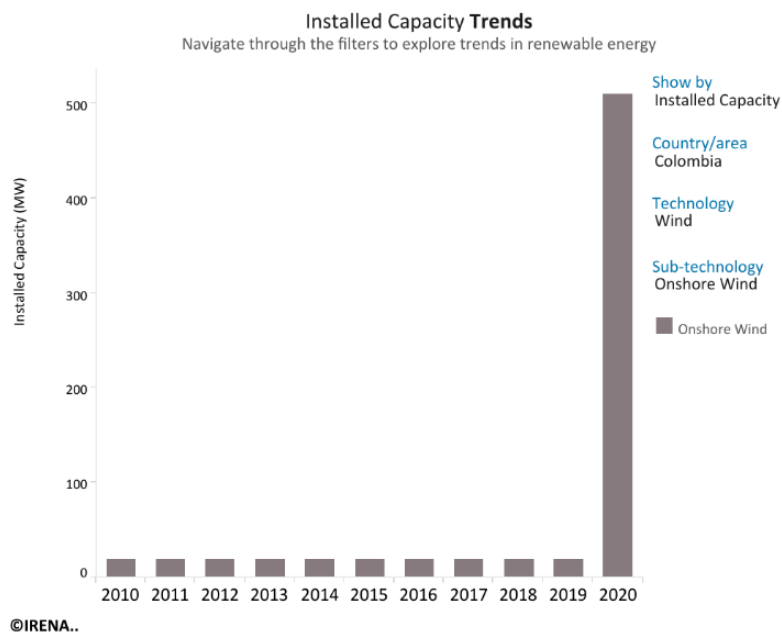


Figura 5. Tendencia de la capacidad instalada de energía eólica en Colombia

Fuente: IRENA, 2021

Así mismo, el sector energético en Colombia tiene un gran potencial de generación de energía eléctrica en parques eólicos marinos. Este potencial es superior y de mayor confiabilidad con respecto a los parques eólicos tradicionales (Cabello Eras, Juan José Sagastume y Alexis Ospino C, A. 2020). Sin embargo, aún existe poca información sobre el desarrollo de la energía eólica marina en Colombia, conocida en inglés como Offshore Wind Energy – OWE.

La energía eólica marina muestra varias ventajas respecto a la energía eólica terrestre (Breton y Moe, 2009; Perveen *et al.*, 2014). Una de las principales ventajas es que, en el océano, la velocidad del viento es más alta y menos inestable debido a la rugosidad de la superficie del mar,

que es más pequeña que en las superficies terrestres (continentales). Las principales desventajas de la energía eólica marina son los costos de construcción y mantenimiento por lo cual las turbinas requieren un diseño estructural eficiente. (Cheng, 2002) (Rueda Bayona *et al.*, 2019).

En el estudio *Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology*, 2019, se indica que, para avanzar en la explotación eólica marina en Colombia, se requiere un estudio más detallado para identificar las mejores ubicaciones para instalar parques eólicos según el potencial energético. Por lo tanto, es fundamental evaluar la factibilidad de instalar la tecnología adecuada de acuerdo a la topografía y mecánica de suelos del fondo marino, el desempeño de los materiales de construcción y la identificación de los impactos potenciales sociales y ambientales que podrían generarse, a través de métodos cuantitativos como Evaluación de ciclo de vida (LCA). Igualmente se concluye que el gobierno debe mejorar la comunicación con diferentes actores de la sociedad (comunidades, industria pesquera, ambientalista), y sectores económicos asociados al turismo, maricultura, energía, naval, portuaria y seguridad. Con el fin de lograr la ejecución de proyectos OWE y al mismo tiempo la producción y distribución sostenible en el territorio.

Hidrógeno verde en Colombia

El hidrógeno verde cada vez toma más fuerza como alternativa para aquellos sectores industriales o de transporte en los cuales la descarbonización es desafiante desde el punto de vista técnico y económico. Este puede ser usado como materia prima para los procesos o como un combustible. Actualmente aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y pocos países, como Australia, Países Bajos, Alemania, China, Arabia Saudita y Chile, han logrado incluirlo dentro de su matriz energética.

Teniendo en cuenta la publicación realizada por IRENA (2021), *Green hydrogen supply: A guide to policy making*, las principales barreras para la producción del hidrógeno verde a nivel

mundial son: costos de producción y de transporte, costos de almacenamiento, falta de claridad sobre la futura demanda, estructuras del sistema de energías no aptas, y la falta de estándares técnicos y comerciales.

En Colombia, aun no se ha iniciado la producción del hidrógeno verde, sin embargo, empresas del sector privado están participando en mesas de trabajo junto con el Ministerio de Minas y Energía para desarrollar proyectos en pro de implementar esta tecnología en el país.

Aunque el hidrógeno verde es una buena alternativa para el almacenamiento de otras energías renovables y es parte importante del plan de transición energética en Colombia, se debe analizar cuáles son sus costos de producción. Según Amell, A. (2021), estos costos dependen casi en un 75% del costo de la electricidad de origen renovable; otro 20% tiene que ver con los costos de capital de los electrolizadores y cerca de un 1% en agua. Por otro lado, están los costos de operación y mantenimiento. Primero, en todo caso, el hidrógeno verde debe ser sustentado como un combustible de origen renovable en Colombia para que quienes lo produzcan y lo utilicen como energético puedan recibir incentivos tributarios de la Ley 1715 (Amell, A. 2021).

Para que este tipo de tecnologías se implementen de manera adecuada, es indispensable que el gobierno tenga en cuenta las recomendaciones de la Misión de Transformación Energética, algunas que menciona Amell, A (2021) son: la regulación del mercado eléctrico, el rol del gas natural en la transición, la descentralización y temas afines como microrredes, el cierre de la brecha en el acceso a la energía eléctrica y la adecuación de un marco institucional para la transformación del sector energético en Colombia.

Mercado energético en Colombia

Según Ramírez Rico, P. F. (2020), el país está creciendo y cada vez, hay mayores consumos energéticos, el consumo residencial industrial se ha incrementado, lo cual hace que los sectores

productivos tengan repuntes de acuerdo a la dinámica de la economía, se requiere de una seguridad energética que esté de la mano de la sostenibilidad ambiental.

Dado que la producción descansa en la energía generada por hidroeléctricas y termoeléctricas, es prioritario aprovechar las potencialidades energéticas que brindan las energías limpias, pues los costos productivos tienen actualmente mucha dependencia de los factores climáticos y del precio del carbón (Ramírez Rico, P. F. 2020).

Sin embargo, como lo indica Pereira Blanco, M. J. (2017), el sistema jurídico energético colombiano no incluye en la canasta energética a las energías renovables como componente central, por cuanto la normatividad nacional solo se limita a fomentar las energías renovables sin implementar reformas estructurales al sistema, en aras de hacer de las energías renovables el elemento central de la economía colombiana.

A continuación, se resume el estado actual del mercado de las energías en Colombia y su proyección al año 2030:

Tabla 2. Mercado de energías en Colombia 2016-2030. Capacidad instalada

Colombia's power market (GWh unless otherwise indicated)															
	2016	2017	2018	2019	2020*	2021*	2022*	2023*	2024*	2025*	2026*	2027*	2028*	2029*	2030*
Domestic installed capacity (GW)⁵	16,6	16,8	17,3	17,6	17,8	18,2	20,0	22,3	23,5	24,3	24,8	25,5	26,1	26,5	27,3
Nuclear	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hydro	11,6	11,7	11,8	11,9	11,9	11,9	12,5	13,1	13,7	14,3	14,3	14,3	14,4	14,4	14,4
Geothermal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coal	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Natural gas	3,3	3,4	3,5	3,5	3,7	3,9	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,5	4,6	4,6	4,9
Oil	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Wind	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,3	1,7	1,8	2,0	2,3	2,6	2,7	3,1
Solar—Grid facing	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,8	0,9	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2,0	2,3
Solar—Behind the meter	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
Batteries	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Biomass and waste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fuente: Latin American Power Outlook: Andean region, 2021

Tabla 3. Capacidad y generación de energía dedicada a la producción de hidrógeno verde, Colombia

(GWh, unless otherwise indicated)	Colombia power capacity and generation dedicated to green hydrogen production															
	2016	2017	2018	2019	2020	2021*	2022*	2023*	2024*	2025*	2026*	2027*	2028*	2029*	2030*	
Hydrogen-dedicated power generation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	981	
Wind	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	926	
Solar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	
Hydrogen-dedicated installed capacity (GW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	
Wind	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	
Solar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Hydrogen-dedicated capacity additions (GW)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	
Wind	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	
Solar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fuente: Latin American Power Outlook: Andean region, 2021

Potencial de energías renovables no convencionales en Colombia

Colombia cuenta con un potencial excepcional para el desarrollo de energías renovables, no solo por sus recursos naturales sino por su mercado. Según señaló en el año 2017 el World Economic Forum, Colombia ocupa la posición número 8 entre las más atractivas, tan solo un puesto por detrás de España (Vanegas Chamorro, M. 2018). En la Tabla 2 y Tabla 3, se observa que Colombia tiene una proyección favorable en cuanto a capacidad instalada para las energías eólica y solar, las cuales aumentan significativamente a partir del año 2023. Igualmente se proyecta iniciar con producción de hidrógeno a partir de energía eólica y solar en el año 2030.

Dentro de la información consultada en la página web de la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME, encargada de realizar la Planeación del desarrollo sostenible de los sectores de minas y energía de Colombia para la formulación de las políticas de Estado y la toma de decisiones en beneficio del país, se encuentra el “Plan Energético Nacional 2020-2050”. El

propósito de este Plan es definir una visión de largo plazo para el sector energético colombiano e identificar las posibles vías para alcanzarla (UPME, 2020).

Una vez realizada la revisión de la bibliografía disponible en relación con la normativa, se identifican una serie de retos por resolver que incentiven realmente la adopción de estas tecnologías. Por ejemplo, se deben establecer mecanismos para disminuir los costos transaccionales, ya que en la actualidad existe gran reproceso, dado el alto número de trámites que se requieren para acceder a los beneficios tributarios (Castaño-Gómez, M., & García-Rendón, J. J. 2020).

4. METODOLOGÍA

La presente investigación tuvo inicialmente un enfoque cualitativo, donde se analizaron datos sobre diferentes variables que influyen en la transición energética que Colombia está implementando para cumplir compromisos internacionales en cuanto a metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para identificar y analizar las regiones con mayor potencial en energías renovables no convencionales se utilizó información suministrada por los mapas interactivos de vientos y radiación solar generados por el IDEAM y también los Atlas del viento y de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia, es sus últimas versiones.

Para analizar el estado actual y el potencial de generación de energía solar, energía eólica y producción de hidrógeno verde en Colombia se investigó, se organizó y se analizó una base de datos de diferentes artículos científicos sobre el comportamiento de las energías renovables no convencionales en Colombia. Para ello se utilizaron buscadores académicos, los recursos de información digital y electrónica de la Universidad de Antioquia y plataformas para organizar bibliografía tales como la aplicación Mendeley. Igualmente, se consultaron los reportes World Energy Outlook de la Agencia Internacional de Energía (IEA) donde se evidencia la generación de energías renovables por países anualmente.

La información contenida en la página web de Unidad de Planeación Minero Energética – UPME facilitó la búsqueda de información de los diferentes proyectos de generación de energías renovables no convencionales inscritos y vigentes en el país, su capacidad de generación y su ubicación por departamento.

Finalmente, los componentes de la estrategia para lograr una transición energética exitosa en Colombia para el año 2030, fueron propuestos teniendo en cuenta informes de estrategias exitosas en otros países publicados en IRENA y analizando las políticas actuales del país, la Ruta de Hidrógeno planteada en el año 2021, el Plan Energético Nacional 2020-2050 y el libro Transición Energética: Un legado para el presente y el futuro de Colombia.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los documentos consultados principalmente para alcanzar los objetivos de la presente investigación fueron: El Plan De Expansión De Generación 2020- 2034 de la UPME del año 2020, El informe de registros de Proyectos de Generación de agosto de 2021 de la UPME, y Las Resoluciones N.º 0520, N.º 0638 de 2007 y la Resolución N.º 0143 de 2016.

El documento Plan de expansión de referencia Generación – Transmisión para 2020-2034, pretende lograr el objetivo nacional de “abastecer la demanda de electricidad bajo criterios económicos y de viabilidad financiera, asegurando su cubrimiento en un marco de uso racional y eficiente de los diferentes recursos energéticos del país y de asegurar una operación eficiente, segura y confiable en las actividades del sector de electricidad”. En este mismo documento se analiza el desempeño del sistema eléctrico mediante escenarios, determinando de manera indicativa la expansión en generación para abastecer la demanda de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional, considerando para esto, la disponibilidad de recursos naturales (hídrico, eólico, solar, biomasa, geotermia), disponibilidad y precio de combustibles fósiles (gas, carbón, líquidos) y el desarrollo de proyectos de generación.

5.1 Regiones en Colombia con mayor potencial de generación de energías renovables no convencionales

5.1.1 Regiones con potencial de generación de energía eólica

Entender el comportamiento del viento como variable meteorológica, ayuda a identificar en qué lugares del país hay potencial de implementación de proyectos de generación de energía eólica.

Con el fin de identificar los lugares estratégicos del país con mayor potencial para generar este tipo de energía, se analizaron los mapas interactivos y el atlas del viento del IDEAM, edición 2018, obteniendo información de análisis de vientos bajo diferentes perspectivas:

a) Velocidad del viento promedio a 10 m de altura

Según el Atlas de vientos del IDEAM, las máximas velocidades del viento que superan los 6 m/s en escala anual, se observan en:

- El Mar Caribe.
- Litoral de los departamentos de Bolívar, Atlántico y Magdalena.
- Norte de la Guajira.
- Región Andina: sobre zonas de mayor elevación entre el Macizo Colombiano y el complejo montañoso (entre Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Tolima)

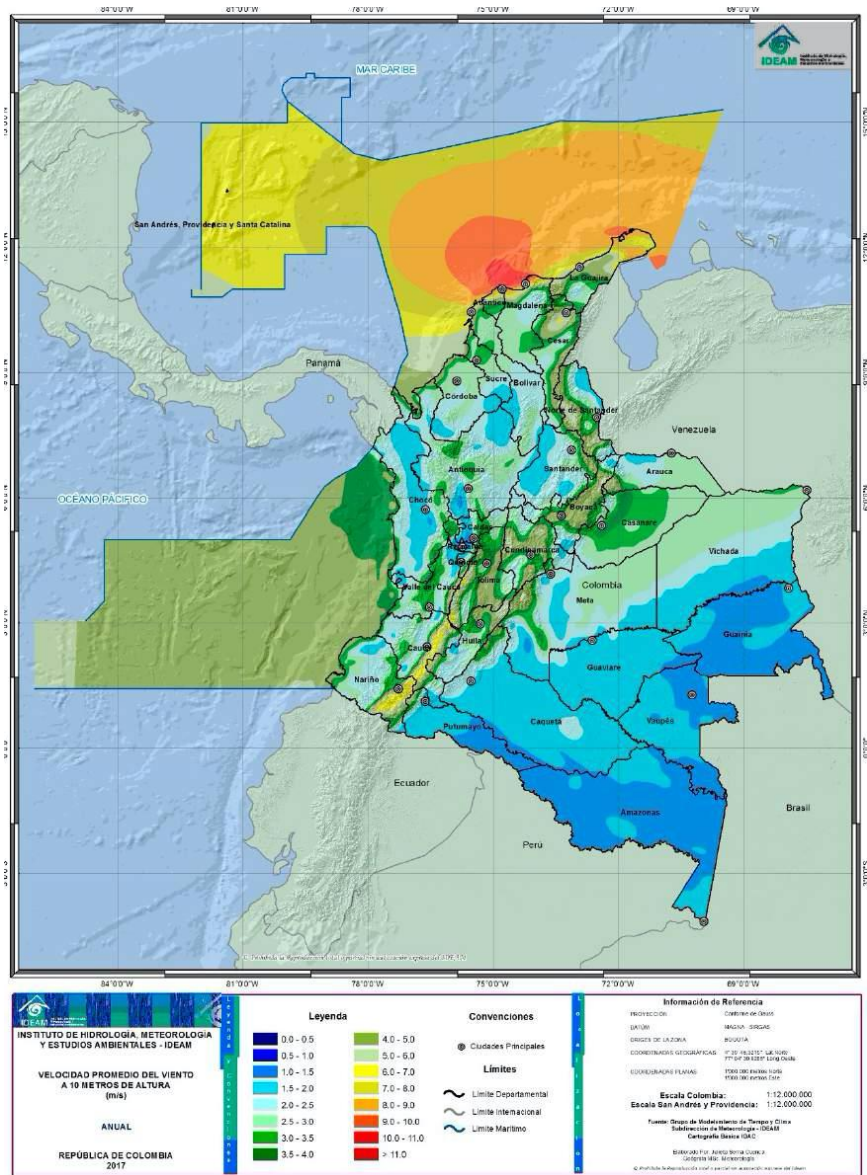


Figura 6. Velocidad promedio del viento a 10 m de altura

Fuente: Mapa de vientos del IDEAM, edición 2018

b) Velocidad máxima del viento

Esta velocidad es definida por el IDEAM como el viento con la velocidad más alta que se presenta en un lugar determinado.

Según el Atlas del viento del IDEAM, las velocidades superiores a 39 m/s, se presentan en:

- Centro y Sur de la Cordillera Oriental.
- Norte de la Cordillera Occidental.
- Área marítima del Caribe (Incluyendo Isla de San Andrés).

Por otro lado, se identifican velocidades mayores a 30 m/s en:

- Región Caribe: Se destacan departamentos de Córdoba y La Guajira.
- Región Andina: Departamentos de Nariño, Cauca y Risaralda.
- Región Orinoquía y Amazonía: al oriente de Vichada y Amazonas.

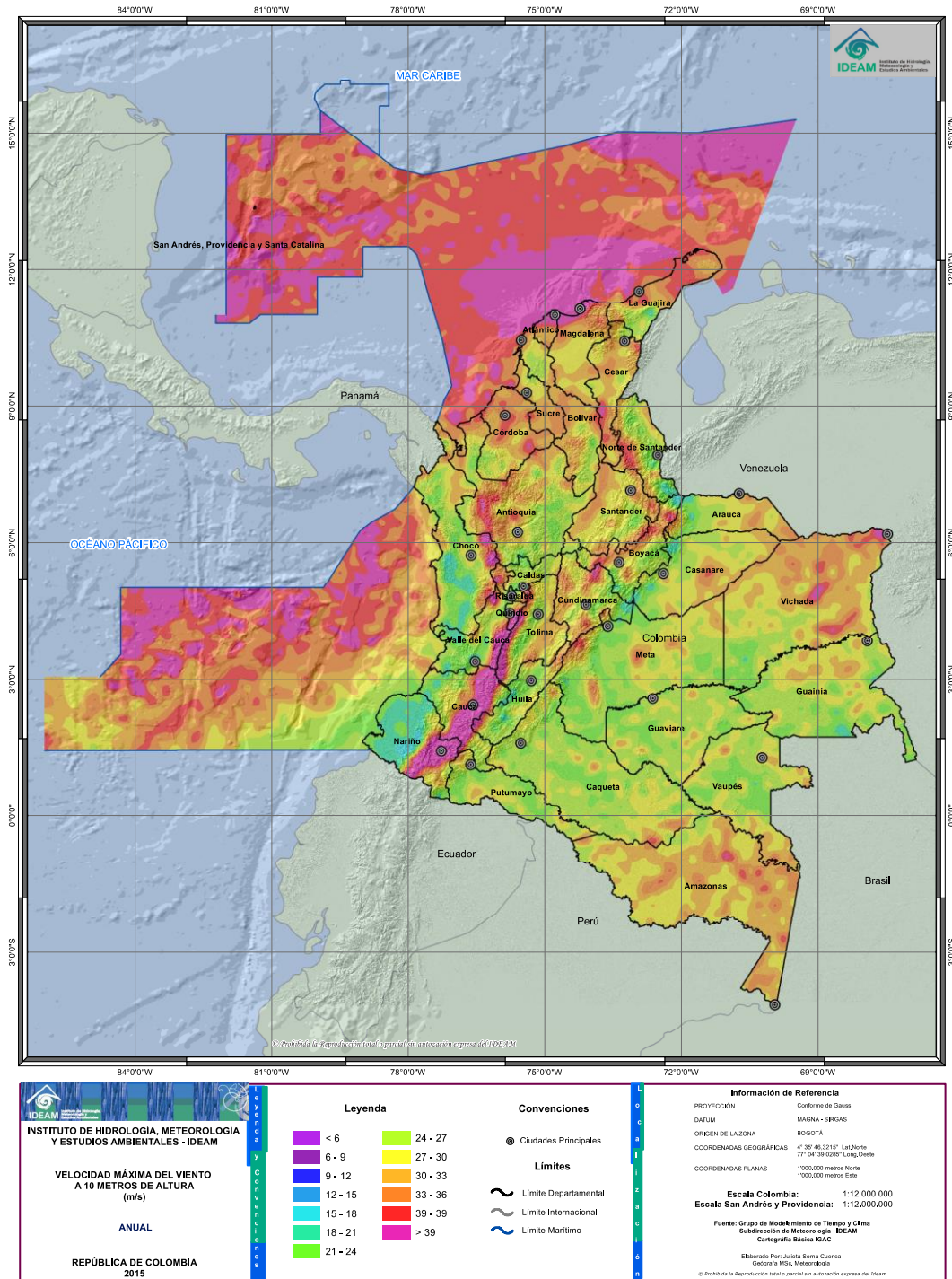


Figura 7. Velocidad máxima del viento a 10 m de altura

Fuente: tomado de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

c) Densidad de energía eólica a 80 m (W/m^2)

Esta densidad de energía se calcula debido a que el nivel de 80 m sobre la superficie es relevante para la generación de energía eólica.

Desde una perspectiva anual, las mayores densidades ($>1000 W/m^2$) se observan sobre el mar Caribe, el litoral de Bolívar, Atlántico y Magdalena, así como en el norte de La Guajira y sectores de montaña entre el nudo de los pastos y el Macizo Colombiano, en límites de Nariño y Cauca. (IDEAM, 2018).

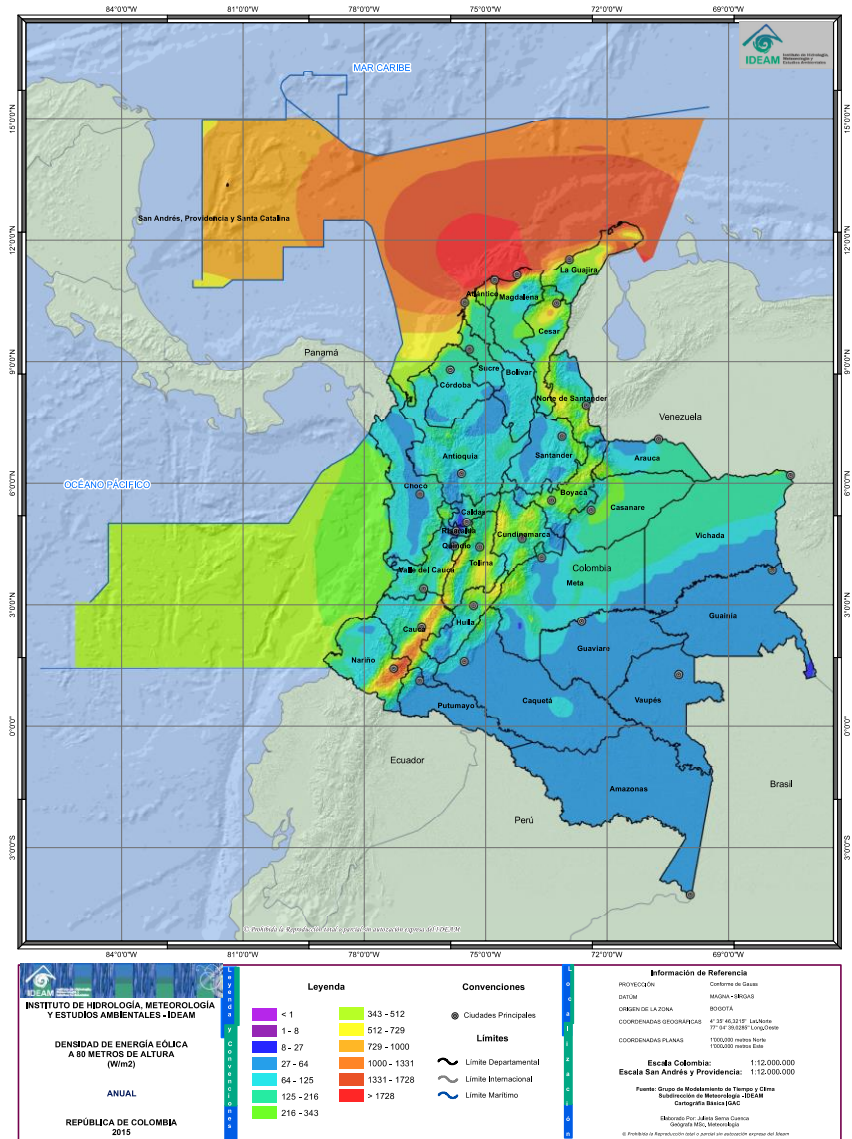


Figura 8. Densidad de energía eólica a 80 m de altura

Fuente: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

Como se observa en la Figura 8, la región Caribe refleja densidades de energía eólica anuales mayores a 1.131 W/m^2 . En algunas zonas como el norte de la Guajira, estas densidades pueden superar los 1.728 W/m^2 .

Por otro lado, en la región Andina se presentan valores de densidad entre 1.131 y 1.728 W/m² en gran parte del año alrededor de las mayores elevaciones del Macizo Colombiano, desde el Nariño hasta Quindío. Las regiones Amazonía, Orinoquía y Pacífica, no alcanzan altos niveles de densidad de energía eólica.

Respecto a las zonas marítimas, se destaca el mar Caribe con valores altos durante todo el año, con una ligera disminución durante septiembre, octubre y noviembre. Por el contrario, en el océano Pacífico, los valores anuales están entre 343 y 729 W/m².

d) Posición nacional referente a los promedios anuales de velocidad del viento

En el siguiente mapa extraído del Atlas del viento del IDEAM, edición 2018, se identifican los lugares que presentan en una escala anual, las mayores velocidades de viento de superficie a 10 metros de altura, teniendo en cuenta las 67 estaciones convencionales del IDEAM. Se destacan en las 10 primeras posiciones los siguientes departamentos: Bolívar, Boyacá, La Guajira, Cesar, Huila, San Andrés, Nariño y Atlántico.

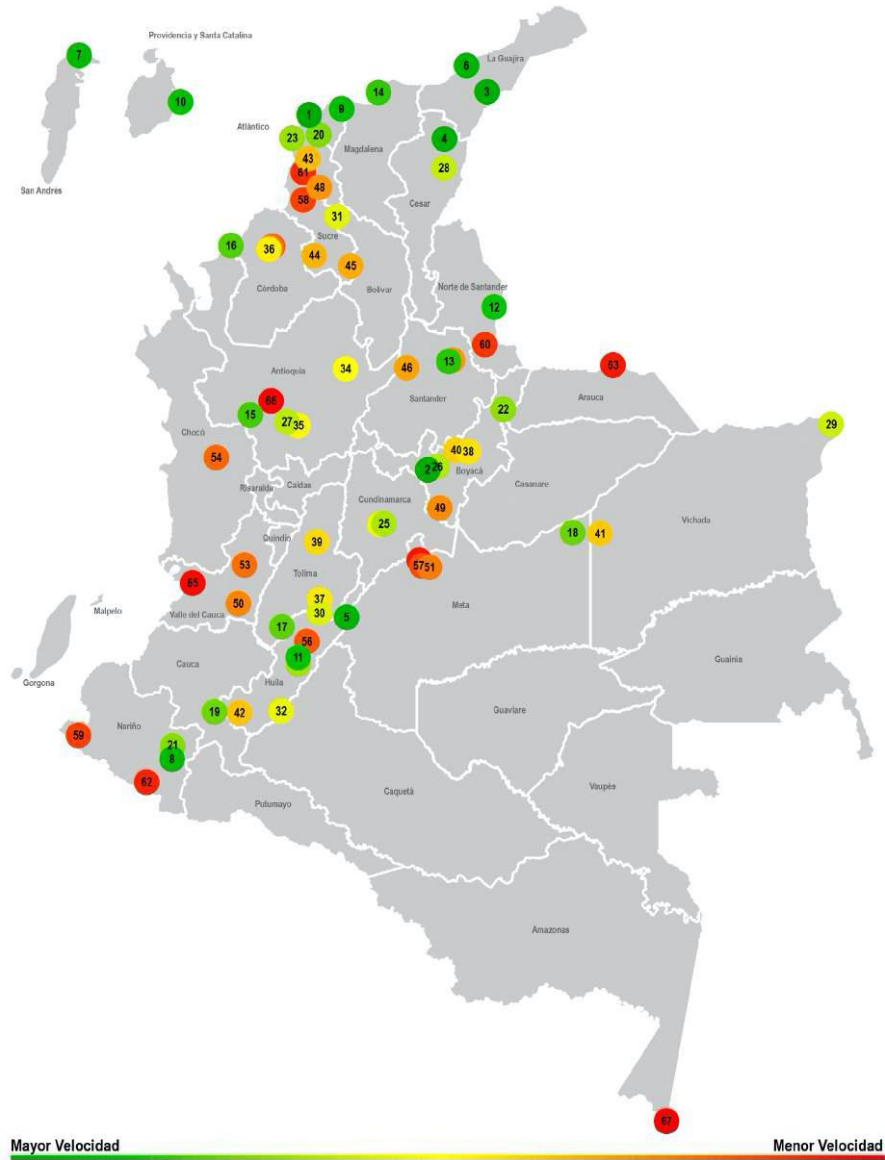


Figura 9. Posición nacional referente a los promedios anuales de velocidad del viento

Fuente: Mapa de vientos del IDEAM, edición 2018

5.1.2 Regiones con potencial de generación de energía solar

Con el fin de identificar las regiones de Colombia con mayor potencial de energía solar, se consultó el Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono del IDEAM y la UPME, versión 2018,

cuyo objetivo es identificar regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población.

En el siguiente mapa se puede observar la distribución espacial y temporal del potencial energético solar en Colombia. En este, se presenta el valor promedio anual de irradiación solar global que incide sobre la superficie del territorio colombiano. Se logra identificar que los promedios más altos están en la región Caribe, Orinoquía y Valles Interandinos, y los menores en la región Pacífica, occidente de Amazonía, y algunos sectores aislados de las tres cordilleras.

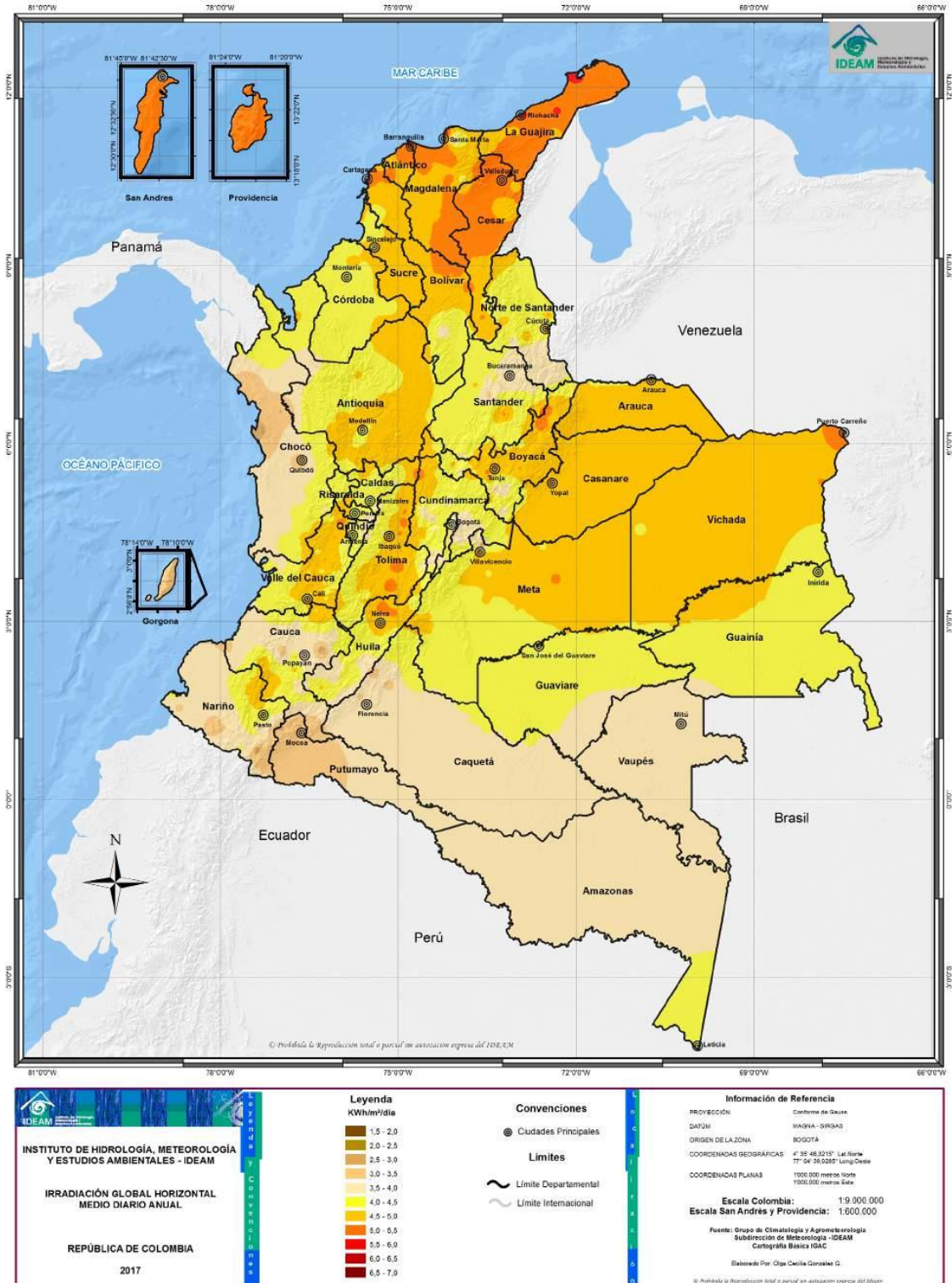


Figura 10. Irradiación global horizontal anual

Fuente: Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia

Valores de radiación solar superiores a 5,5 Kwh/m², se presentan en pequeñas zonas del centro y norte de La Guajira. En general, las zonas con mayor intensidad de radiación solar global, es decir con valores superiores a 4,5 Kwh/m², por día son: las islas de san Andrés y Providencia, amplios sectores de la región Caribe, Vichada, Arauca, Casanare, Meta, el norte, sur y oriente de Antioquia, el centro y norte de Boyacá, el occidente de Cundinamarca, el oriente y centro del Tolima, el norte del Huila; la zona que se inicia en el norte del Cauca, atraviesa el Valle del Cauca de sur a norte y llega hasta el Eje Cafetero, así como sectores puntuales del norte de Nariño, del norte de Norte de Santander y del suroriente de Santander. (IDEAM,2018).

Las zonas con menor intensidad de radiación solar global en Colombia, con promedios inferiores a los 3,5 kWh/m² por día, se registran en sectores del occidente del Chocó, occidente de Putumayo, oriente de Cauca, oriente, sur y noroccidente de Nariño y en pequeños sectores de Caquetá, Huila, Cundinamarca, Quindío, Boyacá y Santander. (IDEAM,2018).

Dependiendo de la intensidad del fenómeno de “El Niño” o “La Niña”, la radiación global aumenta o disminuye entre un 5 y un 10%, respectivamente, con respecto al promedio anual de la estación.

5.1.3 Potencial de generación de hidrógeno verde

El Hidrógeno verde puede producirse en cualquier región en la cual se cuente con disponibilidad de fuentes no convencionales de energías renovables. En este sentido, Colombia al ser un país privilegiado por su ubicación geográfica y disponibilidad de recursos naturales con gran potencial de generación de energías renovables no convencionales como la eólica y solar, dispone de todas las condiciones para su producción.

Según la UPME, regiones como La Guajira disponen de condiciones para la generación renovable excepcionales con una velocidad media del viento de 9 m/s a una altura de 80 metros (el doble del promedio mundial), y una radiación solar un 60% mayor que el promedio mundial. Así mismo, su potencial eólico terrestre es de más 20 GW y el solar alcanza los 42 GW, lo cual la convierte en un lugar competitivo para la producción de hidrógeno verde.

La hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia es el punto de partida para analizar la capacidad de producción, demanda, potencial de exportación y regulación. Según este documento, publicado en el año 2021 por el Ministerio de Minas y Energía, se confirma la existencia de un gran potencial eólico en ciertas áreas de la región de Caribe norte (La Guajira, Magdalena, Atlántico, Sucre, Norte de Cesar, Norte de Bolívar), llegando a alcanzar factores de planta de hasta un 63% en el departamento de La Guajira, potencial equiparable al de las mejores zonas del mundo. Adicionalmente, en lo que compete a la energía solar, se puede llegar a factores de planta del 21% en las regiones de Caribe norte y Andes norte (Boyacá, Santander, Norte de Santander, sur de Cesar, sur de Bolívar).

Actualmente, una de las limitantes para la producción del hidrógeno verde son los altos costos, sin embargo, se espera que con el avance e implementación de tecnologías de electrólisis y de generación de energías renovables, estos se reduzcan. Lo anterior, sumado a los incentivos contemplados en la Ley 2099 de 2021, lleva a estimar que, a partir del año 2030, los costos se asimilarán al del hidrógeno azul, el cual se produce a partir de fuentes fósiles que incorporan captura y almacenamiento de emisiones de CO₂.

En la siguiente imagen se observa como se comportará el nivel del costo del hidrógeno, LCOH por sus siglas en inglés a partir del año 2020 y hasta el año 2050. Se puede evidenciar que en la región Caribe norte que tiene un alto potencial de la generación de hidrógeno verde a partir de energía eólica, el costo de producción tiende a disminuir a través de los años llegando a 2,2 USD/KgH₂ en 2030 y 1,5 USD/ KgH₂ en 2050. Para regiones con potencial de producir hidrógeno

verde a partir de radiación solar como Caribe norte y Andes norte, el costo de producción tiende a disminuir a través de los años llegando a 2,7 USD/ KgH₂ en 2030 y 1,7 USD/ KgH₂ en 2050.

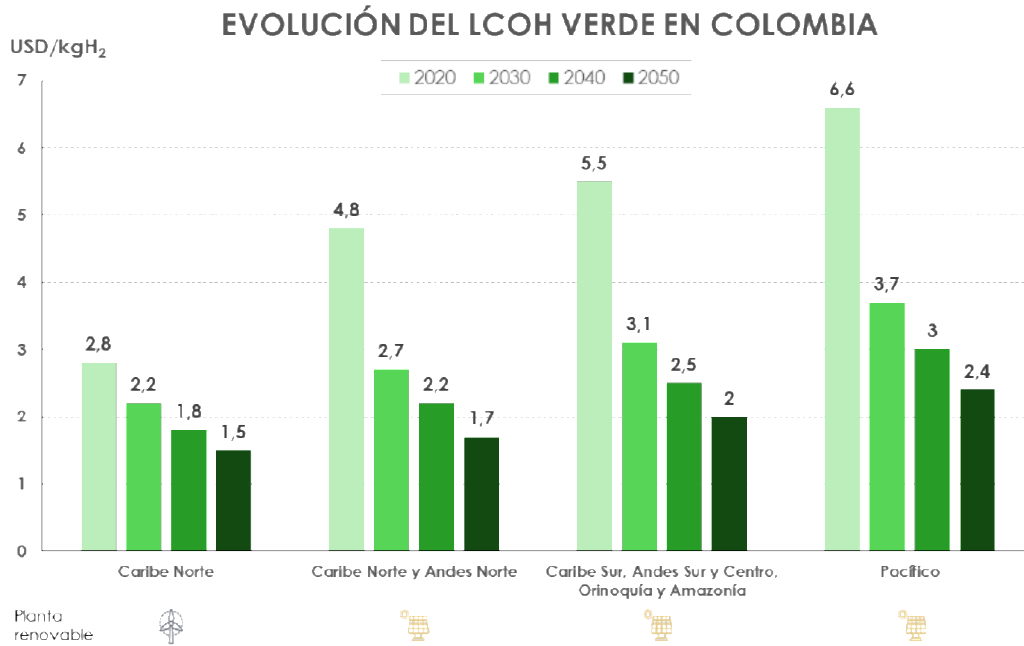


Figura 11. Evolución del LCOH en Colombia

Fuente: Hoja de ruta de hidrógeno en Colombia, 2021

El hidrógeno verde será la ruta de producción de referencia para abastecer la demanda de hidrógeno de bajas emisiones en el largo plazo. Así mismo, la competitividad a nivel internacional de los costos obtenidos en las costas del Caribe posibilitará la creación de un nuevo mercado de exportaciones que transformará la balanza comercial nacional hacia energéticos de menores emisiones. (Hoja de ruta de hidrógeno en Colombia, 2021).

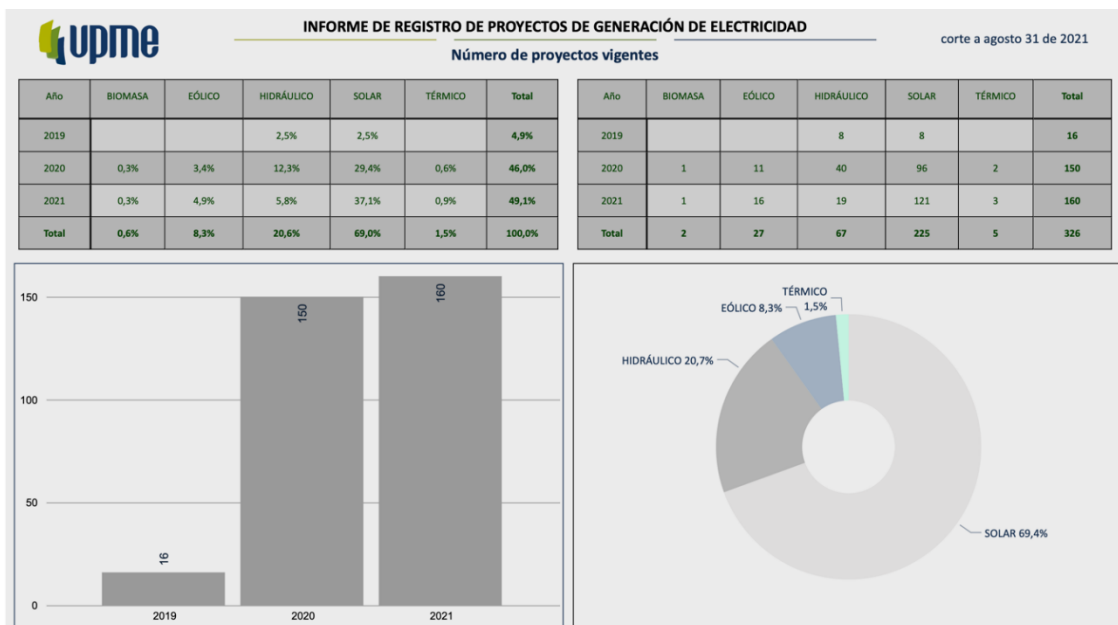
Dentro de los 4 ejes de actuación definidos por el gobierno en la hoja de ruta del hidrógeno, está el apoyo al despliegue de la infraestructura, en el cual se define estudiar la disponibilidad de recursos naturales para la producción de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia a través de

análisis cuantitativos del potencial de tecnologías solar y eólica (onshore y offshore) en los distintos departamentos del país, con el objetivo de determinar el potencial de producción de hidrógeno verde total. Así mismo se cuantificará el potencial de otras tecnologías FNCER realizando estudios del subsuelo para determinar las zonas con potencial geotérmico y con disponibilidad de biomasa, como complemento a las tecnologías solar y eólica en la producción de hidrógeno verde.

5.2 Estado actual de los principales proyectos de generación de energía inscritos en la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME

Desde el año 2007 hasta agosto 31 de 2021, se han inscrito en la UPME un total de 1.556 proyectos de generación de electricidad, de los cuales 51 son eólicos y 865 corresponden a generación de energía solar.

Tabla 4. Proyectos vigentes en la UPME



Fuente: UPME, 2021

Del total de proyectos inscritos, hay 27 eólicos y 225 solares que se encuentran vigentes, los cuales corresponden respectivamente al 8,3% y 69,4% del total de proyectos de generación de electricidad vigentes en el país. Es decir que el 77,7% del total de proyectos de generación de energía, están concentrados en energía solar y eólica.

A continuación, se resume el total de proyectos presentados desde el año 2007 hasta agosto de 2021 *versus* los proyectos que se encuentran vigentes y los MW que generan o estiman generar:

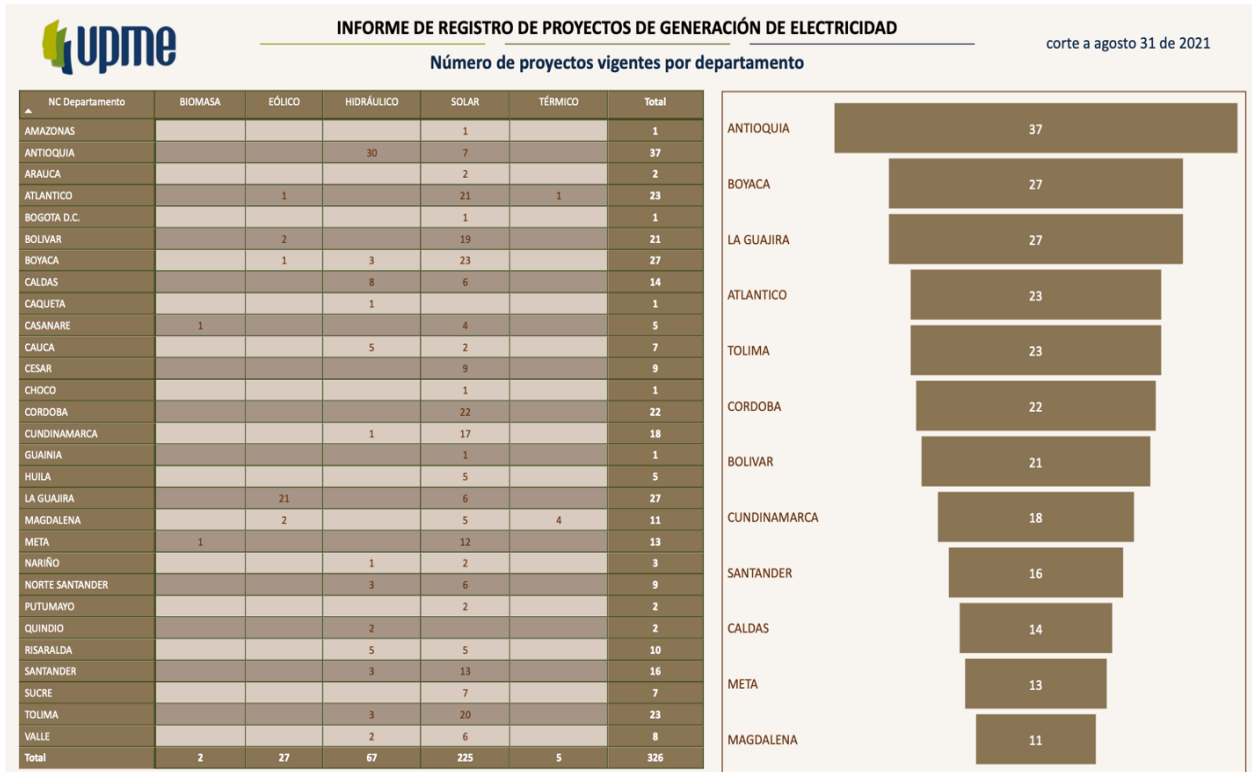
Tabla 5. Estado de proyectos presentados en la UPME

Estado	Tipo	Cantidad	MW
Presentado	Solar	865	No especifica
	Eólico	51	No especifica
Vigente	Solar	225	11.128,37
	Eólico	27	4.975,00

Fuente: compilación propia, 2021

Según la tabla anterior, se puede concluir que en Colombia se ha presentado una sobreoferta en la solicitud de construcción de proyectos de generación de energía eléctrica en los últimos años. En el documento de la UPME no se especifica cuántos MW generarían los proyectos que no continuaron vigentes, sin embargo, sería de interés analizar por qué no continuaron la gestión para garantizar la vigencia y cuántos MW habrían aportado a la matriz energética del país.

Tabla 6. Proyectos vigentes por departamento



Fuente: UPME, 2021

En los mapas reflejados en la Figura 13 y Figura 14, se muestra la distribución geográfica de los proyectos de generación de energía solar y eólica. Se identifica predominancia de proyectos solares en Boyacá, Manizales y la región Caribe. Con respecto a los proyectos eólicos, se observa mayor presencia en el departamento de la Guajira.

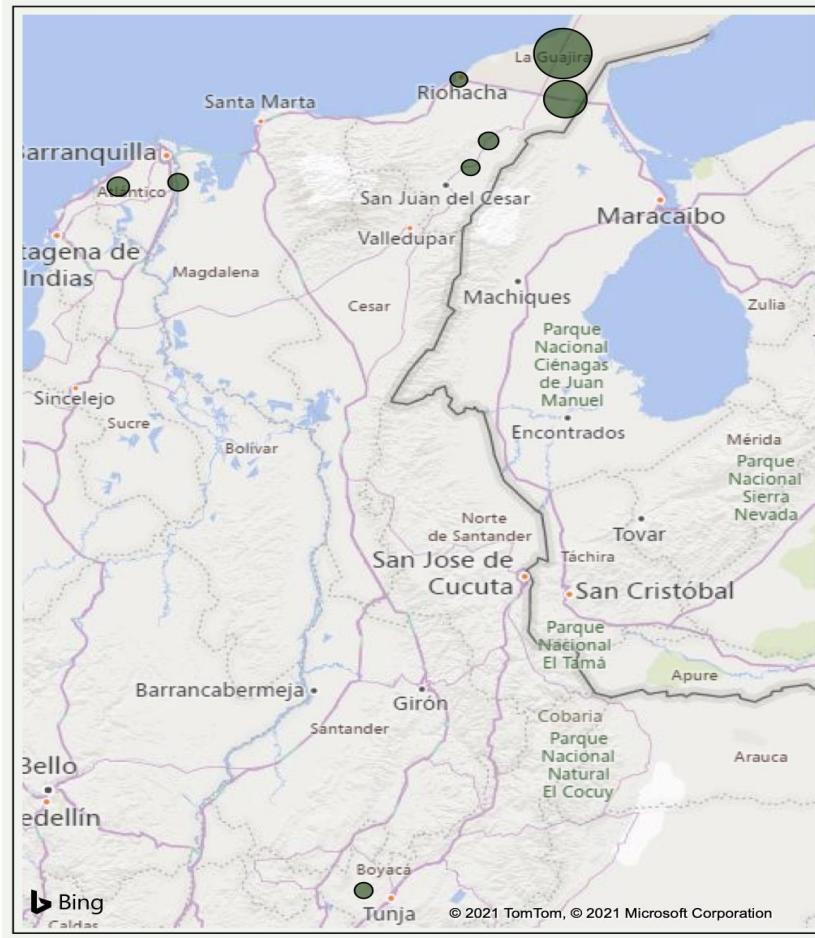


Figura 13. Proyectos de energía solar vigentes

Fuente: UPME, 2021

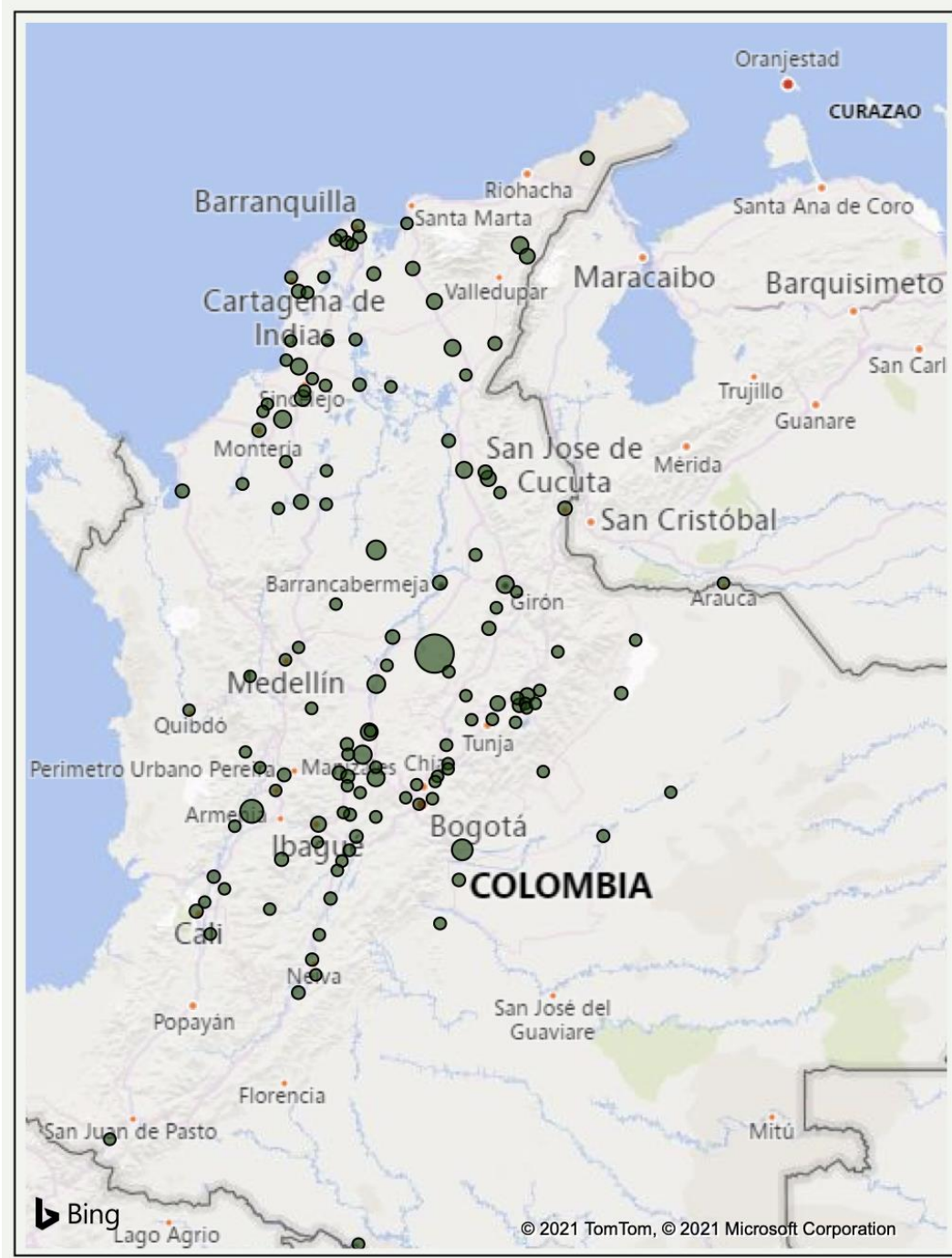


Figura 14. Proyectos de energía solar vigentes

Fuente: UPME, 2021

El análisis anterior es coherente con la información tratada en el capítulo 5.1.1 Regiones con potencial de generación de energía eólica, donde se identificaba que, en algunas zonas como el norte de la Guajira, las densidades de energía eólica anuales pueden superar los 1.728 W/m² y así mismo, que se pueden alcanzar velocidades máximas de viento mayores a 30m/s.

En total, la capacidad de los proyectos solares vigentes en el país es de 11.102,8 MW y la de los proyectos eólicos vigentes es de 4.975 MW, como se muestra en la siguiente figura:

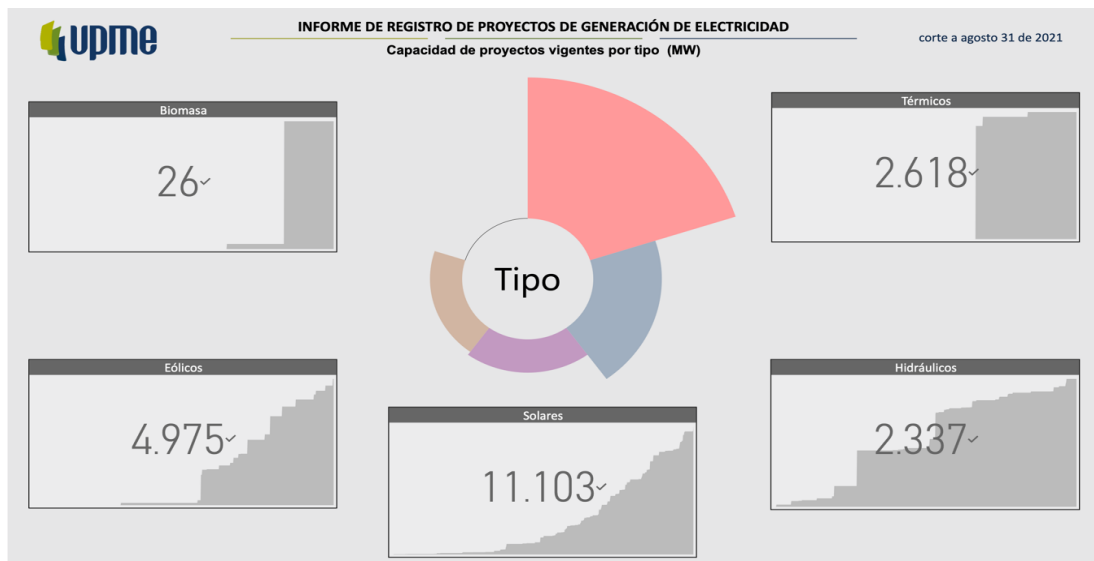


Figura 15. Capacidad (MW) de proyectos vigentes según el tipo de energía

Fuente: UPME 2021

Respecto a la capacidad (MW) por proyectos vigentes en cada departamento, se identifica que la Guajira lidera la generación de energía eólica en Colombia, con una capacidad de 4.029 MW y Santander lidera la generación de energía solar con un desarrollo actual de 1.906 MW.

Tabla 7. Capacidad (MW) de proyectos vigentes por departamento

INFORME DE REGISTRO DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Capacidad de proyectos vigentes por departamento (MW)

corte a agosto 31 de 2021

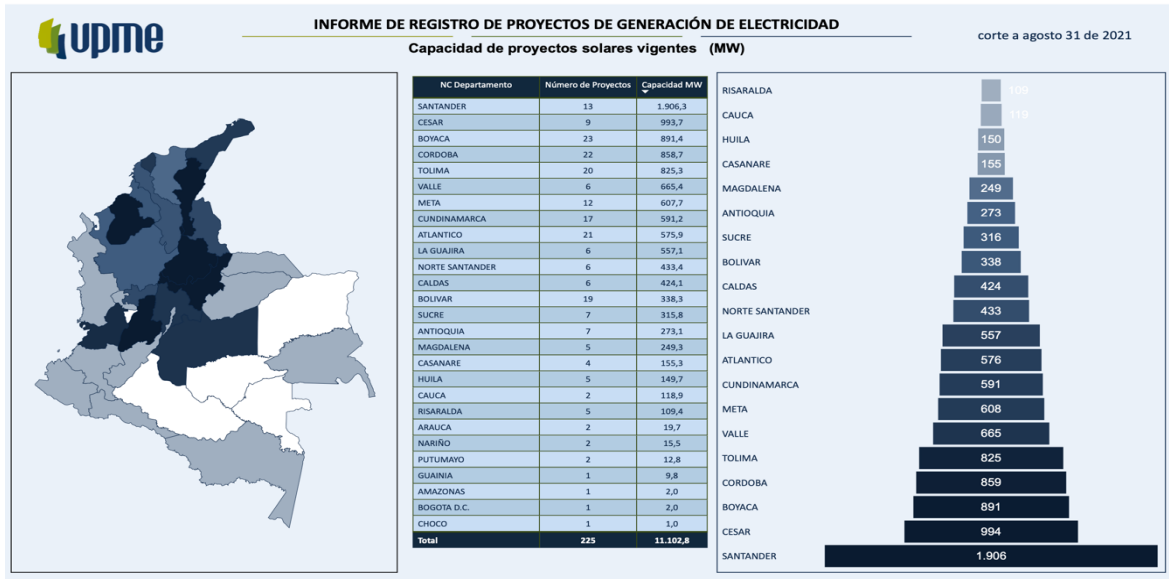
NC Departamento	BIOMASA	EÓLICO	HIDRÁULICO	SOLAR	TÉRMICO	Total
LA GUAJIRA		4.029		557		4.586
MAGDALENA		200		249	2.518	2.967
SANTANDER			110	1.906		2.017
BOYACA		96	159	891		1.146
CALDAS			661	424		1.085
CESAR				994		994
ATLANTICO		300		576	100	976
TOLIMA			120	825		945
CORDOBA				859		859
ANTIOQUIA			428	273		702
BOLIVAR		350		338		688
VALLE			14	665		679
CAQUETA			649			649
CUNDINAMARCA			18	591		609
META	1			608		609

NC Departamento	BIOMASA	HIDRÁULICO	SOLAR	Total
NORTE SANTANDER		37	433	470
SUCRE			316	316
CASANARE	25		155	180
RISARALDA		51	109	161
CAUCA		41	119	159
HUILA			150	150
NARIÑO		34	16	50
ARAUCA			20	20
QUINDIO		14		14
PUTUMAYO			13	13
GUAINIA			10	10
AMAZONAS			2	2
BOGOTA D.C.			2	2
CHOCO			1	1

Fuente: UPME, 2021

En cuanto a la capacidad de los proyectos solares vigentes, Santander se encuentra en el primer lugar con una capacidad de 1.906,3 MW, en segundo lugar Cesar con 993,7 MW y en tercer lugar Boyacá con 891,4 MW. Este último departamento cuenta con mayor cantidad de proyectos que los dos anteriores, sin embargo, su capacidad instalada es menor.

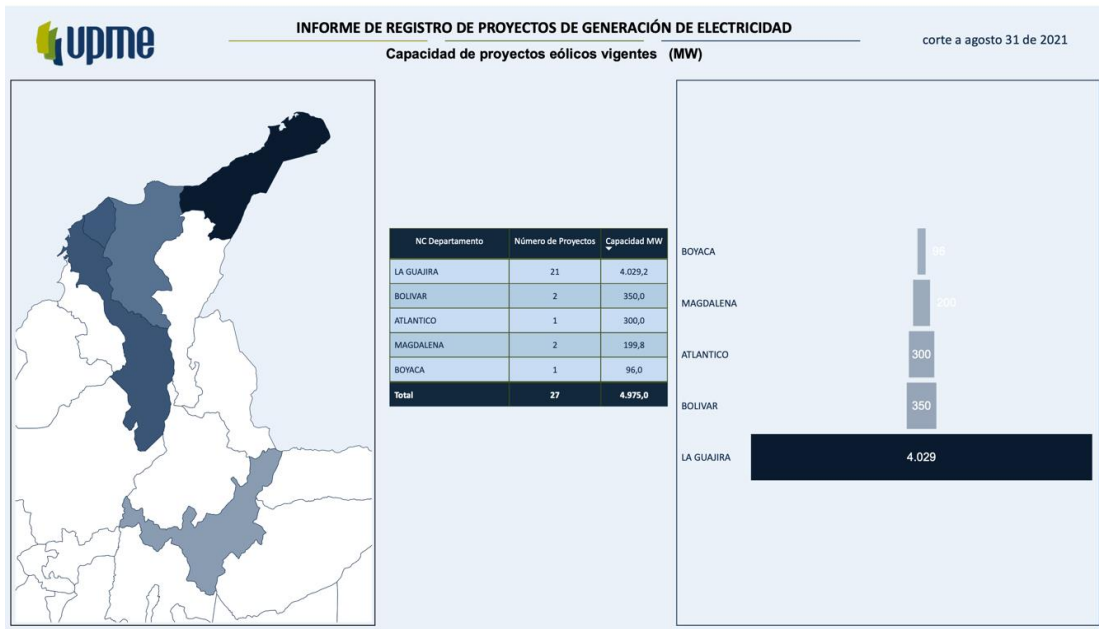
Tabla 8. Capacidad (MW) de proyectos solares vigentes



Fuente: UPME, 2021

En el caso de la energía eólica, Guajira cuenta con el mayor número de proyectos vigentes y así mismo con una mayor capacidad, correspondiente a 4.029,2 MW, seguido de Bolívar (350 MW) y Atlántico (300 MW).

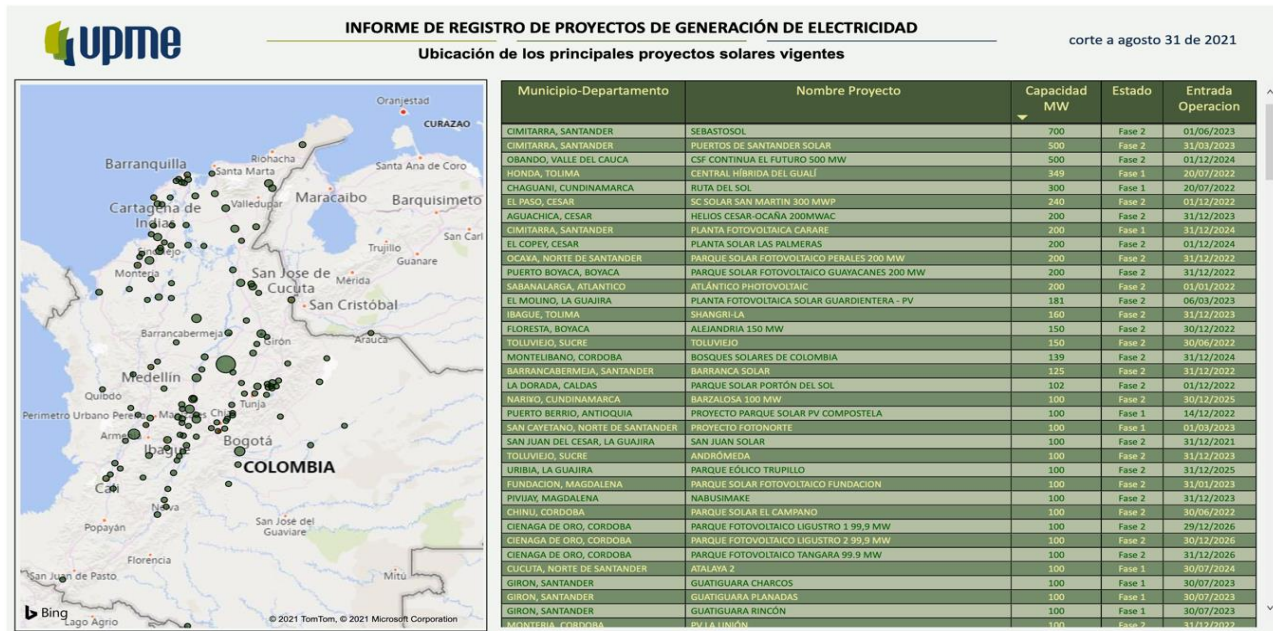
Tabla 9. Capacidad (MW) de proyectos eólicos vigentes



Fuente: UPME 2021

A continuación, se identifican los proyectos generadores de energía solar que se encuentran vigentes según el municipio y departamento donde se encuentran localizados y su capacidad de generación.

Tabla 10. Ubicación de los principales proyectos solares vigentes

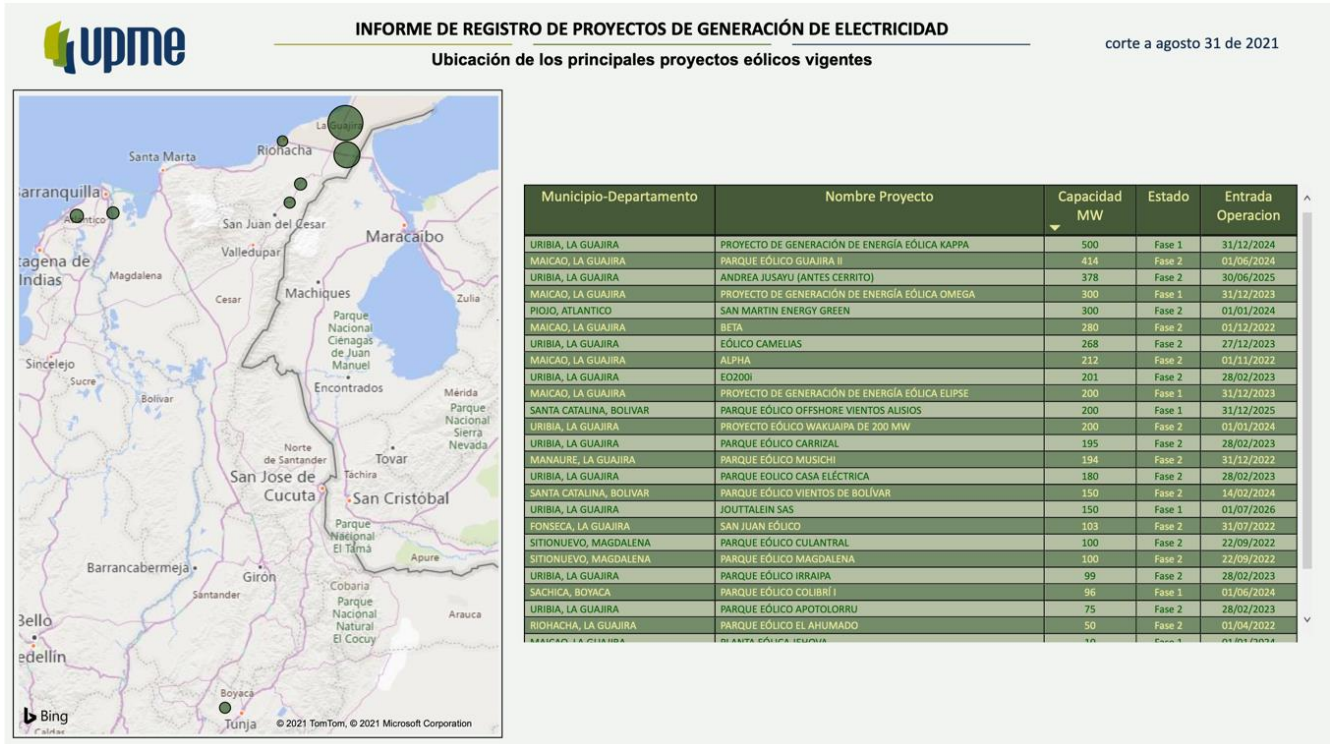


Fuente: UPME, 2021

En primer lugar, se destaca Cimitarra, Santander, con el proyecto Sebastopol, el cual cuenta con una capacidad de generación de 700 MW; en segundo lugar, en el mismo municipio se encuentra el proyecto Puertos de Santander Solar con una capacidad de 500 MW y en tercer lugar, el Proyecto CSF Continua el Futuro, en el municipio de Oballe, Valle del Cauca, con una capacidad de 500 MW. En total, los proyectos solares que se encuentran en ejecución suman 11.103 MW.

Respecto a los proyectos de energía eólica vigentes, la mayoría se encuentran ubicados en el departamento de La Guajira. En primer lugar, está el proyecto de generación de energía eólica Kappa con una capacidad de 500 MW en el municipio de Uribia; en segundo lugar, el parque eólico Guajira II en el municipio de Maicao con una capacidad de 414 MW; y en tercer lugar, nuevamente en el municipio de Uribia, el proyecto Andrea Jusayu, con una capacidad de 378 MW. En total los proyectos eólicos que se encuentran en ejecución suman 4.975 MW.

Tabla 11. Ubicación de los principales proyectos eólicos vigentes



Fuente: UPME, 2021

En este capítulo, no se contemplan proyectos de hidrógeno verde ya que Colombia está iniciando su trayectoria en esta producción, en el corto, mediano y largo plazo. Este objetivo se alcanzará a través de la implementación de la hoja de ruta del hidrógeno del país, lo cual requerirá de un importante esfuerzo de inversión público-privado para el desarrollo de infraestructuras de producción, transporte y uso final.

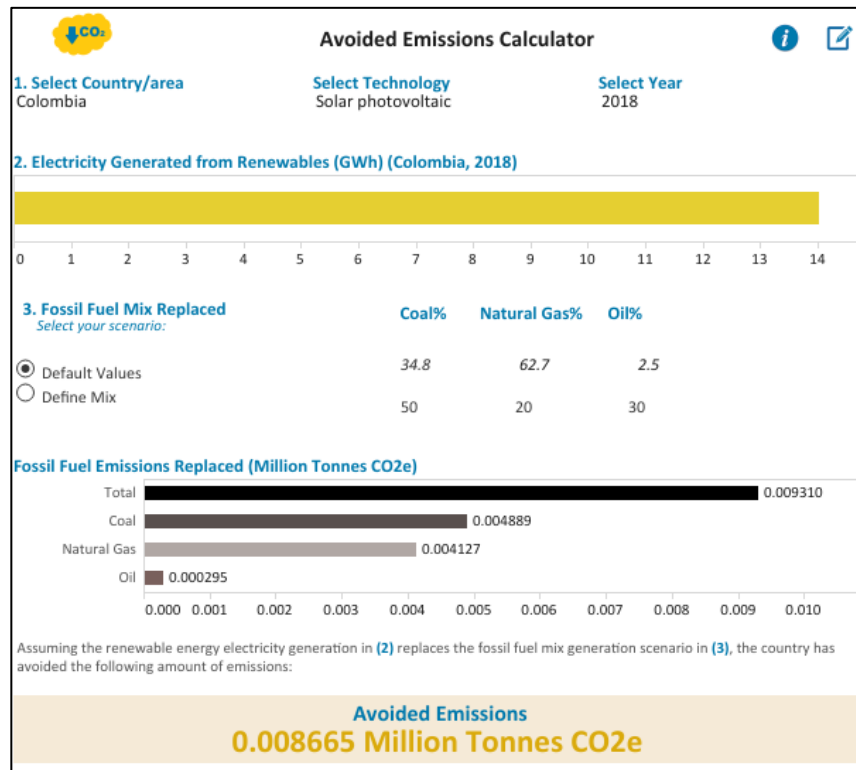
5.3 Impacto en la reducción de emisiones de GEI a través de la generación de energías solar, eólica y la producción de hidrógeno

Para analizar el comportamiento de las emisiones de GEI, se utilizó la calculadora de emisiones evitadas (Avoided Emissions Calculator) disponible en IRENA y se estimaron las emisiones de

GEI que se evitaron en Colombia al reemplazar los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables no convencionales como la eólica y la solar. Este ejercicio se realizó teniendo en cuenta la información más reciente en IRENA que corresponde al año 2018.

A continuación, se observa el comportamiento de las emisiones de GEI evitadas al reemplazar parte de la energía generada en el año 2018 a través de combustibles fósiles por 14,03 GWh de energía solar fotovoltaica, estimando que se evitaron emisiones por un total de 0,0087 millones de toneladas de CO₂e.

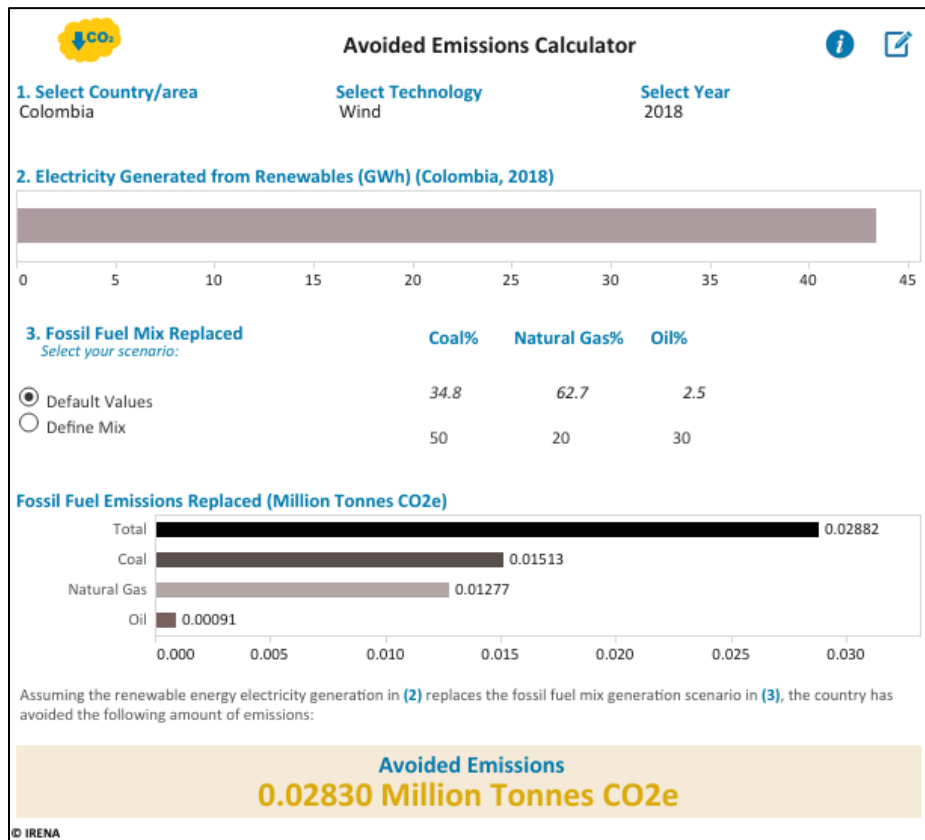
Tabla 12. Cálculo de emisiones de CO₂e evitadas por generación de energía solar fotovoltaica



Fuente: IRENA, 2021

En la Tabla 13, se estiman las emisiones de CO₂e evitadas al reemplazar una parte de la energía generada a partir de combustibles fósiles por 43,44 GWh de energía eólica generada en el año 2018, obteniéndose como resultado que se evitaron emisiones por un total de 0,028 millones de toneladas de CO₂e.

Tabla 13. Cálculo de emisiones de CO₂e evitadas por generación de energía eólica



Fuente: IRENA, 2021

En total, para el año 2018, se estima que se evitó la emisión de 0,037 Millones de toneladas de CO₂e.

En cuanto al hidrógeno verde, no hay estimaciones de años anteriores sobre el impacto en emisiones de GEI, dado que es una tecnología nueva y se estima que habrá una fase inicial de producción desde el año 2020 al 2026, en la cual se empezará a reemplazar el hidrógeno gris por el hidrógeno azul con enfoque en refinerías y transporte pesado. Solo hasta el año 2029, se proyecta que, con la disminución de costos de generación de energías renovables no convencionales, se de inicio a la producción de hidrógeno verde, enfocada principalmente a vehículos de transporte ligero. A partir del año 2036, se estima que el hidrógeno verde será mas competitivo que las energías de fuentes fósiles y empezará a tomar un papel importante en generación eléctrica.

La introducción del hidrógeno de bajas emisiones en procesos en los que sustituye a los combustibles o insumos de origen fósil contribuirá a la reducción de las emisiones de CO₂ del país. Para el caso de Colombia, la introducción del hidrógeno de bajas emisiones puede llegar a abatir más de 13 Mt de CO₂ en 2050, lo que supondría alrededor del 14% de todas las emisiones de usos energéticos y procesos industriales del año 2019 (99 Mt de CO₂). (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Una vez analizada la información anterior y con el fin de concluir si la meta propuesta por Colombia para el año 2030 de reducir en un 51% las emisiones de CO₂ es alcanzable, se debe analizar no solo el impacto de las energías renovables no convencionales, sino también el de la generación de energía Hidráulica en el país, cuyo porcentaje de participación en la matriz energética de Colombia es mayor al 70% e influye directamente en la meta planteada.

Para esto, se ha revisado la información contenida en el Plan de expansión de referencia generación- transmisión 2020-2034, el cual analiza escenarios desarrollados en dos grupos, teniendo en consideración para el primer grupo, la entrada de la fase 1 del proyecto Hidroituango (1,200 MW) y para el segundo grupo se considera la entrada de las dos fases del proyecto Hidroituango (2,400 MW). En cuanto a la demanda de energía y potencia, esta tiene en cuenta en su proyección, el impacto generado por la emergencia sanitaria ocasionada por el Covid-19.

Tabla 14. Descripción de escenarios

Tabla 12 Descripción de Escenarios

Ituango 1200 MW	Ituango 2400 MW	Descripción
Escenario 0.1	Escenario 0.2	Simulación operativa de referencia considerando solo la expansión fija definida en la Tabla 10
Escenario 1	Escenario 2	A partir de los escenarios 0.1 y 0.2, se determina la expansión adicional requerida, teniendo en cuenta las capacidades por tecnología definidas en la Tabla 8
Escenario 3	Escenario 4	A partir de los escenarios 0.1 y 0.2, se determina la expansión adicional, teniendo en cuenta las capacidades por tecnología definidas en la Tabla 8 y considerando atraso de un año en la FPO del proyecto Hidroituango
Escenario 5	Escenario 6	A partir de los escenarios 0.1 y 0.2, se determina la expansión adicional, teniendo en cuenta las capacidades por tecnología definidas en la Tabla 8 y considerando la presencia del Fenómeno El Niño
Escenario 7	Escenario 8	A partir de los escenarios 0.1 y 0.2, se determina la expansión adicional, teniendo en cuenta las capacidades por tecnología definidas en la Tabla 8 y considerando un impuesto a las emisiones de CO2 (5USD/Ton Co2)
Escenario 9	Escenario 10	A partir de los escenarios 0.1 y 0.2, se determina la expansión adicional, teniendo en cuenta las capacidades por tecnología definidas en la Tabla 8 y considerando la aplicación de la guía de caudal ambiental a nuevos proyectos hidro y renovación de concesiones
Escenario MLP 1	Escenario MLP 2	Escenarios ilustrativos de Muy Largo Plazo que presentan expansión al año 2050

Fuente: UPME, 2021

En este trabajo de investigación, no se discutirán a profundidad los escenarios planteados por la UPME. Se realizará un resumen y un análisis de los resultados alcanzados.

Tabla 15. Resumen de expansión con diferentes escenarios

Recurso	Base	Cargo por confiabilidad y Expansión Fija	Escenario 0.1 (Sin Expansión Adicional)	Escenario 1	Escenario 3 (Atraso Ituango)	Escenario 5 (Fenómeno El Niño)	Escenario 7 (Impuesto CO2)	Escenario 9 (Caudal Ambiental)
Hidráulica	11,122	1,200	0	380	380	262	380	541
Gas	3,726	762	0	0	0	0	0	0
Carbón	1,623	0	0	0	0	0	0	0
Líquidos	88	39	0	0	0	0	0	0
Menores	911	42	0	455	438	455	455	455
Biomasa	22	0	0	35	35	35	35	35
Cogeneración	117	0	0	120	120	120	120	120
Eólica	18	2,042	0	2,526	2,526	2,536	2,526	2,536
Geotérmica	0	0	0	0	0	0	0	50
Solar GE	18	713	0	2,492	2,170	2,680	2,492	3,355
Solar D	15	594	0	0	0	0	0	0
Total	17,660	5,391	0	6,008	5,668	6,088	6,008	7,092
Recurso	Base	Cargo por confiabilidad y Expansión Fija	Escenario 0.2 (Sin Expansión Adicional)	Escenario 2	Escenario 4 (Atraso Ituango)	Escenario 6 (Fenómeno El Niño)	Escenario 8 (Impuesto CO2)	Escenario 10 (Caudal Ambiental)
Hidráulica	11,122	2,400	0	0	0	163	0	425
Gas	3,726	762	0	0	0	0	0	0
Carbón	1,623	0	0	0	0	0	0	0
Líquidos	88	39	0	0	0	0	0	0
Menores	911	42	0	185	224	455	203	455
Biomasa	22	0	0	25	25	35	25	35
Cogeneración	117	0	0	60	60	120	60	120
Eólica	18	2,042	0	1,658	1,658	2,526	1,662	2,526
Geotérmica	0	0	0	0	0	0	0	0
Solar GE	18	713	0	700	900	1,849	700	2,492
Solar D	15	594	0	0	0	0	0	0
Total	17,660	6,591	0	2,628	2,867	5,148	2,650	6,053

Fuente: UPME, 2021

Resumiendo, la tabla anterior se considera que:

Para los escenarios que consideran el proyecto Hidroituango completo (2,400 MW) la expansión adicional requerida es menor en comparación con sus escenarios homólogos donde se considera la mitad del proyecto Hidroituango. (UPME,2021)

A continuación, se presenta la comparación de las emisiones de CO₂ entre los diferentes escenarios analizados. Como se puede observar, ninguno de los escenarios planteados va en contravía con la meta de emisiones CO₂ del sector eléctrico para el 2030.

En línea con los compromisos adquiridos por Colombia en la Cumbre Mundial de Cambio Climático en París (COP21), todos los escenarios evaluados, incluyendo aquellos que solo consideran una expansión fija de la matriz de generación, cumplen con la meta, al estar por debajo del límite de emisiones de CO₂ establecidas para el sector eléctrico en el año 2030 (13.53 M Ton CO₂). De acuerdo con la Figura 16, bajo las consideraciones de expansión y operación descritas para cada uno de los escenarios, se cumpliría con los compromisos adquiridos en el COP21. (UPME, 2021).

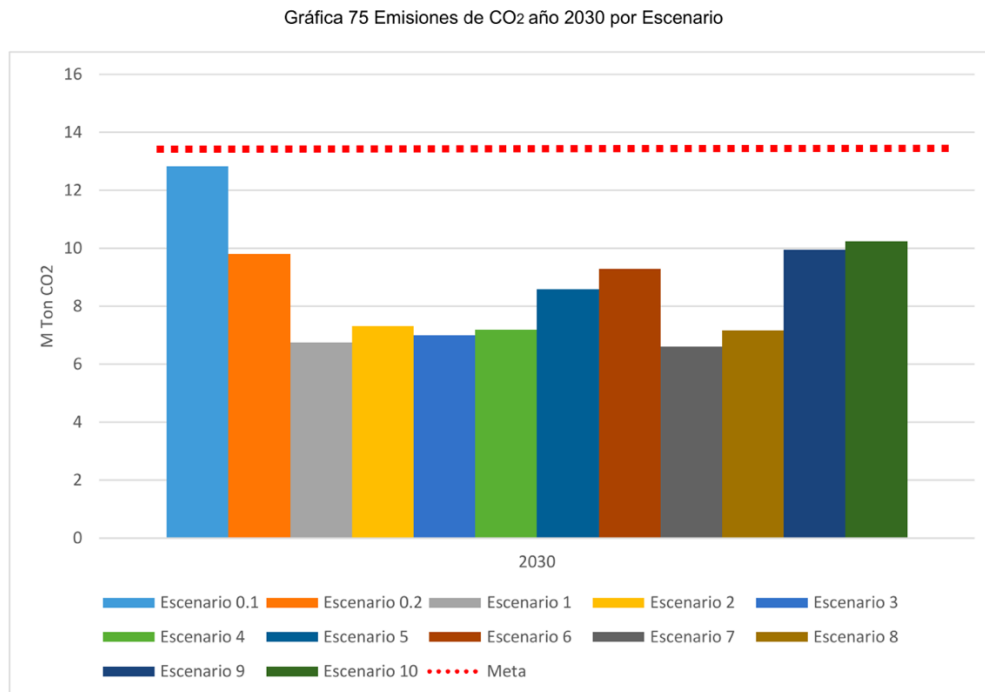


Figura 16. Emisiones de CO₂ año 2030

Fuente: UPME, 2021

5.4 Componentes principales de una estrategia de transición energética exitosa en el país para el año 2030 y sus beneficios en materia ambiental

Colombia tiene una gran ventaja geográfica y una matriz energética compuesta en su mayoría por energías renovables, sin embargo para alcanzar la Contribución Determinada a Nivel Nacional donde se compromete una reducción de emisiones del 51% en 2030 debe fortalecer su estrategia en diferentes vías. Una vez analizada la normatividad legal vigente, algunos artículos asociados con la problemática actual de producción de energía eólica y solar, y la ruta de hidrógeno definida por el gobierno, se proponen los siguientes componentes, para que el camino a la transición energética sea beneficioso económicamente para el país, sin ir en contra de los derechos de las comunidades o diferentes grupos de interés.

- **Normatividad e incentivos**

Es necesario contar con una normatividad clara que contemple los requerimientos básicos para el desarrollo de energías renovables no convencionales. En el caso de Colombia, La Ley 2099 de 2021 da los parámetros necesarios con el objetivo de lograr una transición energética efectiva y dinamizar el mercado energético, adoptando la reforma de la Ley 1715 de 2014, que contempla incentivos y beneficios fiscales para las inversiones en fuentes no convencionales de energía (FNCE) y fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

Esta Ley incluye al hidrógeno verde y al azul como FNCER y FNCE, respectivamente. Este es un primer paso para definir y clarificar la visión nacional entorno a este nuevo vector energético. Sin embargo, se considera esencial diseñar un sistema de garantías de origen o seriación que, además de tener en cuenta la ruta de producción, considere el máximo de emisiones u otros factores ambientales para la comercialización del hidrógeno como verde o azul (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

- **Alianza con las comunidades**

La implementación de proyectos de energías renovables no convencionales requiere analizar las necesidades de las comunidades, sus expectativas y sus capacidades. Una vez estas sean identificadas, se deben generar estrategias para garantizar empleo, equidad, generación equilibrada de riqueza y la protección de las personas y los recursos naturales en el área de influencia.

Se deben promover campañas de comunicación y capacitación a las comunidades para que conozcan el potencial de generación con el que cuentan en el área que habitan y los beneficios y riesgos que pueden traer económica, social y ambientalmente.

En el caso de comunidades indígenas, siempre se deben respetar los mecanismos de participación, tales como la consulta popular. Por ningún motivo se deben omitir estos procedimientos jurídicos, pues ponen en riesgo la estabilidad de las comunidades y así mismo implican barreras para proyectos en desarrollo o futuros de generación de energías renovables no convencionales.

- **Tecnología e infraestructura**

La inversión en desarrollo tecnológico es fundamental para que se determinen las mejores estrategias de generación de energía renovable no convencional, optimizando recursos, generando beneficios económicos e innovando.

Para que la producción del hidrógeno verde sea viable se deberá asegurar una adecuada infraestructura de transporte y de distribución, interactuando con la infraestructura de transporte de electricidad y gas natural, así como las estaciones de servicio existentes, lo cual llevará a la disminución de costos.

- **Normativa técnica aplicable**

Se debe contar con una normativa técnica clara y precisa para la generación de energías de fuentes renovables no convencionales, la cual debe ser documentada por mesas de trabajo que cuenten con expertos técnicos en la materia y considerando la normatividad internacional. Esta información deberá ser revisada y actualizada a medida que las tecnologías o aplicaciones evolucionen, teniendo en cuenta que la innovación será un factor determinante y dará una dinámica de cambio rápido en la generación de este tipo de energías.

- **Sinergias en el sector privado**

En cuanto a la producción de hidrógeno verde, con el fin de promover alianzas entre empresas y compartir mejores prácticas, se sugiere contar con herramientas digitales que faciliten la centralización de los proyectos, identificar ubicación, tipología, estado de avance, tipo de distribución y almacenamiento. Esto ayudará a detectar potenciales sinergias y a generar estrategias para llevar a cabo con mas agilidad y menores costos, proyectos de producción de hidrógeno exitosos.

- **Gobernanza**

Es necesario contar con una estructura de gobernanza para asegurar la correcta implementación y seguimiento de proyectos asociados a la generación de energías renovables no convencionales. Este modelo debe incluir tanto al ámbito público como al privado. Esto ayudará a que haya mayor inversión, conocimiento técnico y herramientas de gestión disponibles.

- **Perfil energético en las ciudades**

Las ciudades son el centro de la economía mundial y utilizan aproximadamente el 75% de la energía primaria a nivel mundial. Por esta razón se deben contar con un perfil energético adecuado a sus necesidades para que desplieguen adecuadamente la producción o el uso de energías renovables a través de la planificación, teniendo en cuenta factores como: ubicación geográfica, el

costo y accesibilidad a la energía, disponibilidad y aprovechamiento de sus recursos, generación y aplicación de políticas locales, planificación urbana, leyes de zonificación y control del uso del suelo, y equidad social. Lo anterior hará que las ciudades según sus necesidades de demanda de energía o capacidad de oferta de energía, organicen su matriz energética localmente, de tal manera que contribuyan a la transición energética del país.

6. CONCLUSIONES

- Dentro de las regiones con mayor potencial de generación de energía eólica se destaca la región Caribe cuyas densidades de energía eólica anuales son mayores a 11.131 W/m^2 . En algunas zonas como el norte de la Guajira, estas densidades pueden superar los 1.728 W/m^2 .
- Las zonas del país con mayor potencial energético solar, son la región Caribe, amplios sectores de la Orinoquia y los valles interandinos. Las zonas con menores valores de radiación se dan hacia el occidente y suroccidente del país y en algunos sectores aislados de las tres cordilleras.
- El Hidrógeno verde puede producirse en cualquier región en la cual se cuente con disponibilidad de fuentes no convencionales de energías renovables. En este sentido, Colombia al ser un país privilegiado por su ubicación geográfica y disponibilidad de recursos naturales con gran potencial de generación de energías renovables no convencionales como la eólica y solar, dispone de todas las condiciones para su producción.
- Según los proyectos vigentes en la UPME, La Guajira lidera la generación de energía eólica en Colombia, con una capacidad de 4.029 MW y Santander lidera la generación de energía solar con un desarrollo actual de 1.906 MW.
- En línea con los compromisos adquiridos por Colombia en la Cumbre Mundial de Cambio Climático en París (COP21), todos los escenarios evaluados por la UPME en el Plan de expansión de referencia generación- transmisión 2020-2034, cumplen con la meta al estar por debajo del límite de emisiones de CO_2 establecidas para el sector eléctrico en el año

2030 (13.53 MTON CO₂). Esto sin contar con la estimación de producción de Hidrógeno verde para los próximos años, que podrá llegar a abatir más de 13 Mt de CO₂ en 2050.

- Colombia tiene una gran oportunidad en cuanto a la generación de energías renovables no convencionales y puede llegar a ser un líder mundial dada a su ubicación geográfica y su potencial de generación de energía eólica y solar, sin embargo no solo los recursos con los que cuenta son un factor clave, la transición energética debe ir apalancada de una estrategia que contemple normatividad e incentivos viables y de fácil aplicación, alianza con las comunidades entendiendo sus necesidades y velando por su sostenibilidad y desarrollo, inversión en infraestructura y tecnología, emisión de normatividad técnica aplicable, sinergias entre empresas del sector privado en pro de los intereses del país, gobernanza contemplando el sector público y privado, y finalmente una buena planificación y perfil energético adecuado en las ciudades.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Congreso, M. (2019). *LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA DE COLOMBIA*.
- Alternativa, U. N. A. (2021). *HIDRÓGENO VERDE*, 1–6.
- Amaya, G., & Fabián, C. (2021). *Análisis de la variabilidad espacial de la energía solar en Colombia*. 29. <https://hdl.handle.net/10953.1/13702>
- Ana Belén Peña. (2021). *Hidrógeno como Energía Renovable • Energías Renovables*. IMF.
- Ballesteros-Ballesteros, V. A., & Gallego-Torres, A. P. (2019). Modelo de educación en energías renovables desde el compromiso público y la actitud energética. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(52), 27–42. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9652>
- CALDAS, U. D. F. J. DE. (n.d.). *Potencial energético eólico para la Región Central*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Castaño-Gómez, M. & García-Rendón, J. J. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia. *Lecturas de Economía*, 93, 23-64. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n93a338727>
- Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Energías Renovables En Colombia: Una Aproximación Desde La Economía*, 25(38), 375–390. <https://doi.org/10.18566/v25n38.a7>
- Collazos Ortiz, A. - Esquivel García, C. L. - Paz Parra, A. (2019). De los hidrocarburos a las energías renovables en Colombia. *Cultura Latinoamericana*. 29 (1), pp. 138-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.14718/CulturaLatinoam.2019.29.1.6>
- Electricidad. (2020). Hidrógeno verde: Qué es, cómo se produce y cuál es su “impresionante” potencial en Chile. *Electricidad, La Revista Energética de Chile*, 19–22. <https://www.revistaei.cl/2020/01/24/hidrogeno-verde-que-es-como-se-produce-y-cual-es-su-impresionante-potencial-en-chile/>
- Energia, M. de M. y. (2021). Hoja de Ruta del Hidrogeno en Colombia. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1(1), 1–64.

- Eras, J. J. C., Morejón, M. B., Gutiérrez, A. S., García, A. P., Ulloa, M. C., Martínez, F. J. R., & Rueda-Bayona, J. G. (2019). A look to the electricity generation from non-conventional renewable energy sources in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(1). <https://doi.org/10.32479/ijeep.7108>
- González, T. (2015). Documento Ejecutivo Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*.
- Guerrero Hoyos, B. G., Vélez Macías, F. D. J., & Morales Quintero, D. E. (2020). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). <https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd23-44.eets>
- IRENA (2021), Green hydrogen supply: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019), Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- JIMENA SIERRA-CAMARGO. (2017). La importancia de decolonizar el derecho internacional de los derechos humanos: el caso de la consulta previa en Colombia. *Revista Derecho Del Estado*, 39.
- Londoño, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Energías Renovables En Colombia: Una Aproximación Desde La Economía*, 25(38), 375–390. <https://doi.org/10.18566/v25n38.a7>
- López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P. Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266–1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- López, L. M. R. (2018). Un llamado para apostar por energías renovables. In *Produccion y Limpia* (Vol. 13, Issue 1, p. 6). Corporación Universitaria Lasallista. <https://doi.org/10.22507/pml.v13n1a13>
- Luna, G., Gil, C., Santacruz, M., Jiménez, E., & Maciel, M. (2014). Aplicaciones del hidrógeno como biogas, producido en una celda de combustible de orina. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 12.

- Ministerio de Ambiente. (2009). *El Acuerdo de París, así actuará Colombia frente al cambio climático*. <https://www.wwf.org.co/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. <https://laimprentaeditores.com/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*.
- Ortiz, A. C., García, C. L. E., & Parra, A. P. (2019). From hydrocarbons to renewable energies in Colombia. *Culturalatinoam*, 29, 138–162.
- Pasqualino, J., Cabrera, C., & Vanegas Chamorro, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospectiva*, 13(1), 68. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.361>
- Puyo, D. M. (n.d.). *Transición energética : Transición energética :*
- Planas, M., & Cárdenas, J. (2019). La matriz energética de Colombia se renueva - Energía para el Futuro. In Bid. <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/>
- Rueda-Bayona, J. G., Guzmán, A., Eras, J. J. C., Silva-Casarín, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 220). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174>
- Ruíz López, A., Krumm A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Corral Montoya, F., Oberländer, N., & Pao-Yu Oei (2019) Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market, *Renewable Energy*, Volume 148, 2020, Pages 1266-1279, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Universidad distrital Francisco José de caldas, S. de investigación B. (2020). *Potencial energético eólico para la Región Central*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS. <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Potencial-eólico-Región-Central.pdf>
- UPME. (2015). Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*.
- Vanegas Chamorro, M., Villicaña Ortíz, E., & Arrieta Viana, L. (2015). Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de la guajira-Colombia mediante el

calculo de transmisibilidad atmosférica. *Prospectiva*, 13(2), 54.
<https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.487>

Villegas-Palacio, C., Berrouet, L., López, C., Ruiz, A., & Upegui, A. (2016). Lessons from the integrated valuation of ecosystem services in a developing country: Three case studies on ecological, socio-cultural and economic valuation. *Ecosystem Services*, 22.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.017>