

Maestría en eficiencia energética y Energías Renovables

Trabajo Fin de Maestría

Evaluación del potencial energético de energías renovables en cuatro regiones colombianas con baja cobertura eléctrica

AUTOR: Daniela Rojas León

Bogotá D.C., Colombia

PROFESOR: Dra. Paloma V. Susan Tepetlan

Abril, 2025.

Resumen

En este estudio se evaluó el potencial energético y eléctrico de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable) solar, eólica, biomasa e hidroeléctrica en los departamentos Putumayo, La Guajira, Vaupés y Vichada, los cuales pertenecen a las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia y cuyo índice de cobertura de energía eléctrica (ICEE) es menor al 80%. A partir de la información de la radiación solar, la velocidad del viento, biomasa residual de diversos cultivos y la capacidad eléctrica de los cuerpos de agua de cada departamento, se realizaron los cálculos correspondientes para la determinación de los potenciales energéticos de cada una de las FNCER y posteriormente los potenciales eléctricos, en GWh/año/ha.

Se determinó que la energía solar (fotovoltaica) y la eólica (aerogeneradores) son las que presentan mayor potencial eléctrico en los cuatro departamentos. Respectivamente, estas presentaron un potencial aproximado en el departamento de Putumayo de 2660 GWh/año/ha y de 8 GWh/año/ha; en La Guajira se obtienen los mayores potenciales con cerca de 4000 GWh/año/ha y de 270 GWh/año/ha. En el departamento de Vaupés se obtuvieron potenciales de 2500 GWh/año/ha y de 11 GWh/año/ha y en Vichada de 3300 GWh/año/ha y de 60 GWh/año/ha. No obstante, el potencial energético de la biomasa residual es una alternativa a considerar dentro del potencial a ser aprovechado dadas sus características calóricas, alcanzando en cada departamento un valor de 34 MJ/año/m^2, 18 MJ/año/m^2, 56 MJ/año/m^2, 33 MJ/año/m^2, respectivamente.

Palabras clave: eléctrico, energético, FNCER, potencial, ZNI.

Abstract

In this study, the evaluation of the energy and electrical potential of non-conventional renewable energy sources (NCRER) such as solar, wind, biomass, and hydroelectric was conducted in the departments of Putumayo, La Guajira, Vaupés, and Vichada, which belong to the Non-Interconnected Zones of Colombia and have an electric energy coverage index (ICEE) of less than 80%. Based on information about solar radiation, wind speed, residual biomass from various crops, and the electrical capacity of the water bodies in each department, the corresponding calculations were performed to determine the energy potentials of each NCRER and subsequently the electrical potentials, expressed in GWh/year/ha.

It was determined that solar energy (photovoltaic) and wind energy (wind turbines) have the highest electrical potential in the four departments. Respectively, these presented an approximate potential in the department of Putumayo of 2660 GWh/year/ha and 8 GWh/year/ha; in La Guajira, the highest potentials were obtained with about 4000 GWh/year/ha and 270 GWh/year/ha. In the department of Vaupés, potentials of 2500 GWh/year/ha and 11 GWh/year/ha were obtained, and in Vichada, 3300 GWh/year/ha and 60 GWh/year/ha. Nevertheless, the energy potential of residual biomass is an alternative to consider within the potential to be harnessed given its calorific characteristics, reaching values in each department of 34 MJ/year/m², 18 MJ/year/m², 56 MJ/year/m², and 33 MJ/year/m², respectively.

Keywords: electrical, energy, NCRER, Non-Interconnected Zones, potential.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, mis hermanos, mis sobrinos y mi cuñado, que aún desde la distancia se han sentido cerca para darme el apoyo que he necesitado, a mi esposo que no suelta mi mano, a mi Margo y mi Tayro que me acompañaron en las noches mientras realizaba este trabajo. A mi Bruno que acaba de llegar al cielo de perritos.

Agradecimientos

A mi familia por siempre apoyarme en el logro de mis objetivos, siendo parte fundamental del impulso de mi desarrollo profesional.

A mi esposo por acompañarme, aconsejarme y darme apoyo constante en todo el desarrollo de la maestría.

A la Dra. Paloma, quien fue un soporte fundamental en el desarrollo de este trabajo mediante su acompañamiento y retroalimentación.

Contenido

Resumen ii

Abstract iii

Dedicatoria iv

Agradecimientos v

1. Marco introductorio 1

1.1. Problema de investigación 2

1.2. Justificación 3

2. Marco teórico 4

2.1. Índice de Cobertura de Energía Eléctrica 4

2.2. Sistema Interconectado Nacional (SIN) 4

2.3. Zonas No Interconectadas 5

2.4. Fuentes no Convencionales de Energía Renovable 7

2.5. Proyectos con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable en las ZNI 8

2.6 Normatividad 12

3. Marco Empírico 14

3.1. Hipótesis 14

3.2. Objetivo general 14

3.3. Objetivos específicos 14

3.4. Metodología 14

3.5. Diseño y tipo de investigación 14

3.6. Población y muestra 15

3.7. Instrumentos de evaluación 16

3.8. Resultados y discusión 21

3.8.1. Exploración 21

3.8.2. Identificación 28

3.8.3. Análisis 37

3.8.3.1. FNCER en el territorio colombiano 37

3.8.3.2. FNCER en sectores seleccionados. 46

3.8.4. Evaluación 75

3.8.4.1. Energía eléctrica generada por FNCER en cada departamento. 75

3.8.4.2. Propuesta de generación de energía eléctrica mediante FNCER. 78

3.8.5. Discusión 79

4. Conclusiones y recomendaciones 84

5. Referencias 86

Lista de Tablas y Figuras

Figuras

Figura 1. Caracterización de las ZNI. 6

Figura 2. Esquema de metodología 15

Figura 3. Índice de Cobertura de Energía Eléctrica en Colombia. Intégrame (2024) 22

Figura 4. Capacidad Instalada mediante diésel en las ZNI 25

Figura 5. Caracterización de las ZNI- Fuentes de energía. 25

Figura 6. Capacidad instalada & usuarios- Tipos de Energía. 28

Figura 7. Mapa Geográfico del Departamento de Putumayo 29

Figura 8. Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto de Putumayo. 29

Figura 9. Energía eléctrica generada con diésel en el departamento de Putumayo (kWh). 30

Figura 10. Mapa Geográfico del Departamento de La Guajira 31

Figura 11. Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto de La Guajira. 31

Figura 12. Energía eléctrica generada con energía eólica en el departamento de Putumayo (kWh/día). 32

Figura 13. Mapa Geográfico del Departamento de Vaupés 33

Figura 14. Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto de Vaupés. 34

Figura 15. Energía eléctrica generada con diésel en el departamento de Vaupés (kWh).34

Figura 16. Mapa Geográfico del Departamento de Vichada 35

Figura 17. Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto de Vichada. 36

Figura 18. Energía eléctrica generada con Diésel y Energía Solar Fotovoltaica en el departamento de Vichada (kWh).....36

Figura 19. Mapa de Radiación Solar Global de Colombia- Promedio Multianual [kWh/m^2]. 38

Figura 20. Mapa de Densidad de Energía Eólica a 80 m de altura [W/m^2]. 39

Figura 21. Potencial Energético de Biomasa Residual en Colombia [TJ/año]. a) Residual Agrícola, b) Residual Pecuaria, c) De Residuos Orgánicos Urbanos. 40

Figura 22. Mapa de Potencial Hidroenergético en Colombia [kW]. 43

Figura 23. Potencial Hidroenergético en Colombia en función de Lc [kW]. a) Longitud de conducción (Lc) de 200 m, b) 1 km, c) 5 km. 44

Figura 24. Ubicación de puntos de posibles Centrales Hidroeléctricas. a) Microcentrales, b) Minicentrales, c) Pequeñas Centrales, d) Grandes Centrales. 45

Figura 25. Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Puerto Asís, Putumayo 47

Figura 26. Promedio irradiancia por hora 48

Figura 27. Irradiación solar municipio de Puerto Asís- Muestra de 15 días. 49

Figura 28. Rosa de vientos Puerto Asís, Putumayo 50

Figura 29. Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Putumayo [%]. 52

Figura 30. Potencial Hidroenergético región Amazonas. 53

Figura 31. Radiación por hora de sol en W/m² en el municipio de Uribia, La Guajira. 54

Figura 32. Promedio irradiancia por hora 55

Figura 33. Irradiación solar municipio de Uribia- Muestra 15 días 56

Figura 34. Rosa de vientos Uribia, La Guajira 57

Figura 35. Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de La Guajira [%]. 59

Figura 36. Potencial Hidroenergético región Caribe. 60

Figura 37. Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Mitú, Vaupés. 61

Figura 38. Promedio irradiancia por hora 62

Figura 39. Irradiación solar municipio de Mitú- Muestra 15 días 63

Figura 40. Rosa de vientos Mitú, Vaupés. 64

Figura 41. Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Vaupés [%]. 66

Figura 42. Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Puerto Carreño, Vichada. 68

Figura 43. Promedio irradiancia por hora 69

Figura 44 69

Figura 45. Rosa de vientos Puerto Carreño, Vichada. 71

Figura 46. Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Vichada [%]. 73

Figura 47. Potencial Hidroenergético región Orinoco. 74

Figura 48. Diagrama de bloques. Sistema híbrido de generación de energía Solar-Eólico. 79

Tablas

Tabla 1. Características de las FNCER en Colombia.....7

Tabla 2. ICEE por departamento en Colombia. Intégrame (2024) 22

Tabla 3. Categorización de Localidades de ZNI 26

Tabla 4. Tipos de biomasa residual por cultivo, factor de residuo y PCI 41

Tabla 5. Tipos de Centrales hidroeléctricas según su capacidad 45

Tabla 6. Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Asís, Putumayo. 49

Tabla 7. Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Asís, Putumayo 50

Tabla 8. Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Putumayo.....51

Tabla 9. Potencial hidroeléctrico- Departamento de Putumayo.....53

Tabla 10. Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Uribia, La Guajira.....56

Tabla 11. Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Uribia, La Guajira.....57

Tabla 12. Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de La Guajira.....58

Tabla 13. Potencial hidroeléctrico- Departamento de La Guajira.....60

Tabla 14. Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Mitú, Vaupés.....63

Tabla 15. Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Mitú, Vaupés.....64

Tabla 16. Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Vaupés.....65

Tabla 17. Potencial hidroeléctrico- Departamento de Vaupés.....67

Tabla 18. Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Carreño, Vichada.....70

Tabla 19. Densidad de potencia máxima vs cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Carreño, Vichada.....72

Tabla 20. Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Vichada.....72

Tabla 21. Potencial hidroeléctrico- Departamento de Vichada.....74

Tabla 22. Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Putumayo.....76

Tabla 23. Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de La Guajira.....77

Tabla 24. Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Vaupés.....77

Tabla 25. Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Vichada.....78

1. Marco introductorio

El acceso a la energía eléctrica es un factor crucial para el desarrollo socioeconómico y la mejora de la calidad de vida de cualquier comunidad. En Colombia, sin embargo, existen grandes disparidades en la distribución y acceso a este recurso esencial, especialmente en las Zonas No Interconectadas (ZNI), estas áreas comprenden más de la mitad del territorio nacional y albergan una población diversa y dispersa, enfrentan desafíos únicos debido a su aislamiento geográfico y la falta de conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Las ZNI se caracterizan por su difícil acceso y, en muchos casos, con presencia de comunidades indígenas y afrodescendientes. La provisión de energía en estas zonas depende en gran medida de plantas de diésel, una solución que, aunque funcional en el corto plazo, resulta insostenible económica y ambientalmente, ya que los costos asociados al transporte del combustible, el mantenimiento de las plantas y la logística necesaria para su operación son elevados, generando tarifas eléctricas altas y un servicio no apto para las condiciones de demanda del recurso.

Además de los altos costos económicos, la quema de combustibles fósiles contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, exacerbando el cambio climático y afectando negativamente la salud de las comunidades locales. Esta situación crea un círculo vicioso donde las condiciones de vida se ven deterioradas, limitando las oportunidades de desarrollo y perpetuando la pobreza y la desigualdad.

Colombia, con su diversidad climática y geográfica, posee un gran potencial para el desarrollo de energías renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa. Sin embargo, la variabilidad de estos recursos a lo largo del territorio requiere un análisis detallado para determinar las fuentes más adecuadas para cada una de las regiones.

En este contexto, la identificación y aprovechamiento de fuentes de energía renovable se presenta como una alternativa viable y necesaria para mejorar la calidad de vida en las ZNI.

Por lo tanto, este trabajo se enfoca en identificar las fuentes de energía renovable con mayor potencial en cuatro ZNI seleccionadas, con el objetivo de proponer soluciones energéticas eficientes y sostenibles.

1.1. Problema de investigación

En Colombia, el suministro de energía eléctrica presenta diversos desafíos. A pesar de que el país se encuentra en una ubicación privilegiada que permite el aprovechamiento de otros recursos como los hídricos para la generación de electricidad, esto no es suficiente para garantizar un abastecimiento uniforme en todo el territorio. Las poblaciones y zonas con baja densidad poblacional, de difícil acceso, catalogadas como territorios de reserva natural y habitadas por comunidades indígenas o afrodescendientes, dependen en su mayoría de plantas de diésel, lo cual genera que exista una baja calidad y continuidad del servicio eléctrico, así como altos costos de combustible, elevados niveles de pobreza, alta informalidad laboral y la presencia de actividades ilegales, además de contribuir significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, agravando el problema del cambio climático.

Estas áreas, conocidas como Zonas No Interconectadas (ZNI), se encuentran fuera de la cobertura de las redes de distribución del Sistema Interconectado Nacional (SIN). No obstante, disponen de diversas fuentes de energía renovable, lo que permite plantear proyectos de generación de energía que contribuyan a aumentar la cobertura eléctrica. Estos proyectos pueden incluir sistemas aislados que combinen dos o más tipos de energía renovable, o sistemas híbridos que integren estas fuentes con las plantas convencionales de diésel.

Dado que el territorio colombiano presenta una gran variedad de climas debido a su ubicación geográfica, no es posible generalizar las fuentes de energía renovable con mayor potencial para todas las ZNI. Por ello, este trabajo plantea seleccionar cuatro ZNI distribuidas en diferentes regiones del país y responder a la siguiente pregunta de investigación: *¿cuáles*

son las dos fuentes de energía renovable que presentan mayor potencial en cada una de las ZNI seleccionadas para la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica?

1.2. Justificación

La selección de cuatro ZNI distribuidas en diferentes regiones de Colombia para este estudio permitirá obtener un panorama representativo y detallado de las oportunidades y desafíos asociados con la implementación de energías renovables en contextos diversos. Este enfoque busca abordar las particularidades geográficas, climáticas y socioeconómicas de cada región, lo que facilitará la identificación de soluciones energéticas adaptadas a las necesidades locales.

La evaluación e identificación de las dos fuentes de energía renovable con mayor potencial en cada ZNI seleccionada servirá como base para el desarrollo de políticas y proyectos que contribuyan a la expansión de la cobertura eléctrica en estas áreas, permitiendo con base en el uso e implementación de energías renovables promover un desarrollo más equitativo y sostenible de la región.

Así mismo, la adopción de tecnologías renovables en estas zonas impulsaría la innovación tecnológica y la creación de empleo en el ámbito local, generando oportunidades económicas y mejorando la calidad de vida de las comunidades. Cabe mencionar, que el acceso a una fuente de energía confiable y sostenible es un factor clave para el desarrollo de otros sectores como la educación, la salud y la industria, lo que, a su vez, puede contribuir a la reducción de la pobreza y la desigualdad.

En resumen, este trabajo no solo abordará un problema crítico de acceso a la energía en Colombia, sino que también podría contribuir a la mitigación del cambio climático y al desarrollo socioeconómico de las comunidades más vulnerables del país, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas energéticas nacionales.

2. Marco teórico

Con el fin de profundizar en la relevancia de este trabajo de investigación, es importante presentar los diferentes conceptos y los estudios previos relacionados a este que permiten alimentar el desarrollo de la investigación.

2.1. Índice de Cobertura de Energía Eléctrica

El Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) es un ejercicio estadístico llevado a cabo por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), conforme a lo establecido en el Decreto 1258 de 2013. La falta de cobertura no se mide directamente; en su lugar, el ICEE estima el nivel de cobertura del servicio de energía utilizando fuentes primarias oficiales y calcula el total de viviendas sin cobertura de energía eléctrica como un residual. Esta estimación sirve como insumo para la elaboración del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC). El índice de cobertura se calcula como la proporción de viviendas con servicio de energía eléctrica sobre el total de viviendas (UPME, 2022).

La cobertura de energía eléctrica en Colombia se divide en dos escenarios principales: el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las Zonas No Interconectadas (ZNI), cuyas características se detallan a continuación.

2.2. Sistema Interconectado Nacional (SIN)

El Sistema Interconectado Nacional (SIN) surgió en 1967 con la creación de Interconexión Eléctrica S.A. (ISA), una empresa estatal encargada de la construcción y gestión del Sistema de Transmisión Nacional (STN) (Fernández, 2019). La infraestructura desarrollada por ISA fue fundamental para el establecimiento del mercado energético en Colombia, asegurando tanto el acceso libre como la comercialización de la energía. A medida que el sistema se expandía, se construyeron diversas líneas de alta tensión que conectaron los puntos de generación con los de distribución, facilitando así el transporte de grandes volúmenes de energía a largas distancias (Grupo de investigación Xué, 2020).

La expansión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) está determinada por el Plan de Expansión Nacional, el cual, a su vez, está bajo la supervisión de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Esta entidad se encarga de analizar la oferta y demanda de energía, considerando las nuevas plantas que entran en operación y las restricciones existentes en el sistema. Con base en estos análisis, la UPME propone proyectos destinados a mantener el sistema y asegurar una adecuada capacidad de transmisión.

El SIN cubre aproximadamente el 34% del territorio colombiano, donde reside el 96% de la población del país. La cobertura eléctrica en estas áreas alcanza el 99.99%, con una cobertura urbana del 99.35% y una cobertura rural del 83.39% (Muñoz & Bueno, 2022).

2.3. Zonas No Interconectadas

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) comprenden aquellas áreas o regiones geográficas en las cuales el servicio público de electricidad no es suministrado a través del SIN. Estas zonas se caracterizan por tener una densidad poblacional baja, alejadas de los centros urbanos, de difícil acceso y generalmente poseen una gran riqueza en recursos naturales (Dávila, 2022).

Estas zonas representan el 52 % del territorio nacional colombiano, el cual consta de 18 departamentos, 97 municipios, 37 cabeceras municipales y 1.728 localidades. Se caracterizan por una baja densidad poblacional, con un promedio de apenas tres habitantes por km^2. Además de la limitada o inexistente cobertura de servicios de energía eléctrica, estas regiones enfrentan deficiencias en infraestructura de transporte, que en algunos casos es inexistente (Muñoz-Arias et al., 2021; Dávila, 2022).

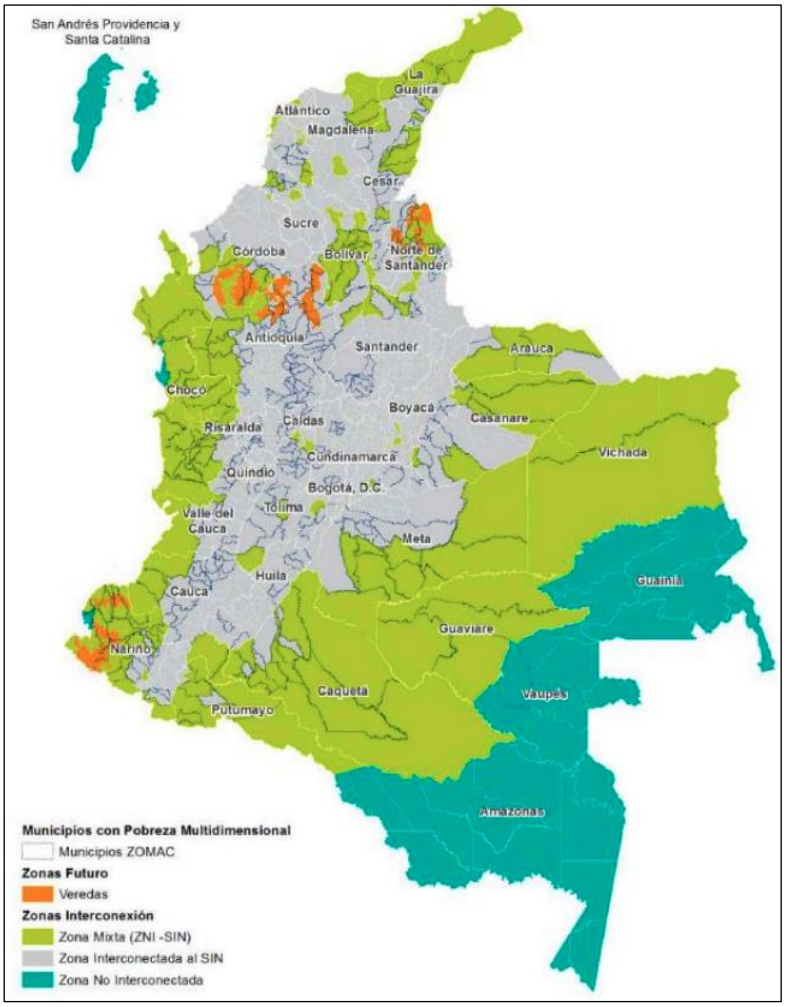
En estas zonas, la tecnología predominante para la generación de energía eléctrica son las plantas diésel, las cuales son ampliamente utilizadas a nivel mundial debido a su alta eficiencia en la conversión de combustibles en energía eléctrica (Lizarazo & Martínez, 2023). Esta tecnología es tan difundida que es común encontrar personal capacitado para operar estos

generadores incluso en zonas remotas (Grupo de investigación Xué, 2020). No obstante, en las ZNI, la operación de estas plantas enfrenta desafíos significativos debido a las dificultades y costos del transporte, generando precios elevados de combustible, operación y mantenimiento, y, por ende, que la generación eléctrica resulte menos accesible (Superservicios, 2023).

La Figura 1 muestra la caracterización de las ZNI en Colombia y su relación (mixta, interconectada, no Interconectada) al SIN.

Figura 1.

Caracterización de las ZNI



Nota: Tomado del Informe de Gestión 2022 IPSE (Superservicios, 2023).

2.4. Fuentes no Convencionales de Energía Renovable

Las Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER) son recursos energéticos renovables que, aunque están disponibles globalmente y son sostenibles para el medio ambiente, en el país no se utilizan o se emplean de manera limitada y no se comercializan de forma masiva. Entre las FNCER se incluyen la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PCH), la energía eólica, la geotérmica, la solar y la energía marina. Además, la Ley de Transición Energética ha reconocido como FNCE otras fuentes como el hidrógeno verde y el hidrógeno azul (MinEnergía, 2024).

A continuación, en la Tabla 1 se presenta un resumen de las FNCER disponibles en Colombia, junto con algunas de sus características.

Tabla 1.

Características de las FNCER en Colombia

FNCER	Fuente de generación	Característica	Pro	Contra
Solar/ Solar fotovoltaica.	Radiación solar.	Radiación perpendicular por ubicación geográfica de Colombia, lo que implica mayor aprovechamiento.	Gran disponibilidad energética.	Instalaciones ocupan gran extensión de superficie.
Eólica.	Masas de viento.	Uso de un generador para transformar la energía cinética en energía eléctrica.	No genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).	No se puede garantizar disponibilidad en todo el territorio.
Geotérmica.	Calor del subsuelo terrestre.	Aplicación de tecnología para convertir la energía calorífica en eléctrica.	Alto potencial energético.	Alto costo y nivel de riesgo.
Biomasa (Rojas, 2020).	Residuos orgánicos.	Requiere de procesos físicos, bioquímicos o termoquímicos.	Disminución de emisiones de	Bajo rendimiento energético.

FNCER	Fuente de generación	Característica	Pro	Contra
			CO2. Disminución de residuos.	
Oceánica.	Fenómenos naturales marinos como lo son las mareas, el oleaje, las corrientes marinas.	Requiere de tecnologías que permitan la conversión de la energía oceánica a electricidad.	Colombia está rodeado de dos océanos.	Gran impacto ambiental.
Hidrógeno.	Hidrógeno usado como combustible y vector energético.	Es necesario que pase por un procedimiento (como electrólisis, termólisis, foto-electrólisis, entre otros) para dividir las moléculas.	No genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).	Requiere mayor investigación para ser implementada a gran escala.

Nota: Elaboración propia. Información tomada de MinEnergía (2024) y Muñoz-Arias et al. (2021)

2.5. Proyectos con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable en las ZNI

En los últimos años se han desarrollado diferentes opciones para suministrar energía a estas zonas, puesto que es evidente que la ampliación de las redes eléctricas representa la principal solución a dicha situación. Sin embargo, ello implica elevados costos de conexión, los cuales, con la baja demanda energética y por la escasa y dispersa población, vuelven poco factible su implementación, aunado a la ubicación y dificultades geográficas que estas zonas representan. Debido a lo anterior, se han implementado diversos proyectos con base en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) en zonas no interconectadas. Estos proyectos buscan brindar acceso a la energía a comunidades aisladas y dispersas en todo el país (Grupo de investigación Xué, 2020).

Algunos de esos proyectos son los siguientes:

1. Proyectos FAZNI (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas), el cual es administrado por el Ministerio de Minas y Energía y tiene como objeto financiar los planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética en dichas zonas.
2. Planes de Energización Rural Sostenibles (PERS), se desarrollan con en base en análisis significativos de áreas como emprendimiento, productividad y energización rural, lo cual permite identificar, formular y estructurar directrices y estrategias para el desarrollo energético rural. Al mismo tiempo, se generan proyectos integrales y sostenibles de suministro y aprovechamiento de energía para un lapso mínimo de 15 años. La finalidad de dichos planes no solo es brindar el servicio de energía eléctrica, también fomentar el crecimiento y desarrollo de las comunidades rurales.
3. Programa Energía Limpia para Colombia, el cual fue impulsado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), entre 2012 y 2017, con la finalidad de aumentar el acceso a fuentes de energía renovable, promoviendo prácticas de eficiencia energética en Colombia. El programa se centró en el desarrollo de tres tareas fundamentales: a) apoyar al Gobierno Nacional en formular e implementar proyectos sostenibles, promoviendo políticas públicas, el uso de fondos para la energización rural, incentivando la inversión privada y proponiendo la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono. b) Incrementar el acceso a fuentes de energía renovable en Zonas No Interconectadas (ZNI) a través de proyectos sostenibles, apoyando al mismo tiempo al IPSE y a la UPME en la PERS. c) Promoción de inversión en energía renovable y eficiencia energética, en diversos sectores como el ladrillero, alimentos (bebidas y agroindustria) y edificaciones.
4. Proyectos IPSE: cuya finalidad es promover soluciones energéticas en las Zonas No Interconectadas (ZNI), desarrollando e implementando proyectos basados en Fuentes

No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). Estos proyectos pueden ser financiados total o parcialmente; en casos de financiamiento parcial, se establecen alianzas de colaboración con entidades como la UPME, el Ministerio de Relaciones Exteriores y otros organismos diversos (IPSE, 2023b). Algunos de los proyectos más destacados son:

- Energización de 946 familias de ZNI agosto de 2023, mediante FNCER. Los beneficiados están localizados en Sucre, La Guajira y Guaviare (IPSE, 2024).
- Comunidades Energéticas: el IPSE ha priorizado la creación de comunidades energéticas en ZNI a lo largo del territorio nacional, considerando factores socioeconómicos, ambientales y vocaciones productivas. Estas comunidades son una forma innovadora de abordar la generación y consumo de energía, enfocándose en la cooperación y el beneficio mutuo entre sus miembros. Sus objetivos principales son la generación de energía renovable, la comercialización de la energía generada y el uso eficiente de la misma (MinEnergía, 2023a).

En el año 2023, por medio de estas Comunidades Energéticas, se implementó un sistema híbrido de generación de energía solar-diésel en una ZNI ubicada en el pacífico colombiano, el cual fue inaugurado por Minenergía en conjunto con FENOGE (Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente), el cual permitió a los beneficiarios pasar de 4 a 24 horas de servicio de energía eléctrica al día (MinEnergía, 2023b).

Adicionalmente, se han realizado diversas investigaciones (publicaciones en revistas, tesis, entre otros) enfocadas en la evaluación de algunas estrategias de implementación de las FNCER en las ZNI, las cuales permitan aumentar el acceso a energía eléctrica en estas. Al respecto, Davies y Saygin (2023) analizan las oportunidades para aumentar las inversiones en

electricidad renovable en las zonas no interconectadas de Colombia, basándose en experiencias internacionales. Este análisis incluye tendencias globales en energías renovables distribuidas, nuevos modelos de negocio y financiamiento, una visión del mercado colombiano, mecanismos para eliminar riesgos y lecciones de ocho casos de estudio sobre cómo maximizar el impacto de fondos públicos y privados. Mediante el análisis de las fuentes convencionales de generación eléctrica en Colombia, Mora y Quicaza (2021) revelan la necesidad de caracterizar las zonas no interconectadas (ZNI) para identificar sistemas de generación adecuados que superen barreras sociales, geográficas y ambientales. Se priorizan variables que afectan la implementación de energías renovables y se proponen estrategias administrativas y técnicas, apoyadas por alianzas público-privadas y recursos de regalías, para mejorar la confiabilidad, reducir costos y disminuir emisiones. Finalmente, se sugieren actividades metodológicas para facilitar la toma de decisiones y la inclusión de sistemas de energía alternativos.

Neira y Quiroga (2021) proponen un sistema de generación de energía solar fotovoltaica para Zonas no Interconectadas, destacando su durabilidad gracias al monitoreo preventivo y su fácil operación. Aprovechando el clima y la radiación solar de la región, se busca mejorar la calidad de vida de la comunidad de los CAIMESAS. Por su parte, Castillo y Romero (2023) proponen diseñar un sistema solar fotovoltaico para Bocas del Pauto, ofreciendo un suministro eléctrico más económico y duradero, mejorando la calidad de vida y reduciendo las emisiones de CO2, en su estudio se revisan investigaciones sobre sistemas fotovoltaicos en zonas aisladas y se presentan conceptos técnicos, normatividad y *software* necesarios para el diseño. Se analiza la demanda energética y radiación solar del área, comparando opciones OFF-GRID y ON-GRID, calculando las huellas de carbono para tres escenarios: 100% solar, 70% solar y 30% diésel, y 30% solar y 70% diésel, para determinar la mejor opción.

Roa y Gómez (2019) proponen lineamientos basados en análisis técnicos y económicos para tres FNCER (energía solar, eólica y de biomasa) en una comunidad de 2.000 habitantes de Puerto Carreño, Vichada.

Finalmente, Restrespo (2020) propone un modelo para diseñar un sistema óptimo de energías eólica y solar con baterías para suministrar electricidad a zonas no interconectadas en Colombia, como San Andrés Islas. El objetivo es proporcionar electricidad asequible, confiable y sostenible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo el desarrollo local. Utilizando datos de radiación solar y velocidades del viento, se caracterizó el clima para estimar la generación eléctrica. El modelo ofrece una visión inicial de un sistema híbrido óptimo en términos de costos y tecnologías renovables.

2.6 Normatividad

El sector energético es impulsado y respaldado por los recursos y el apoyo del Estado, mediante la formulación de diversas leyes que proporcionan una estructura jurídica al sistema energético nacional. De acuerdo con Superservicios (2023), algunas normas aplicables a la prestación del servicio de energía eléctrica en las ZNI son:

a. Ley 142 de 1994: define el marco normativo para los servicios públicos residenciales y establece otras disposiciones conexas.
b. Ley 143 de 1994: establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica a nivel nacional.
c. Ley 629 de 2000: Colombia se une formalmente al Protocolo de Kioto, comprometiéndose a implementar estrategias y acciones para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar los esfuerzos globales en la lucha contra el cambio climático.
d. Ley 855 de 2003: define las Zonas No Interconectadas.

e. Resolución 18-1072 De 2008: define el proceso para la contratación de áreas de servicio exclusivo para la provisión del servicio público de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas, buscando asegurar que estas áreas, que no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional, reciban un suministro eléctrico adecuado y confiable.

f. Ley 1715 de 2014: regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

g. Decreto Ministerio de Minas y Energía 1623 de 2015: establece que la política para universalizar el servicio de energía eléctrica en Colombia debe garantizar acceso equitativo y sostenible en el SIN y ZNI, mejorar la calidad del servicio y optimizar recursos financieros. También regula el uso de los fondos FAER y FAZNI para asegurar el acceso equitativo y sostenible a la energía en todo el país (Grupo de investigación Xué, 2020).

h. Ley 2036 de 2020: fomenta el desarrollo sostenible y la diversificación de la matriz energética del país mediante la participación activa de departamentos, municipios y distritos en la planificación, desarrollo y ejecución de proyectos de generación con fuentes de energía limpias y renovables.

A pesar de contar con un marco normativo y políticas públicas, como la Ley de Transición Energética 2099 de 2021 y el CONPES 4075 de 2022, que fomentan el desarrollo de estos proyectos en el país e incentivan la inversión tanto nacional como extranjera, su implementación en los territorios ha generado conflictos socioambientales entre los diferentes actores, sin haber logrado aún un escenario claro y equitativo para todos (Londoño, 2022).

3. Marco Empírico

3.1. Hipótesis

Las energías renovables con mayor potencial energético en Colombia son la energía solar, la energía eólica y la energía de biomasa, cuyo aprovechamiento permitirá incrementar la cobertura de energía eléctrica en cuatro sectores con baja cobertura del país.

3.2. Objetivo general

Evaluar el potencial energético y eléctrico de las energías renovables solar, eólica, de biomasa e hidroeléctrica en cuatro sectores geográficos con baja cobertura eléctrica en Colombia.

3.3. Objetivos específicos

- Identificar y seleccionar los sectores geográficos de Colombia que presentan menor índice de cobertura eléctrica.
- Calcular y analizar el potencial energético y eléctrico de las energías renovables presentes en cada uno de los sectores seleccionados.
- Definir los 2 tipos de energía renovable que presentan mayor factibilidad y potencial en cada sector.

3.4. Metodología

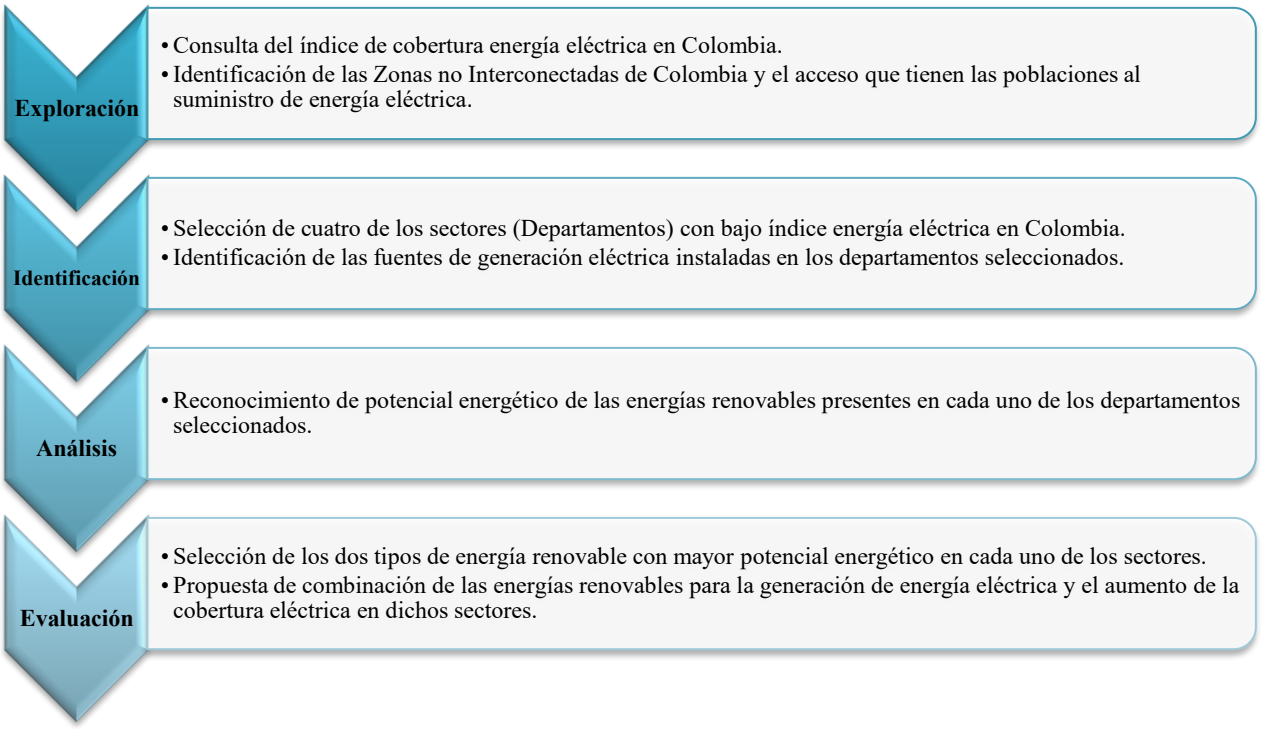
Para desarrollar el presente estudio se utilizó una metodología de tipo descriptiva, la cual basa la recolección y análisis de los datos en la información bibliográfica y datos estadísticos disponibles. Asimismo, teniendo en cuenta que los datos y su análisis son una combinación entre aspectos cuantitativos y cualitativos, los resultados presentados tienen un enfoque mixto.

3.5. Diseño y tipo de investigación

A continuación, en la Figura 2 se observa un esquema de la metodología llevada a cabo para el desarrollo de la investigación:

Figura 2.

Esquema de metodología



Nota. Elaboración propia

3.6. Población y muestra

Colombia se encuentra ubicada en el extremo noroccidental de Suramérica, en donde cuenta con costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico. Su superficie terrestre consta de 1'141.748 km^2 y su población comprende, aproximadamente, 52 millones de personas, de la cual, el 51,2 % son mujeres y el 48,8 % son hombres. La mayoría de los habitantes se concentran en el centro (región andina) y el norte (región Caribe) del país, mientras que las áreas del oriente y sur (región de los llanos orientales y la Amazonía, respectivamente) son extensas, pero tienen una baja densidad de población y están generalmente despobladas (Cancillería, s.f).

El país se divide administrativa y políticamente en **32 departamentos** (unidades territoriales de primer nivel), los cuales son gobernados desde sus respectivas ciudades capitales. De acuerdo con el Artículo 298 de la Constitución Política de Colombia de 1991,

los departamentos son entidades territoriales que gozan de autonomía para la administración de los asuntos seccionales y la planificación y promoción del desarrollo económico y social dentro de su territorio en los términos establecidos por la Constitución y las leyes (Banrep, 2022).

Con el fin de evaluar las condiciones energéticas de los departamentos que presentan un bajo índice de cobertura de energía eléctrica, se llevó a cabo un muestreo no probabilístico intencional, seleccionado **cuatro** departamentos. Los criterios de inclusión de estos departamentos fueron: a) presentar un ICEE menor al 80%, y b) ubicarse en zonas de baja densidad poblacional país.

Lo anterior, con la finalidad de visualizar el acceso a la energía eléctrica que presentan dichas poblaciones, así como el potencial energético que presentan las FNCER en cada departamento, de forma que se facilite el planteamiento de diferentes propuestas de implementación de proyectos con FNCER considerando el contexto que presenta cada una de las regiones.

3.7. Instrumentos de evaluación

Los instrumentos de evaluación y análisis de datos se basan principalmente en el análisis documental, principalmente de información gubernamental disponible, la cual se encuentra en diferentes formatos, como índices porcentuales y estadísticos, gráficos de torta, tablas, información cartográfica, entre otros, los cuales permiten recopilar datos para el desarrollo de la investigación.

I. ***Exploración:*** para el desarrollo de esta etapa, se utilizó información gubernamental, para obtener el índice de cobertura de energía eléctrica y la densidad poblacional de cada departamento del país.

II. ***Identificación***: se seleccionaron cuatro departamentos de Colombia, basados en el criterio descrito en la sección 3.6 y, a partir de la información gubernamental y

bibliográfica se obtuvo el contexto eléctrico actual de dichos departamentos. En esta etapa, la información se analizó mediante diagramas de barras y torta, ya sea propios o provenientes de las referencias, realizándose la descripción de estos.

III. ***Análisis***: una vez considerado el contexto energético actual de cada departamento, se revisaron diferentes referencias bibliográficas y gubernamentales para obtener el potencial energético de algunas FNCER disponibles en cada uno de los departamentos seleccionados. Esta información se muestra mediante mapas de densidad energética (extraídos de las referencias), diagramas de torta y su respectivo análisis y descripción. Las FNCER evaluadas y el método para obtener el potencial energético de cada una se describe a continuación:

- Energía Solar: se realizó la extracción de la información de la Radiación Solar del país por medio del mapa de Densidad de Radiación Solar y, mediante el uso de la herramienta virtual *Tutiempo.net.,* se extrajeron los datos de la Irradiancia Solar [W/m²] en municipios específicos durante las horas de sol disponibles del día en cada uno. Dicha herramienta suministra el valor de la variable del día en que se realiza la consulta y la predicción del valor que tendrá en los próximos 15 días. Con el fin de ampliar dicha evaluación, se realiza la extracción de esta información, observando gráficamente el comportamiento de la variable en cada uno de los días evaluados, el promedio de la Irradiancia solar por cada hora de sol y, por último, obteniendo el valor de la **Irradiación solar** en **Wh/m²**.
- Energía Eólica: para realizar la evaluación del potencial energético eólico se consideró la Densidad de Energía Eólica del país. La evaluación particular de esta variable en cada uno de los sectores se basó en la extracción de la información meteorológica disponible, de la cual se obtienen los valores de la predicción de la velocidad del viento durante el mes de marzo de 2025. Con esta información se

realizó el cálculo de la **Densidad del Aire**, la cual es posible calcular conociendo los parámetros de temperatura (T) y altura sobre el nivel del mar (h), haciendo uso de la siguiente fórmula (Villarrubia, 2013):

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T+273}\right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad (1)$$

Con este resultado, se obtiene el valor de la **Densidad de Potencia Eólica W/m²**, el cual es calculado partiendo del valor de ρ y el valor de la velocidad (v), por medio de la siguiente fórmula (Villarrubia, 2013):

$$\frac{P_{viento}}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (2)$$

- Biomasa: la evaluación del potencial energético de la Biomasa se basó en la extracción de la información de los cultivos plantados en cada uno de los sectores evaluados durante el año 2020 en UPRA (s. f.). Partiendo del área cultivada en hectáreas, la producción de cada cultivo en toneladas, el Factor de residuo (Fr) y el Potencial Calórico Interior (PCI) de cada tipo de residuo; se calcula el Potencial energético de cada cultivo en **TJ/año** mediante la siguiente ecuación:

$$P_{BRA} = A * R_C * \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} F_r * PCI_{ki} \left[\frac{TJ}{año}\right] \quad (3)$$

Con esto, se realiza la sumatoria de los potenciales de cada cultivo para obtener el Potencial energético total de la biomasa residual agrícola en cada departamento.

- Energía Hidráulica: se revisó el potencial hidroenergético presentado en el Atlas Hidroenergético de Colombia (UPME & U. Javeriana, 2015). Así mismo, para determinar el potencial energético del recurso hídrico, se consideró el aprovechamiento a través de centrales de filo de agua con longitudes de conducción (longitud horizontal entre la captación y las turbinas) de 200 m, 1 km y 5 km, del cual es posible determinar los puntos en los que se pueden plantear centrales hidroeléctricas de diferente capacidad en cada departamento. Realizando la

sumatoria de la cantidad de puntos y la potencia máxima de cada tipo de central que se podría instalar en cada departamento, es posible obtener la capacidad máxima a ser instalada en cada uno de estos.

IV. ***Evaluación***: la evaluación de las FNCER se realiza mediante tres subetapas, las cuales se describen a continuación:

***IV.I*. Cálculo de energía eléctrica de cada FNCER.** Ya que los datos para evaluar el potencial energético de las FNCER evaluadas tienen unidades de medida diferentes entre sí, para realizar la comparación y definir aquellas que presentan un mayor potencial en cada uno de los departamentos, se realizó el cálculo de la energía generada en **kWh** de cada FNCER por cada hectárea (**10000 m²**) por **año**, partiendo del método típico de generación eléctrica de cada una de estas y sus características técnicas.

- Energía solar: Paneles solares fotovoltaicos

La potencia generada mediante un panel solar se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ELE_SOLARxha} = (A_{PANEL} * R_S * \eta_{Panel})/24h \text{ [W]} \quad (4)$$

Donde:

A_{PANEL}= Área ocupada por el panel (o matriz de paneles)

R_S= Radiación solar en kWh/m^2/día

η_{Panel}= Eficiencia del panel

Asumiendo el uso de una matriz de paneles solares monocristalinos que ocupa un área de **10000 m²**, de 450 W de la marca POWEST cuya eficiencia es 20.8%, se realiza el cálculo de la energía generada en cada departamento, de acuerdo con el valor de la Irradiación promedio obtenido en cada uno de estos.

$$E_{ELE_SOLARxha} = P_{ELE_SOLAR} * 8760h \quad \text{[kWh]} \quad (5)$$

- Energía Eólica: Aerogeneradores

Partiendo de la ecuación (2), la potencia generada por un aerogenerador se calcula mediante la siguiente ecuación (Oñate, 2020):

$$P_{ELE_{EÓLICAxAerogenerador}} = \frac{1}{2} A * c_p * \rho * v^3 \ [W] \quad (6)$$

En donde:

A= Área cubierta por las palas de las turbinas del aerogenerador.

c_p= Coeficiente de potencia aerodinámico, el cual, de acuerdo con el Límite de Betz, se determina que ningún aerogenerador aprovecha más del 59.26% de la energía eólica en energía rotante del rotor.

Considerando que, para la instalación de aerogeneradores en un área determinada, la separación óptima entre cada uno se encuentra entre 8 y 12 veces el diámetro del rotor, se considera para este caso la información técnica de un aerogenerador de potencia máxima de 6000 W de la marca BORNAY, cuyo diámetro es de 4 m. Tomando una separación entre aerogeneradores de 10 veces el diámetro= 40 m, en una hectárea se instalarían **9** aerogeneradores. Por lo tanto, la potencia eléctrica generada por hectárea es:

$$P_{ELE_{EÓLICAxha}} = 9\left(P_{viento} * A * c_p\right) \ [W] \quad (7)$$

$$E_{ELE_{EÓLICAxha}} = P_{ELE_{EÓLICAxha}} * 8760h \ [kWh] \quad (8)$$

- Biomasa

A partir del Potencial de Biomasa Residual agrícola por hectárea calculado mediante la ecuación (3), es posible determinar la Potencia eléctrica a partir de la siguiente ecuación (Pino, 2021):

$$P_{ELE_BIOMASAxha} = 0.8(P_{BRA} * \eta_E) \quad [W] \quad (9)$$

$$E_{ELE_BIOMASAxha} = P_{ELE_BIOMASA} * 8760h \ [kWh] \quad (10)$$

Donde:

η_E= Eficiencia de la producción eléctrica a partir de la combustión directa de la biomasa, que, de acuerdo con Gutiérrez et al. (2020) tiene un valor del 28%.

- Energía Hidroeléctrica

Tomando la capacidad máxima que podría instalarse en cada departamento, y considerando el área superficial del departamento, se determina la potencia hidroeléctrica por hectárea. Por lo tanto, la energía hidroeléctrica generada por hectárea al año es:

$$E_{HIDROELExha} = P_{HIDROELExha} * 8760h \quad [kWh] \quad (11)$$

***IV.II*. Definición de las FNCER con mayor potencial eléctrico.** A partir de los valores obtenidos de la energía eléctrica generada por cada FNCER en cada departamento por hectárea, se seleccionaron aquellas que presentaron un mayor valor.

***IV.III.* Propuesta de generación de energía eléctrica.** Se presentó una propuesta que involucra el uso de las FNCER con mayor potencial eléctrico en cada departamento.

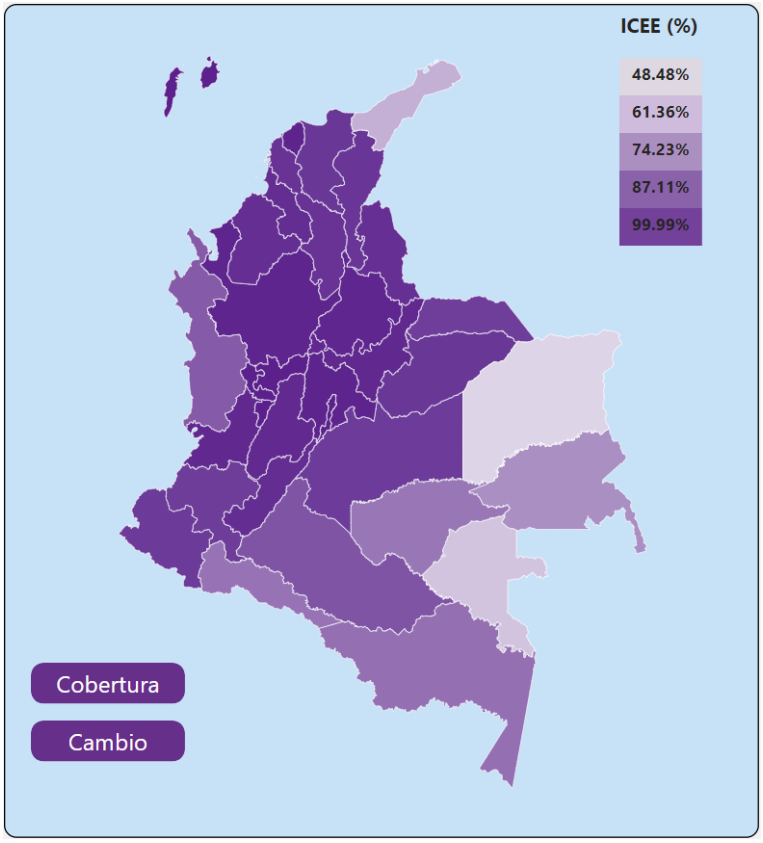
3.8. Resultados y discusión

3.8.1. Exploración

De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero- Energética el índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) actual en Colombia se estima en 96.55% (Intégrame, 2024). En la Figura 3 se observa el ICEE por departamento:

Figura 3.

Índice de Cobertura de Energía Eléctrica en Colombia



Nota. Tomado de Intégrame (2024)

Las zonas ubicadas en la periferia del país, a pesar de poseer mayor extensión superficial (m^2), presentan un porcentaje bajo de cobertura eléctrica. La Tabla 2 indica el ICEE específico para cada uno de los departamentos, así como su densidad poblacional.

Tabla 2.

ICEE por departamento en Colombia

DEPARTAMENTO	ICEE ACTUAL (%)	DENSIDAD POBLACIONAL (Personas/ km^2)
Amazonas	77.71 %	0.70
Antioquia	98.94 %	100.72

DEPARTAMENTO	ICEE ACTUAL (%)	DENSIDAD POBLACIONAL (Personas/ km²)
Arauca	92.10 %	11.01
Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	99.69 %	1178.46
Atlántico	98.99 %	748.38
Bogotá, d. C.	99.99 %	4670.80
Bolívar	94.93 %	79.69
Boyacá	97.83 %	52.50
Caldas	99.89 %	126.23
Caquetá	85.70 %	4.52
Casanare	94.13 %	9.42
Cauca	92.30 %	49.97
Cesar	94.38 %	52.42
Chocó	83.80 %	11.49
Córdoba	96.37 %	71.33
Cundinamarca	99.25 %	120.57
Guainía	68.77 %	0.67
Guaviare	75.60 %	1.55
Huila	96.59 %	55.32
La guajira	58.81 %	42.24
Magdalena	94.12 %	57.86
Meta	92.71 %	12.56
Nariño	93.01 %	49.01
Norte de Santander	96.15 %	63.58
Putumayo	76.62 %	13.99
Quindío	99.91 %	292.63

DEPARTAMENTO	ICEE ACTUAL (%)	DENSIDAD POBLACIONAL (Personas/ km^2)
Risaralda	99.96 %	227.87
Santander	98.44 %	71.55
Sucre	96.80 %	82.89
Tolima	97.30 %	56.45
Valle del cauca	97.83 %	202.16
Vaupés	53.01 %	0.75
Vichada	48.48 %	1.08

Nota. Tomado de Intégrame (2024).

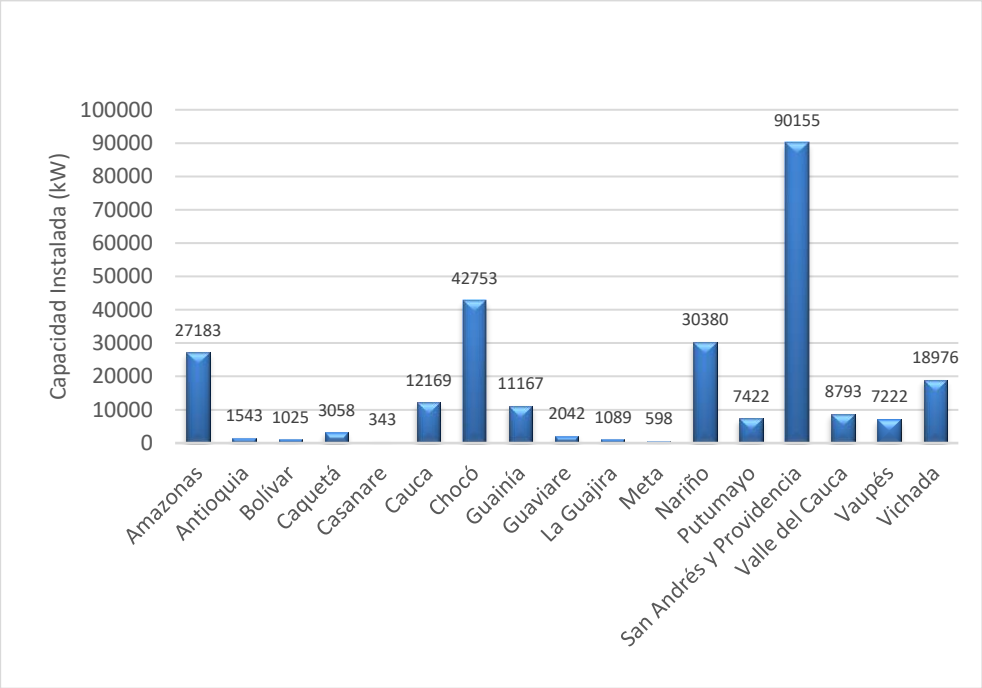
Los departamentos con un ICEE menor al 80% son Vichada, Vaupés, Guaviare, La Guajira, Amazonas, Putumayo y Guanía.

De acuerdo con el Centro Nacional de Monitoreo del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas (IPSE), las ZNI se encuentran distribuidas en áreas donde la cobertura de energía eléctrica está basada principalmente en el uso de combustibles fósiles (diésel) e instalaciones híbridas con estos, cuya capacidad instalada es de aproximadamente 266.000 kW.

En la Figura 4 se muestra la capacidad de energía eléctrica instalada con generación mediante diésel, en cada uno de los departamentos que en los que se encuentran las ZNI.

Figura 4.

Capacidad instalada mediante diésel en las ZNI



Nota: Elaboración propia, datos de IPSE (2023a).

San Andrés y Providencia, Chocó y Nariño, son los departamentos que presentan mayor capacidad instalada, representando aproximadamente el 61% del total (Superservicios, 2023), debido a que presentan un número mayor número de prestadores del servicio eléctrico, lo que facilita que tengan un ICEE mayor al 80% (ver Tabla 2).

Sin embargo, en la actualidad se han incorporado soluciones alternativas que han permitido aumentar el acceso a la energía eléctrica en diferentes ZNI. En la Figura 5 se muestra el tipo de fuente de energía alternativa que se incorpora en cada ZNI.

Figura 5.

Caracterización de las ZNI- Fuentes de energía



Nota: Tomado de IPSE (2024).

La IPSE ha categorizado las ZNI mediante un conjunto de localidades según el número de usuarios existentes, en la Tabla 3 se presenta dicha tipificación, de las cuales es posible obtener datos del contexto energético por localidad en cada ZNI.

Tabla 3.

Categorización de Localidades de ZNI

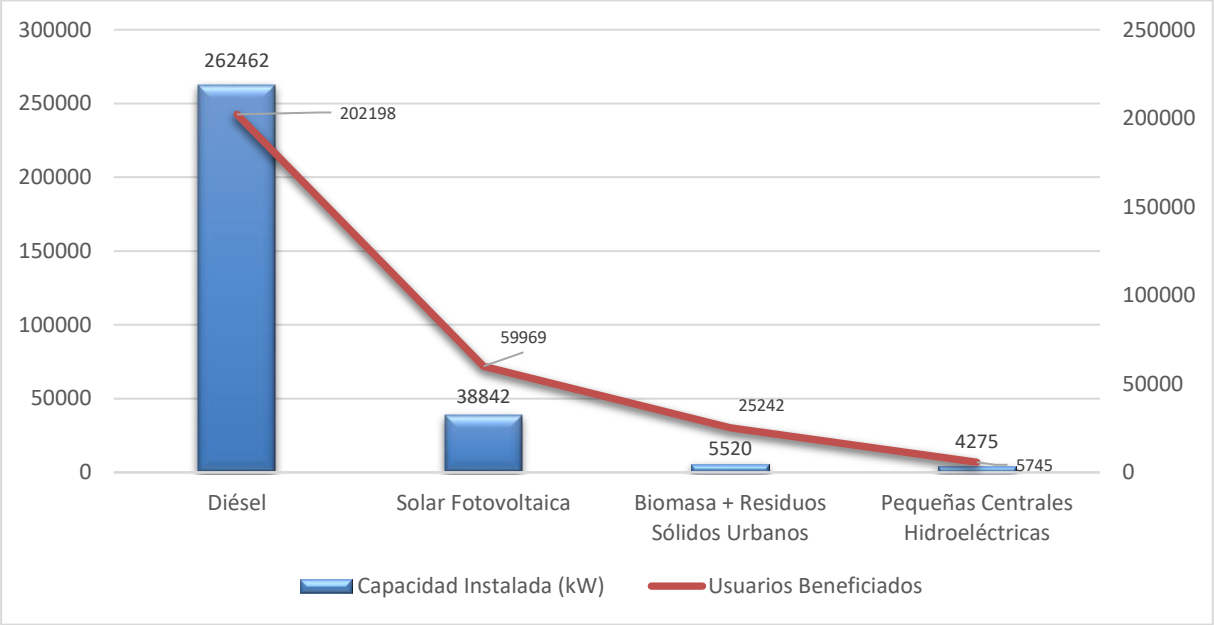
Categoría de Localidad ZNI		N° de Localidades	N° de Usuarios	% Total
Tipo1	Más de 301 usuarios	39	82.032	40%
Tipo 2	Entre 151 y 300 usuarios	201	37.972	19%
Tipo 3	Entre 51 y 150 usuarios	889	66.264	32%
Tipo 3	Hasta 50 usuarios	580	18.781	9%

Nota. Tomado de IPSE (2023a).

En la Figura 6 se observa el comparativo entre la capacidad instalada de cada tipo de fuente de energía implementada en las ZNI, así como la cantidad de usuarios de cada uno. Después de la energía generada con diésel, la energía solar fotovoltaica presenta mayor capacidad instalada, representando aproximadamente el 12% del total de la energía, seguido de la biomasa y residuos sólidos urbanos con aproximadamente el 2% y por último por las pequeñas centrales hidroeléctricas con cerca del 1% del total de la capacidad instalada.

Figura 6.

Capacidad instalada & usuarios- Tipos de Energía



Nota: Elaboración propia, datos tomados de IPSE (2023a).

3.8.2. Identificación

Partiendo de la información obtenida anteriormente, y con el fin de identificar el potencial energético de las ZNI con baja densidad poblacional, se seleccionan los departamentos que presentan un ICEE menor al 80%: Putumayo (76.62%), La Guajira (58.81%), Vaupés (53.01%) y Vichada (48.48%).

A continuación, se presenta la información departamental y el contexto energético actual de cada uno de estos, en el cual se indica la energía generada, los tipos de fuente de energía implementados, entre otros.

a. Putumayo

Está ubicado en el suroccidente de Colombia. Limita al norte con Cauca y Caquetá, al este con Caquetá y Amazonas, al sur con Perú y Ecuador, y al oeste con Nariño. (Figura 7). Cuenta con un área de 24.885 km^2, en la cual se concentra menos del 1% de la población nacional con un aproximado de 383.000 personas, de las cuales la gran

mayoría se reconoce como población mestiza (aprox. 148.240 personas), seguida del grupo indígena (aprox. 69.920 personas), y por último el grupo conformado por la población afrodescendiente (aprox. 14.630 personas) (Upra, 2023a, p. 3).

Figura 7.

Mapa Geográfico del Departamento de Putumayo

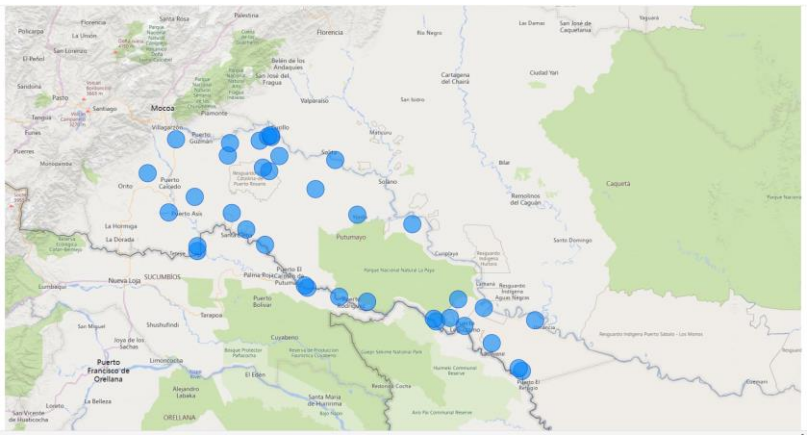


Nota. Putumayo (2025)

En la actualidad, el IPSE se encuentra monitoreando alrededor de 36 localidades en el departamento de Putumayo (Figura 8), las cuales presentan suministro eléctrico mediante 3 prestadores del servicio.

Figura 8.

Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto. de Putumayo

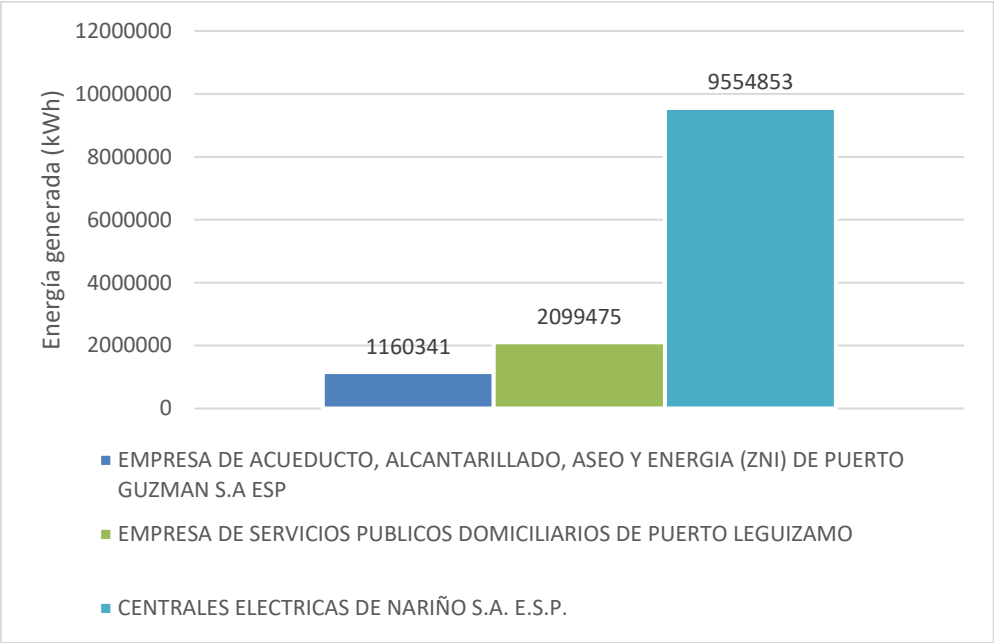


Nota: Tomado de Sigipse (2024).

En la Figura 9 se indica la cantidad anual de energía eléctrica generada en kwh, mediante diésel, por cada uno de los prestadores del servicio eléctrico durante el año 2024.

Figura 9.

Energía eléctrica generada con diésel en el departamento de Putumayo (kWh)



Nota: Elaboración propia, datos tomados de SUI (s.f.).

La energía total generada en el departamento se encuentra alrededor de los 13000 MWh, de los cuales, la empresa Centrales Eléctricas de Nariño S.A. ESP provee cerca del 75% de la energía generada con diésel.

b. La Guajira

Está situado al norte del país y limita al norte y al oeste con el mar Caribe, al este con Venezuela; al sur con Cesar y al suroeste con Magdalena (Figura 10). Cuenta con un área de 20.848 km^2. Se estima que la población de La Guajira en el año 2023 es de 1.038.397 personas, la población indígena es de 480.500 personas, la población negra, mulata, afros es de 77.236 personas y la población de 15 años y más que se identifica como campesinos es de 157.870 personas. (Upra, 2023b, p. 3)

Figura 10.

Mapa Geográfico del Departamento de La Guajira

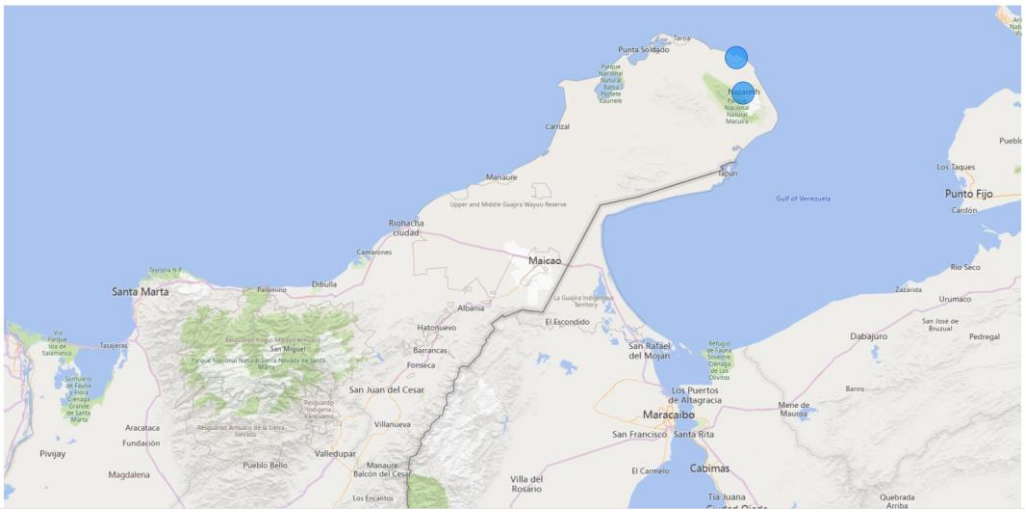


Nota. La Guajira (2025).

El departamento de La Guajira cuenta con la implementación de diferentes tipos de fuentes de generación de energía, principalmente: diésel, soluciones con energía solar fotovoltaica y energía eólica. En la Figura 11 se indican las localidades que se encuentran monitoreadas por el IPSE.

Figura 11.

Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto. de La Guajira



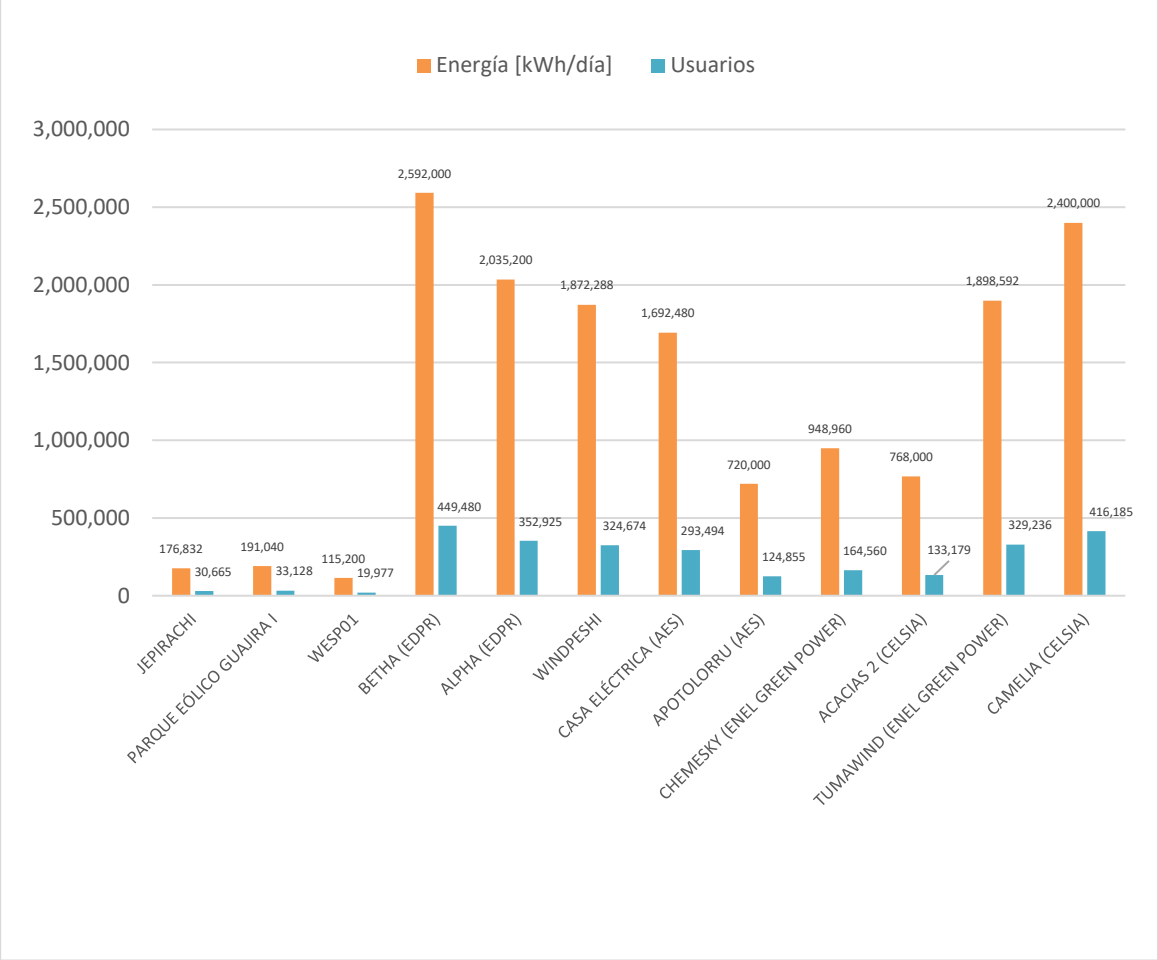
Nota: Tomado de Sigipse (2024).

En este departamento, la empresa Helios Energía S.A ESP se encarga del suministro mediante diésel y mediante soluciones solares fotovoltaicas, de las cuales, de acuerdo con el SUI, para el año 2024 se generaron cerca de 470 MWh y 353 MWh, respectivamente.

Por otro lado, la generación de energía eléctrica mediante energía eólica en el departamento es posible mediante la implementación de diferentes proyectos (Figura 12). Al respeto, se evidencia que la mayor cantidad de energía generada en kWh/día está dada por los proyectos Betha (EDPR) con aprox. 2.6 MWh/día y Camelia (Celsia) con 2.4 MWh/día, los cuales se encuentran ubicados en el municipio de Maicao y Uribia, respectivamente.

Figura 12.

Energía eléctrica generada con energía eólica en el departamento de Putumayo (kWh/día)



Nota: Elaboración propia, datos tomados de Datos Abiertos (s.f.).

c. Vaupés

Se localiza al suroriente del país, en la región de la Amazonia colombiana. Limita por el norte con Guaviare y Guainía, por el este con Brasil, por el sur con el río Apaporis que lo separa del Amazonas y Caquetá; y por el oeste, con Caquetá y Guaviare (Figura 13). Se estima que la población de Vaupés en el año 2023 es de 46.777 personas, la población indígena es el mayor porcentaje de la población con 39.759 personas, la población negra, mulata, afros es de 329 personas y la población de 15 años o mayor que se identifica como campesinos es de 17.150 personas. (Upra, 2023c, p. 3)

Figura 13.

Mapa Geográfico del Departamento de Vaupés

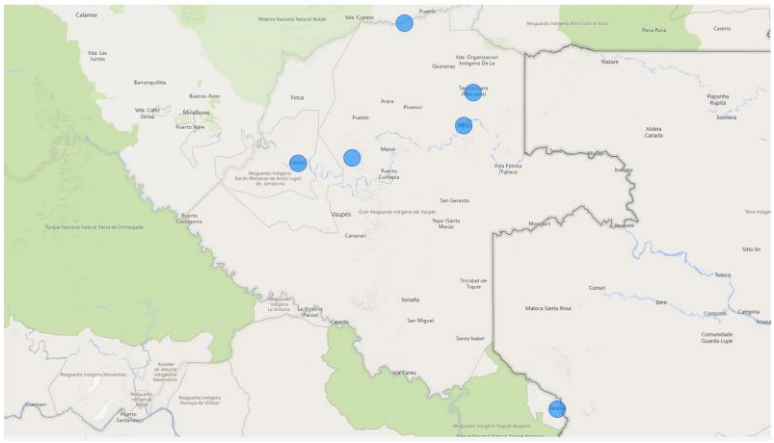


Nota. Tomado de Vaupés (2025)

El departamento de Vaupés se encuentra monitoreado por el IPSE mediante seis localidades (Figura 14), las cuales presentan suministro eléctrico mediante tres prestadores del servicio.

Figura 14.

Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto. de Vaupés

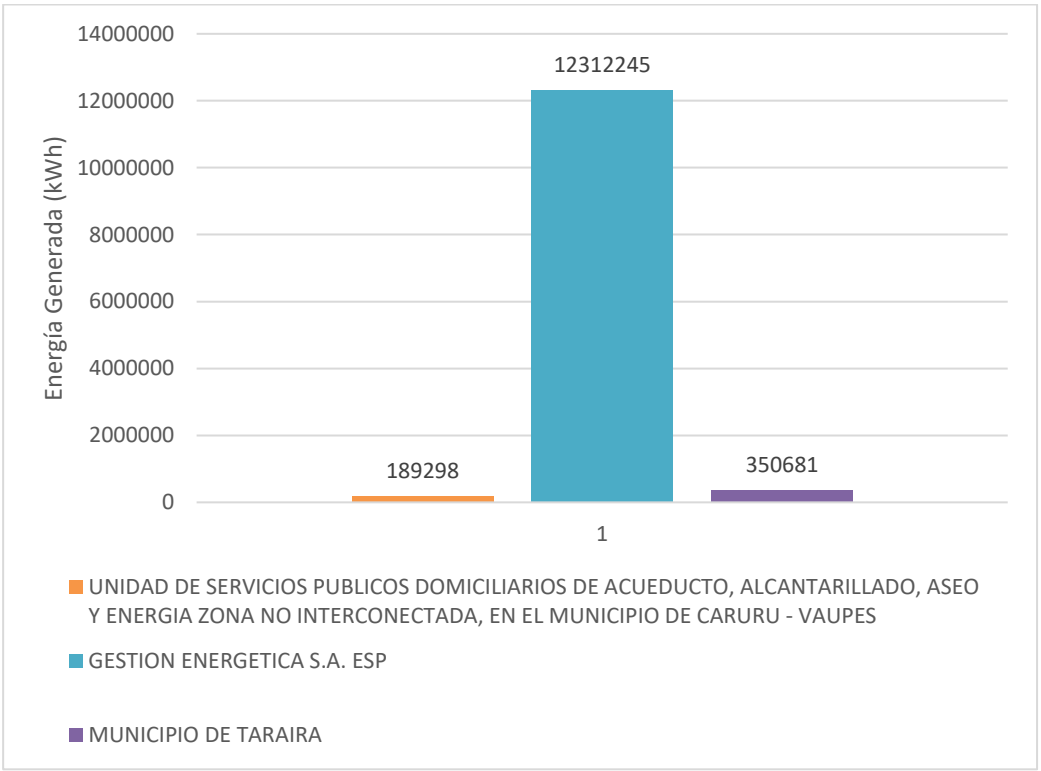


Nota: Tomado de Sigipse (2024)

En la Figura 15 se indica la cantidad anual de energía eléctrica generada en kwh, mediante diésel, por cada uno de los prestadores del servicio eléctrico durante el año 2024.

Figura 15.

Energía eléctrica generada con diésel en el departamento de Vaupés (kWh)



Nota: Elaboración propia, datos tomados de SUI (s.f.).

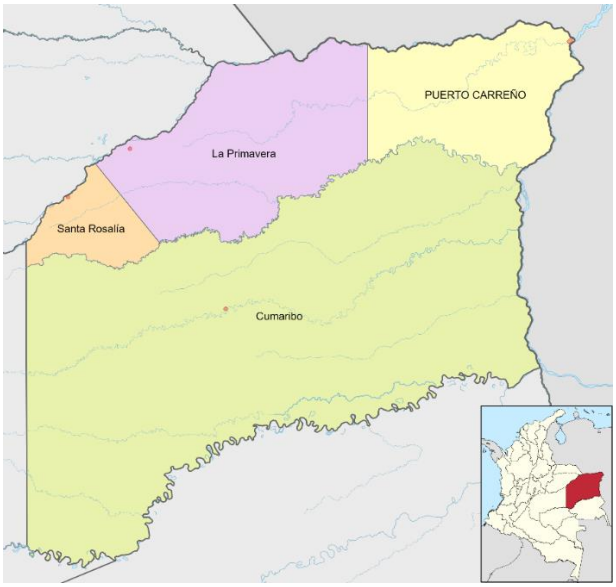
Se observa que la empresa Gestión Energética S.A ESP, cuya base se localiza en el municipio de Mitú, presenta cerca del 96% de la energía generada mediante diésel, con cerca de 12000 MWh. Así mismo, de acuerdo con el SUI, esta misma empresa generó cerca de **4 MWh** mediante energía Solar Fotovoltaica en el departamento.

d. Vichada

Forma parte de la Región Orinoquía o Los llanos Orientales. Limita por el norte con Arauca y Casanare y con la República de Venezuela, por el oriente con Venezuela, por el sur con Guainía y Guaviare, y por el occidente con Meta y Casanare (Figura 16). Tiene una superficie de 100.242 km² y una población aproximada de 94.000 personas. La mayor parte de su población es rural (83.72%) en su gran mayoría indígena descendiente de las tribus Guahibo y Arawak. (Colombia-sa, 2024, párr. 2)

Figura 16.

Mapa Geográfico del Departamento de Vichada

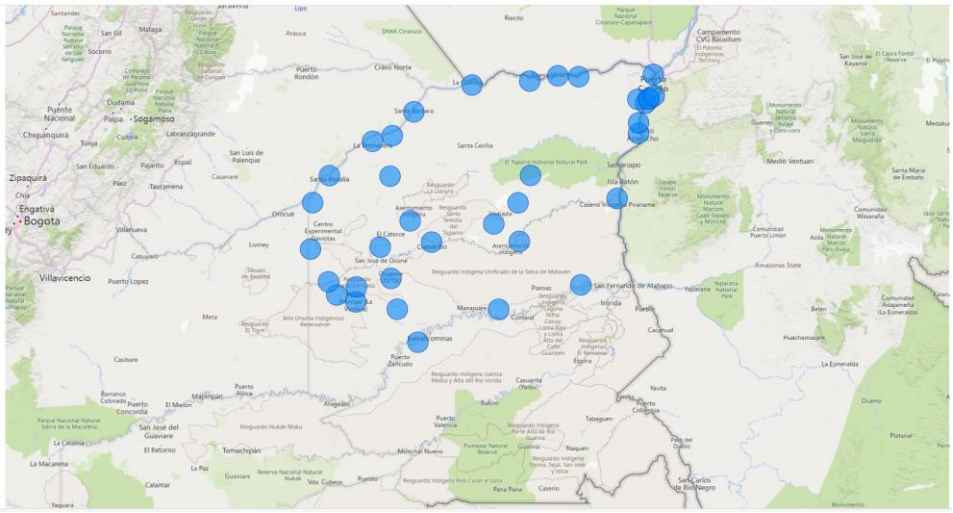


Nota. Tomado de Vichada (2025).

El departamento de Vichada se encuentra monitoreado por el IPSE mediante 36 localidades, las cuales se encuentran distribuidas como se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

Ubicación geográfica de las localidades ZNI del dpto. de Vichada

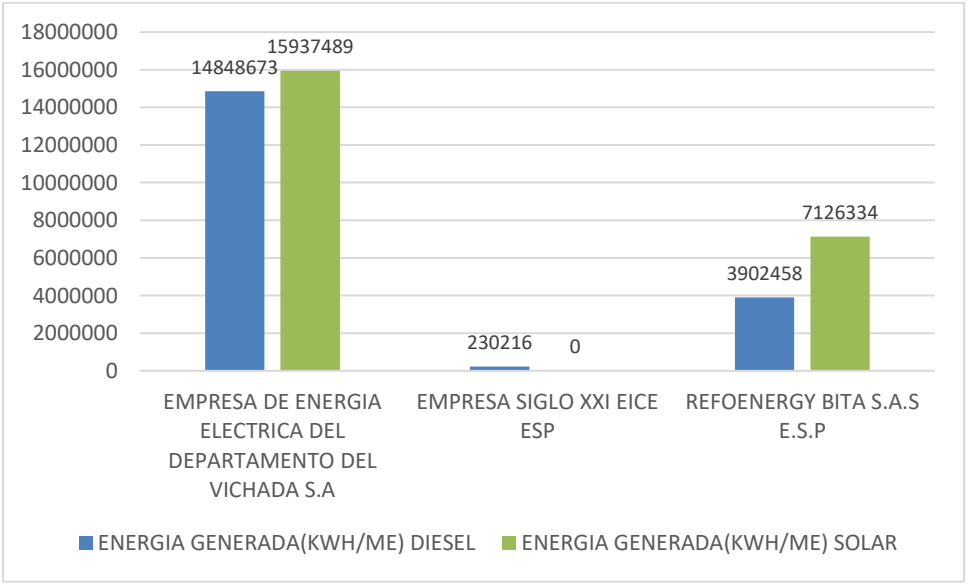


Nota: Tomado de Sigipse (2024)

En dichas localidades, el suministro de energía eléctrica es realizado mediante tres prestadores del servicio, cuya energía generada en kWh para el año 2024 se muestra en la Figura 18.

Figura 18.

Energía eléctrica generada con Diésel y Energía Solar Fotovoltaica en el departamento de Vichada (kWh)



Nota: Elaboración propia, datos tomados de SUI (s.f.)

Se observa que la energía generada por dichos prestadores de servicio está dada mediante diésel y energía solar fotovoltaica, esta última representa una mayor cantidad de energía, alcanzando cerca de 23000 MWh, mientras que la energía generada por diésel es aproximadamente de 19000 MWh en el año 2024. Lo anterior podría mostrar que, si bien el departamento aún se encuentra alimentado por energía generada mediante diésel en gran proporción, la implementación de nuevas alternativas está reduciendo la dependencia a este tipo de combustibles.

3.8.3. Análisis

Dado el contexto energético actual de los sectores seleccionados y el interés de entidades como el IPSE en monitorear y ampliar la cobertura de energía eléctrica, es importante evaluar las diferentes FNCER en cada sector, con la finalidad de identificar aquellas con alta disponibilidad y alto potencial energético que faciliten el diseño y planteamiento de proyectos que busquen aumentar la cobertura eléctrica, idealmente sin depender de combustibles fósiles.

Las siguientes son las FNCER evaluadas para el presente estudio. Inicialmente, se muestra el comportamiento de estos recursos en el territorio colombiano, y luego se realiza la evaluación en cada uno los departamentos seleccionados previamente.

3.8.3.1. FNCER en el territorio colombiano.

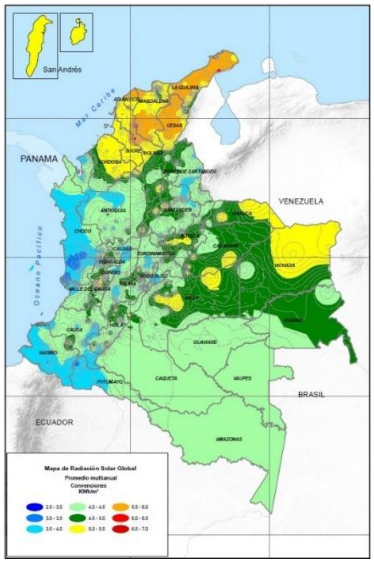
- Energía Solar

La Figura 19 muestra el Mapa de Radiación Solar Global de Colombia, en el que se observa el comportamiento de esta variable en las distintas regiones del país. Se evidencia que el sector norte del país presenta un mayor promedio en la radiación anual (entre 5.5 y 7.0 kWh/m^2), seguido del sector oriental (entre 4.5 y 5.5 kWh/m^2), mientras que en el sector occidental del país se evidencia un promedio entre 3.0 y 4.0 kWh/m^2, cabe mencionar que

estos valores no implican que el potencial energético no sea suficiente para la implementación de soluciones energéticas locales.

Figura 19.

Mapa de Radiación Solar Global de Colombia- Promedio Multianual [kWh/m^2].



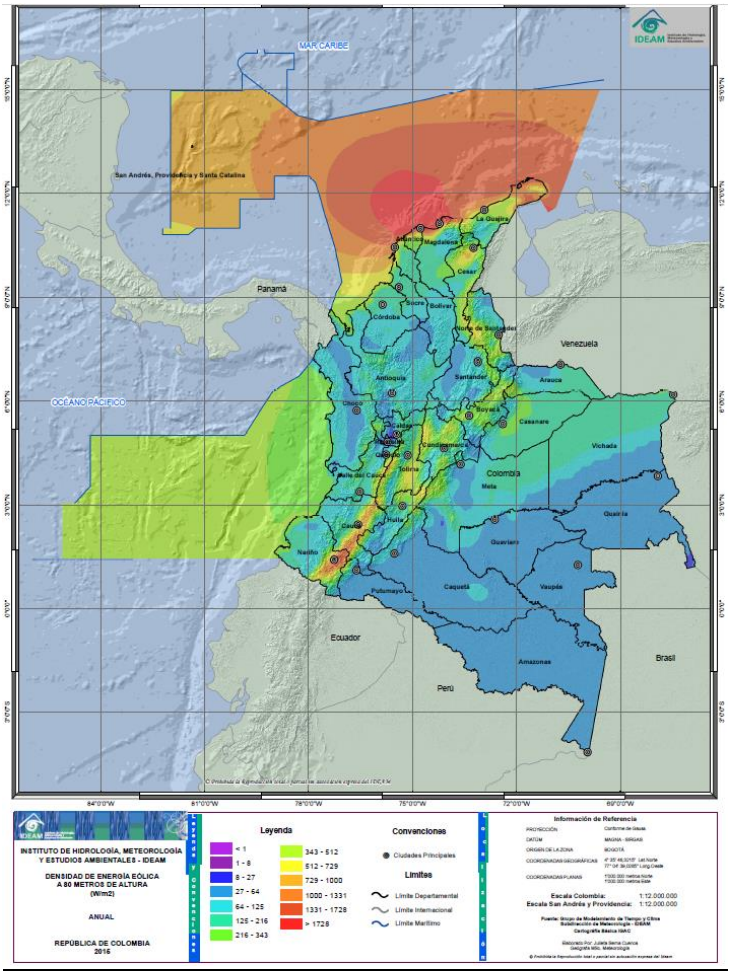
Nota: Tomado de IDEAM (2025).

- Energía Eólica

La Figura 20 muestra el Mapa de Densidad de Energía Eólica a 80 m de altura en todo el territorio colombiano, en donde se evidencia que alrededor de la costa norte se obtienen los mayores valores de dicha variable, encontrándose entre 500 y 1700 W/m^2 y, por el contrario, en el sector amazónico se obtienen valores mínimos, entre 8 y 64 W/m^2.

Figura 20.

Mapa de Densidad de Energía Eólica a 80 m de altura [W/m^2]



Nota: Tomado de IDEAM (2025).

- Bioenergía:

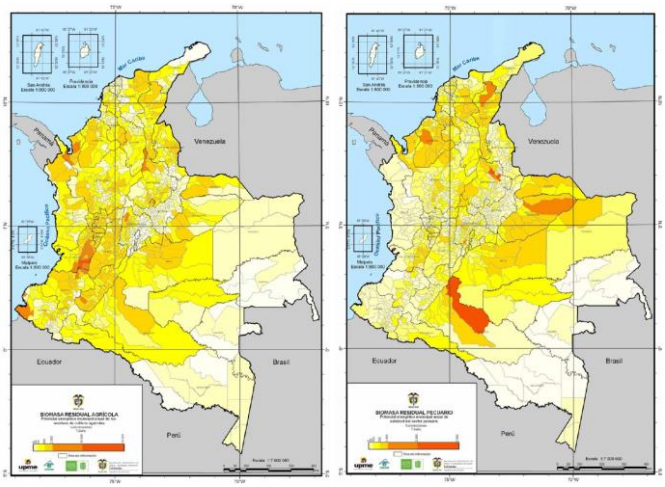
En la Figuras 21 (incisos a-c) se observa el potencial energético en TJ/año de la Biomasa Residual Agrícola, Pecuaria y de Residuos Orgánicos urbanos en todo el territorio colombiano. Del sector Agrícola, se evidencia que dicho potencial es mayor en la región Central y Occidental del país, en donde se alcanzan potenciales energéticos entre 2000 y 10000 TJ/año, mientras que en el sector Norte y el Suroriental no alcanzan los 20 TJ/año. Respecto al sector Pecuario, el mayor potencial se obtiene en el sector Norte y Central-Oriental del país, presentando valores entre 100 y 3000 TJ/año. Por otro lado, los Residuos Orgánicos Urbanos son evidenciados en sectores puntuales del país, y no cubren todo el

territorio, por lo tanto, el presente estudio solo evaluará el potencial energético de la Biomasa Residual Agrícola y Pecuaria.

Tomando en cuenta la composición química de cada tipo de residuo, se considera que la manera más adecuada de aprovechar el potencial energético de la biomasa agrícola es mediante procesos termoquímicos, mientras que para la biomasa proveniente de estiércol del sector pecuario se orienta a la digestión anaerobia para la obtención de biogás.

Figura 21.

Potencial Energético de Biomasa Residual en Colombia [TJ/año]. a) Residual Agrícola, b) Residual Pecuaria, c) De Residuos Orgánicos Urbanos



a) b)



c)

Nota: Tomado de UPME (2009).

Con el fin de obtener el potencial energético de la Biomasa Residual agrícola, se extrajo la información de los cultivos de arroz, banano, café, caña de panela, maíz, palma de aceite y plátano en cada departamento. En la Tabla 4 se aprecia el tipo de residuo que presenta cada cultivo, su factor de residuo y el potencial calórico inferior (PCI) de cada uno.

Tabla 4.

Tipos de biomasa residual por cultivo, factor de residuo y PCI

Producto	Tipo de Residuo	Factor de Residuo	PCI (MJ/kg)
Palma de aceite	Cuesco	0.22	16.69
	Fibra	0.63	17.88
	Raquis de palma	1.06	16.82
Caña de panela	Hojas-cogollo	3.75	16.77
	Bagazo	2.53	18.64
Café	Pulpa	2.13	17.82
	Cisco	0.21	18.54
	Tallos	3.02	18.34
Maíz	Rastrojo	0.93	14.35
	Tusa	0.27	14.18
	Capacho	0.21	15.96
Arroz	Tamo	2.35	13.03
	Cascarilla	0.2	15.08

Producto	Tipo de Residuo	Factor de Residuo	PCI (MJ/kg)
Banano	Raquis de banano	1	7.57
	Vástago de banano	5	8.50
	Banano de rechazo	0.15	10.41
Plátano	Raquis de Plátano	1	7.57
	Vástago de Plátano	5	8.50
	Plátano de rechazo	0.15	10.41

Nota: Elaboración propia, datos tomados de UPME (2009).

- Energía Hidroeléctrica:

La Figura 22 muestra el Potencial Hidroenergético del país en kW, en donde se evidencia que el sector norte del territorio presenta un potencial casi nulo, debido a la escasez del recurso hídrico en la región. En el resto del territorio es posible encontrar un potencial entre 500 y 20.000 kW.

Figura 22.

Mapa de Potencial Hidroenergético en Colombia [kW]

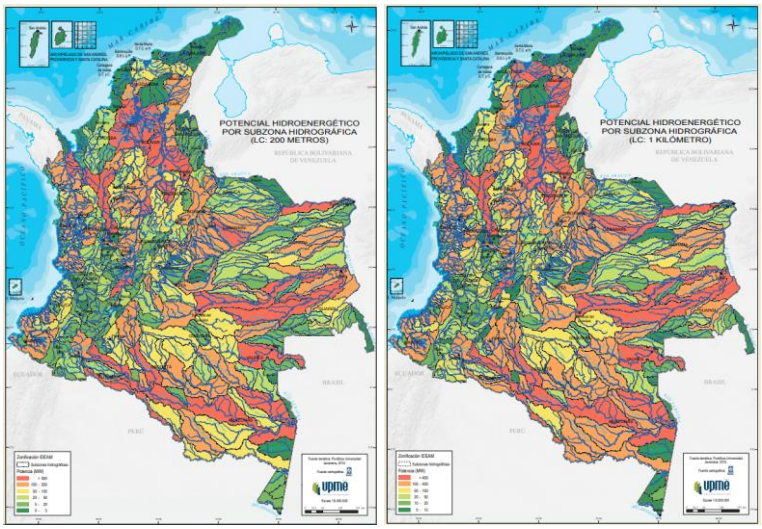


Nota: Tomado de UPME & U. Javeriana (2015).

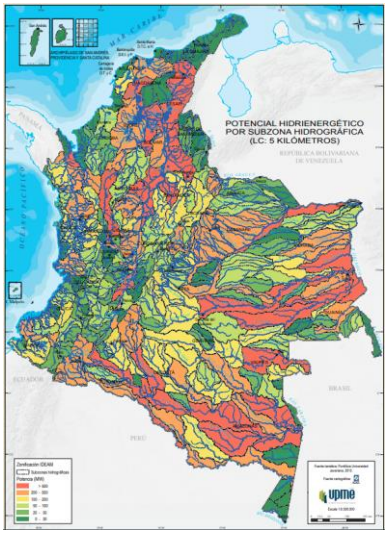
La Figuras 23 (incisos a-c) indican el comportamiento de la potencia generada para una longitud de conducción (Lc) de 200 m, 1 km y 5 km, respectivamente. En estos mapas, se evidencia que el mayor aprovechamiento se encuentra cuando Lc es 1 km, puesto que la mayoría del territorio presenta una potencia generada mayor a 100 kW.

Figura 23.

Potencial Hidroenergético en Colombia en función de Lc [kW]. a) Longitud de conducción (Lc) de 200 m, b) 1 km, c) 5 km



a) b)



c)

Nota: Tomado de UPME & U. Javeriana (2015).

Con el objetivo de determinar los lugares más adecuados para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos, se seleccionó (para cada categoría de centrales según su capacidad de generación) el tramo de río que ofrece el mayor potencial para ser aprovechado (Tabla 5). La ubicación de estos puntos se detalla en la Figura 24 (a – c). De allí, se observa que los

puntos considerados para grandes y pequeñas centrales contemplan un Lc de 1 km, mientras que para las centrales mini y micro se consideran Lc de 200 m.

Tabla 5.

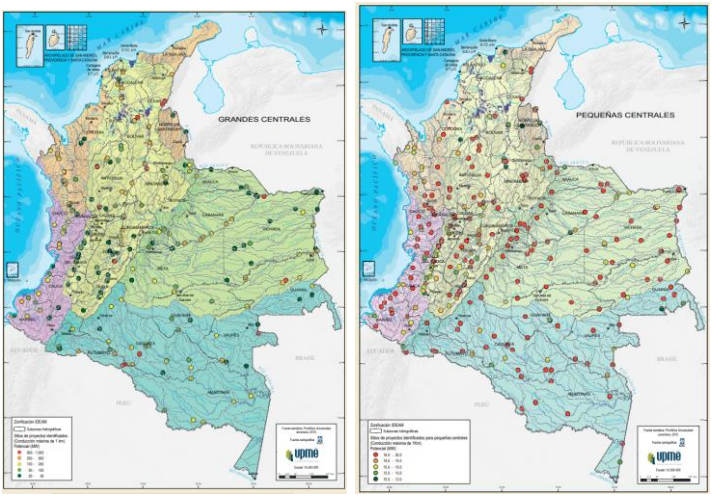
Tipos de Centrales hidroeléctricas según su capacidad

Tipo de Central	Capacidad
Micro	< 50 kW
Mini	< 500 kW
Pequeñas	10 MW< Cap <20 MW
Grandes	20 MW< Cap <1000 MW

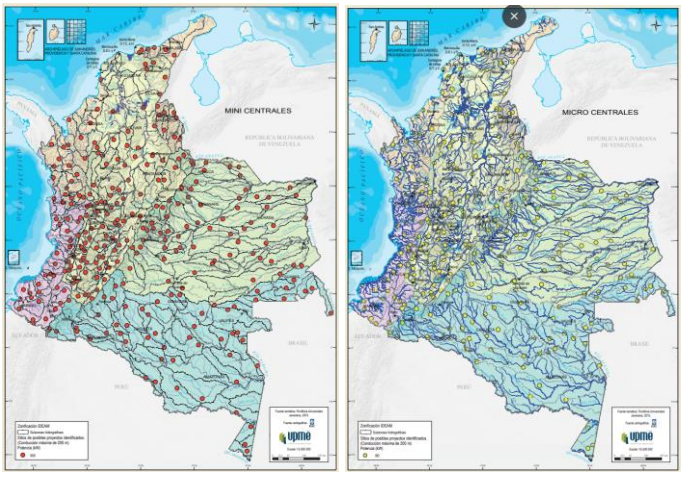
Nota. Elaboración propia. Datos tomados de UPME & U. Javeriana (2015)

Figura 24.

Ubicación de puntos de posibles Centrales Hidroeléctricas. a) Microcentrales, b) Minicentrales, c) Pequeñas Centrales, d) Grandes Centrales



a) b)



c) d)

Nota: Tomado de UPME & U. Javeriana (2015).

3.8.3.2. FNCER en sectores seleccionados.

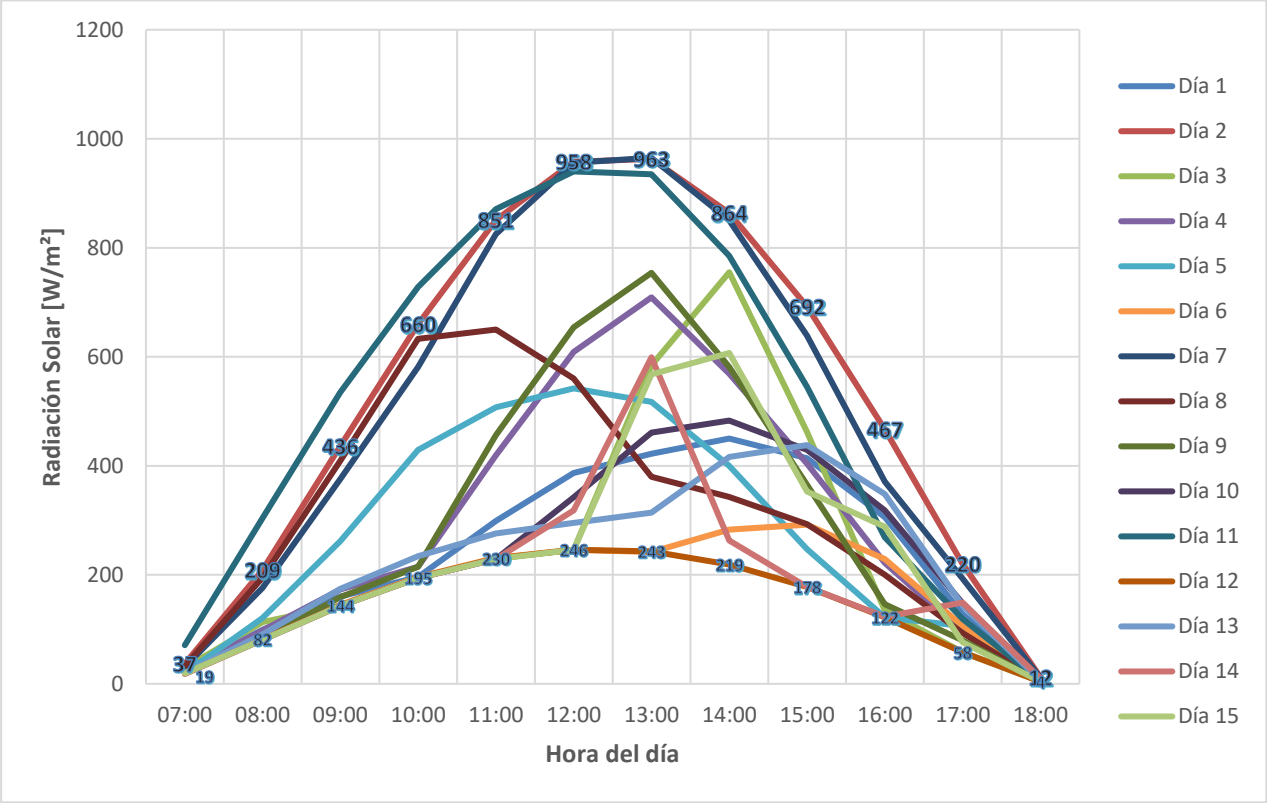
a. Putumayo

a.1 Energía Solar

Con la información disponible en la herramienta virtual, se extrajeron los datos del municipio de Puerto Asís, ubicado en el centro del departamento. Con base en los datos de irradiancia solar de los días 19 de febrero a 05 de marzo de 2025, se obtuvo el comportamiento de la variable entre las 7:00 am y las 6:00 pm, correspondientes a las horas de sol en el departamento (Figura 25).

Figura 25.

Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Puerto Asís, Putumayo



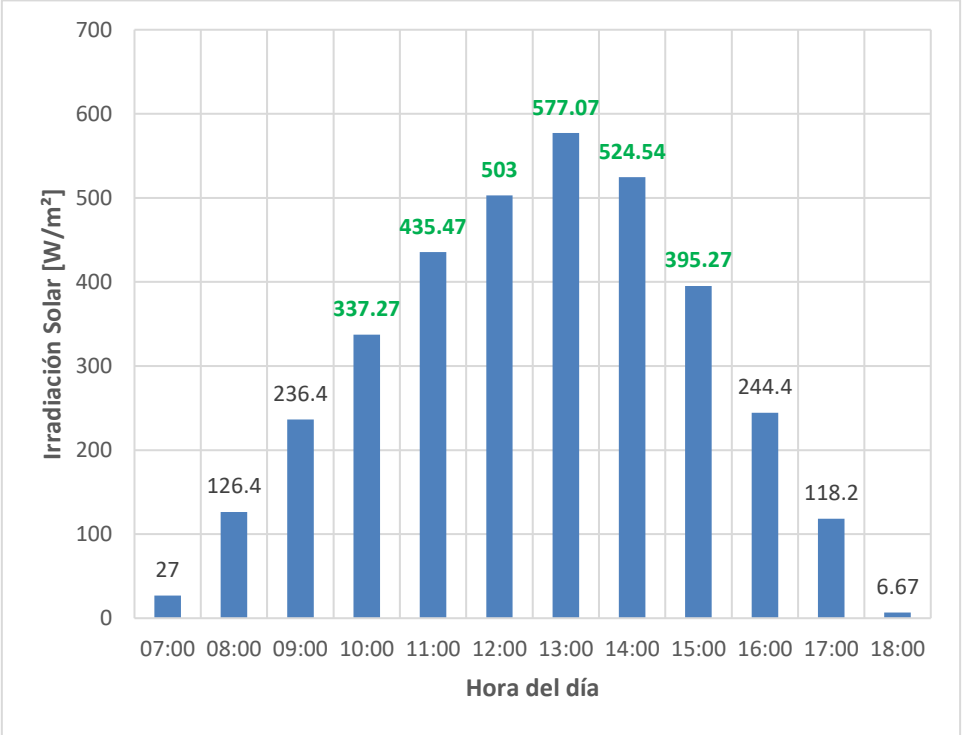
Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025a).

Los valores máximos alcanzados se encuentran en los días 2 y 7, alcanzando un pico de irradiancia aproximado de 960 W/m^2 entre las 12:00 m y la 1:00 pm. Asimismo, el día 14 presentó los valores mínimos de irradiancia, en los que no se alcanzan los 250 W/m^2 en la misma franja de horas, esto, probablemente, debido a presencia de nubosidad que interfiere en la transmisión directa de la luz solar sobre la superficie.

Con el promedio de la radiación obtenida en cada hora de los 15 días evaluados, se obtuvo la tendencia mostrada en la Figura 26, en la que se muestra que en la franja entre las 10:00 am y las 3 pm se alcanzan los valores mayores de irradiancia solar, superando los 350 W/m². Por lo tanto, para el departamento del Putumayo se consideran **5 horas** efectivas de sol, que son las que presentan mayor aprovechamiento del recurso solar.

Figura 26.

Promedio irradiancia por hora

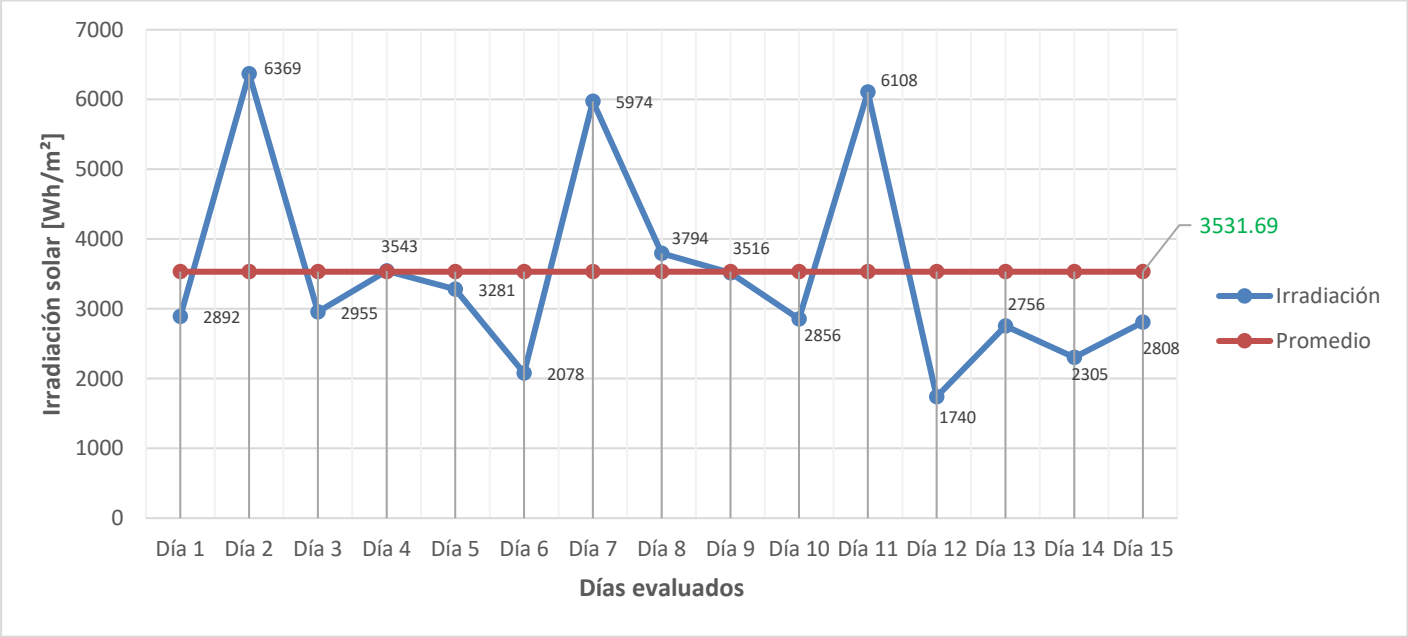


Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025a).

Con la sumatoria de la irradiancia solar de cada uno de los días, se calculó el valor de la Irradiación solar en Wh/m². Dicha sumatoria se observa en la Figura 27, así como el valor promedio obtenido de la muestra realizada, se puede observar que los valores máximos obtenidos alcanzan los 6 kWh/m²/día y el promedio de irradiación del departamento es de aproximadamente 3.5 kWh/m²/día.

Figura 27.

Irradiación solar municipio de Puerto Asís- Muestra de 15 días



Nota: Elaboración propia

a.2 Energía Eólica

Al igual que para la evaluación de la energía solar, se obtuvo la información meteorológica del municipio de Puerto Asís, para extraer los rangos de valores del viento en km/h y la cantidad de días del mes de marzo de 2025 que se presenta cada rango (Tabla 6).

Tabla 6.

Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Asís, Putumayo

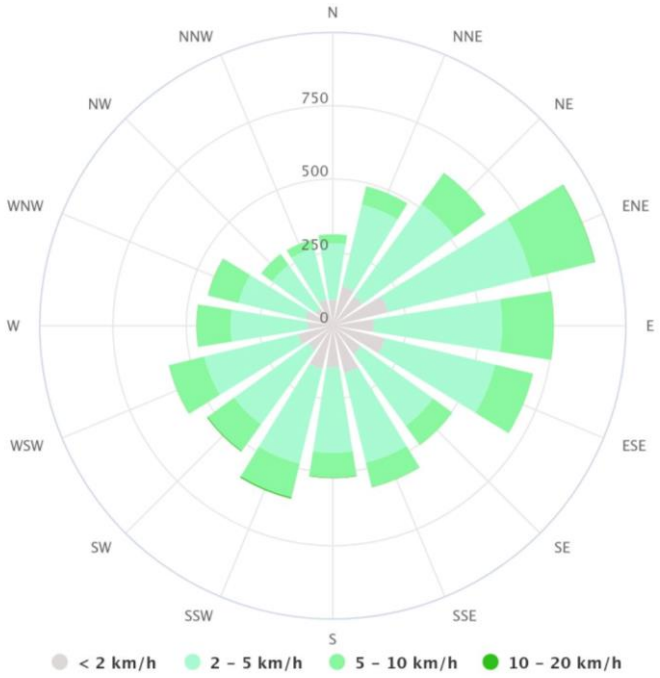
N° de días	Rango de velocidad (km/h)	Velocidad mín. (m/s)	Velocidad máx. (m/s)
2.7	2-5	0.56	1.39
27.5	5-10	1.39	2.78
0.8	10-20	2.78	5.56

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de Meteoblue (2025a).

Así mismo, en la Figura 28 se muestra la rosa de vientos, que indica la dirección del viento y cantidad de días del año en que se presenta cada rango de velocidad.

Figura 28.

Rosa de vientos Puerto Asís, Putumayo



Nota: Tomado de Meteoblue (2025a).

Haciendo uso de la fórmula (1), y considerando *T= 29 °C* y *h=250 m*, se calculó el valor de la densidad del aire este municipio que fue de 1.13 kg/m^3.

Utilizando la fórmula (2), se obtuvieron los valores de la densidad de potencia durante el mes, tomando los valores máximos de cada rango, los cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.

Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Asís, Putumayo

N° de días	Densidad de Potencia (W/m^2)
2.7	1.53
27.5	12.19
0.8	97.47

Nota: Elaboración propia

Realizando el ponderado de la cantidad de días, se determinó que la densidad media de potencia durante el mes de marzo de 2025 es **13.47 W/m^2.**

a.3 Biomasa:

De acuerdo con la información tomada de UPRA (s.f.), se registraron los cultivos del 2020 del departamento de Putumayo y su información asociada, los cuales se muestran en la Tabla 8. Con base en estos datos y con la información de la Tabla 4 y la ecuación (3) se calculó el potencial energético de cada uno de los cultivos en TJ/año.

Tabla 8.

Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Putumayo

Producto	Área sembrada (ha)*	Producción (t/año) *	Cantidad de Residuo (t/año) **	Potencial Energético (TJ/año) **
Arroz	1479	3151.6	8036.58	105.97
Banano	0	0	0.00	0.00
Palma de aceite	12	52.37	100.03	1.72
Café	203	158.6	850.10	15.42
Caña de panela	1429	35130	220616.40	3865.76
Maíz	7279	8494	11976.54	174.34
Plátano	8942	44731	275095.65	2309.95
Total	**19344**	**91717.57**	**516675.29**	**6473.16**

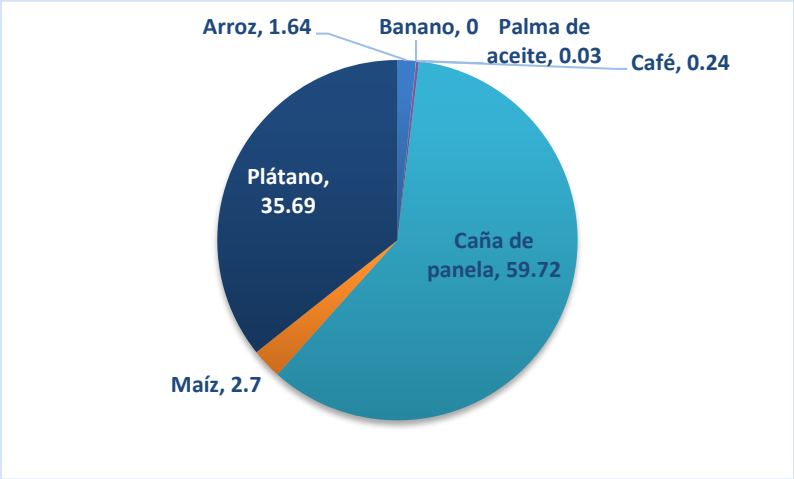
Nota: Elaboración propia. *Datos tomados de UPRA (s.f.). ** Datos calculados.

Basado en lo anterior, se puede afirmar que en el departamento de Putumayo se tiene un potencial energético de **0.3346 TJ/año/ha,** es decir, **33.46 MJ/año/m²** de biomasa residual agrícola**.**

El aporte porcentual del potencial energético de cada cultivo respecto al potencial total de biomasa residual en el departamento se observa en el gráfico de la Figura 29, en el que se evidencia que la caña de azúcar es el cultivo con mayor aporte energético con cerca de un 60% del potencial total en el departamento.

Figura 29.

Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Putumayo [%]



Nota: Elaboración propia

a.4 Energía Hidroeléctrica:

De acuerdo con la información obtenida en UPME y U. Javeriana (2015), (Figura 30), se evidencia que el departamento de Putumayo presenta un potencial de entre 500 y 20.000 kW. De acuerdo con la Figura 24, es posible determinar la cantidad de puntos de máximo aprovechamiento del recurso hídrico en el departamento mediante centrales eléctricas, la cual se encuentra descrita en la Tabla 9.

Figura 30.

Potencial Hidroenergético región Amazonas



Nota: Tomado de UPME y U. Javeriana (2015)

Tabla 9.

Potencial hidroeléctrico- Departamento de Putumayo

Potencial (MW)	Cantidad de puntos	Tipo de Central
0.05	9	Micro
0.5	7	Mini
12 – 15	2	Pequeña
19 – 19.5	1	
19.5 – 20	5	
20 – 50	1	Grande
50 – 100	2	
250 – 500	3	
500 – 1000	2	

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de UPME y U. Javeriana (2015)

Realizando la sumatoria de la capacidad máxima instalada en todo el territorio del departamento, se tiene un total de **3903 MW**.

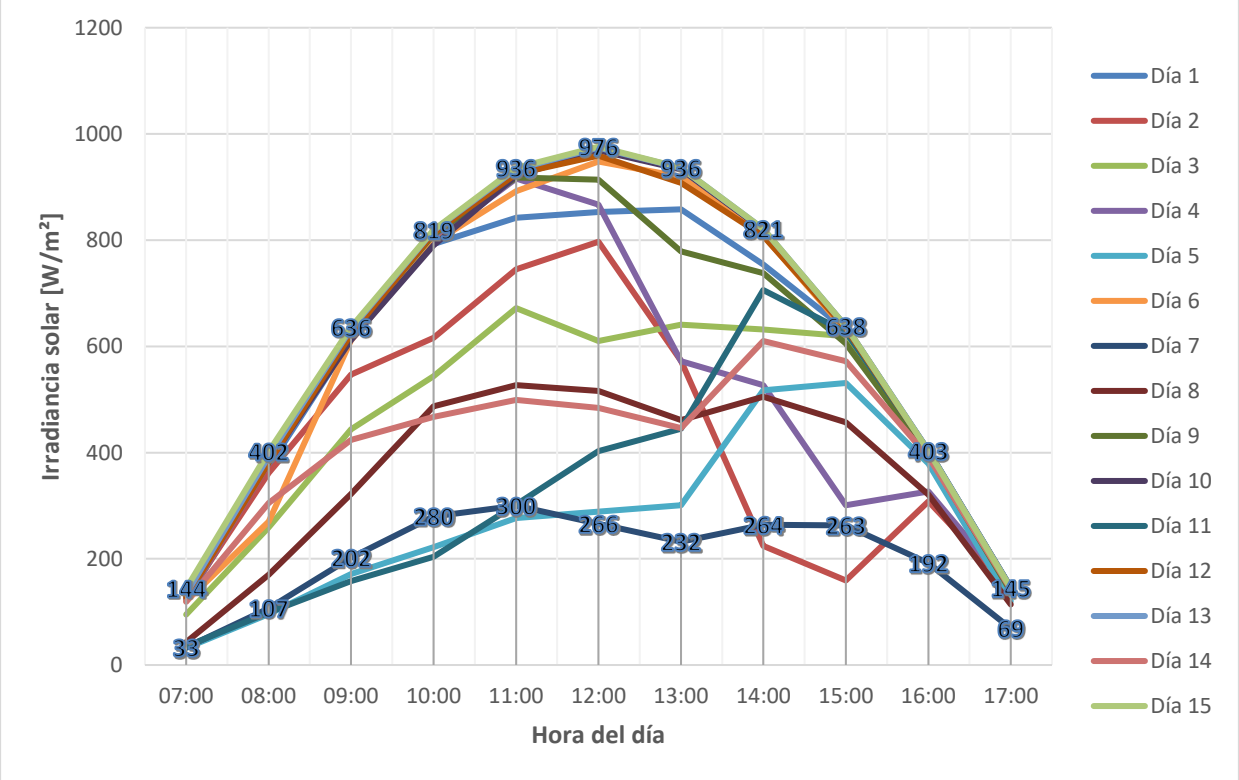
b. La Guajira

b.1 Energía Solar

Se utilizaron los datos de irradiancia solar en W/m^2 del municipio de Uribia, para los días 21 de febrero a 7 de marzo del 2025, entre las 7:00 am y las 5:00 pm, correspondientes a las horas de sol disponibles en el departamento. La Figura 31 muestra el comportamiento de dicha variable para los días evaluados.

Figura 31.

Radiación por hora de sol en W/m² en el municipio de Uribia, La Guajira



Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025b).

Los valores máximos registrados se ubican en los días 10 y 15, alcanzando un pico de irradiancia aproximado de 980 W/m^2 entre las 12:00 m y la 1:00 pm, mientras que el día 7

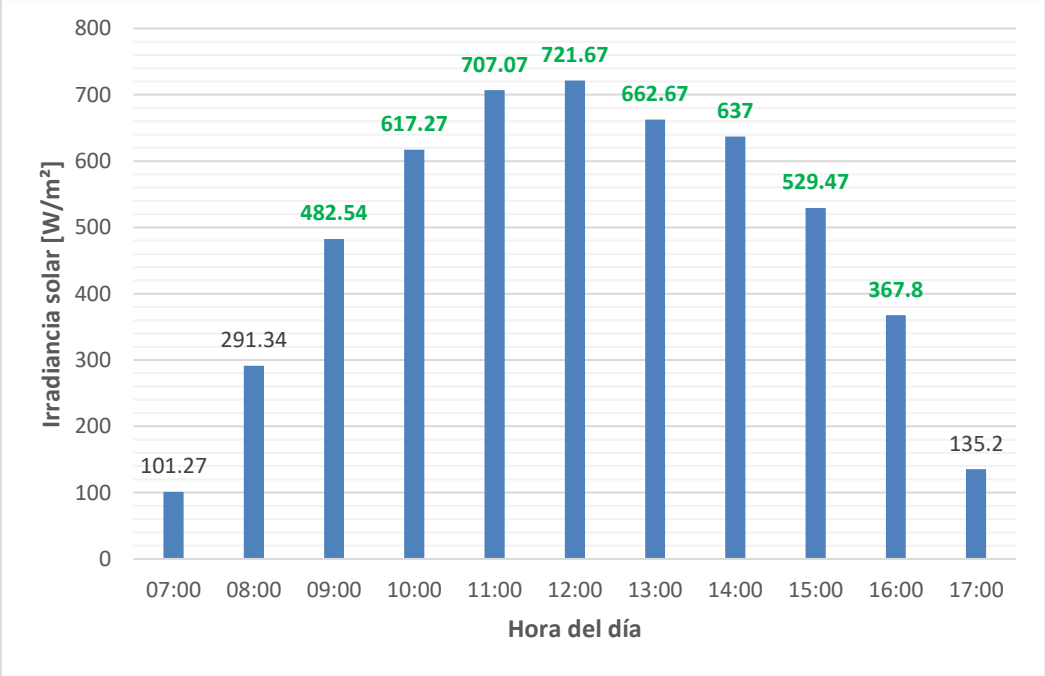
presentó los valores mínimos de irradiancia, en los que se alcanzan como máximo los 300 W/m^2 entre las 10:00 am y las 11:00 am.

En la Figura 32 se puede observar que entre las 9:00 am y las 4 pm se alcanzan los valores mayores de irradiancia solar, superando los 360 W/m^2.

Por lo tanto, para el departamento de La Guajira se consideran **8 horas** efectivas de sol, puesto que son las que presentan mayor aprovechamiento del recurso solar.

Figura 32.

Promedio irradiancia por hora

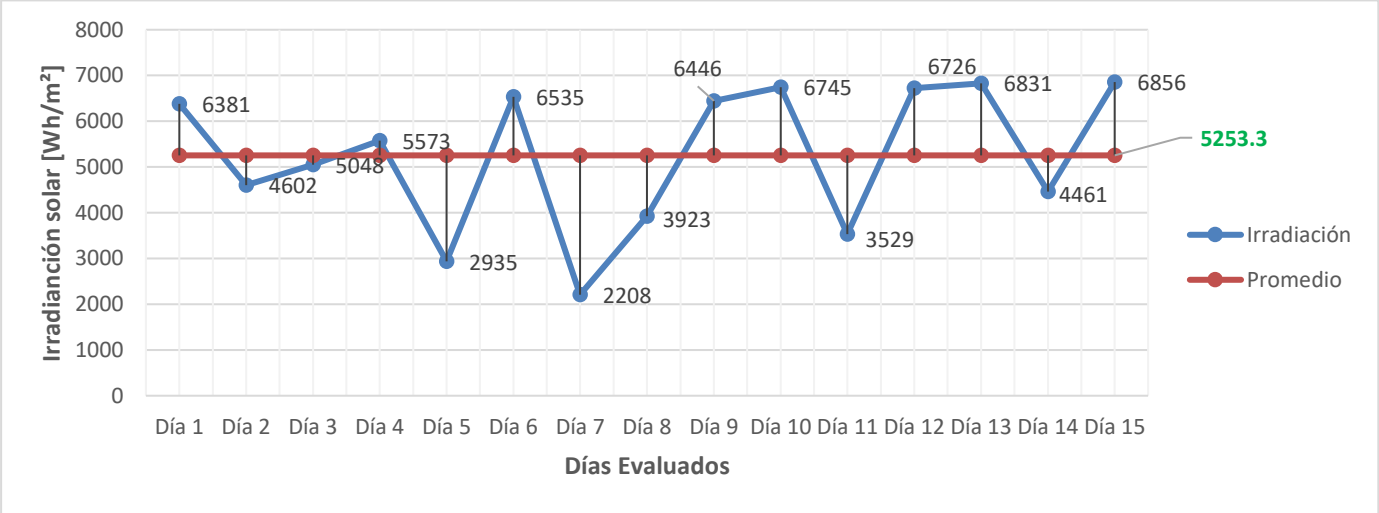


Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025b).

En la Figura 33 se muestra la irradiación solar, los valores máximos obtenidos alcanzan los 6.7 kWh/m^2, mientras que el promedio de irradiación del departamento es de, aproximadamente, 5.3 kWh/m^2.

Figura 33.

Irradiación solar municipio de Uribia- Muestra 15 días



Nota: Elaboración propia

b.2 Energía Eólica

Para el caso del departamento de La Guajira, se obtuvo la información meteorológica del municipio de Uribia, de la cual se extrajeron los rangos de valores del viento en km/h y la cantidad de días del mes de marzo de 2025 que se presenta cada rango (Tabla 10).

Tabla 10.

Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Uribia, La Guajira

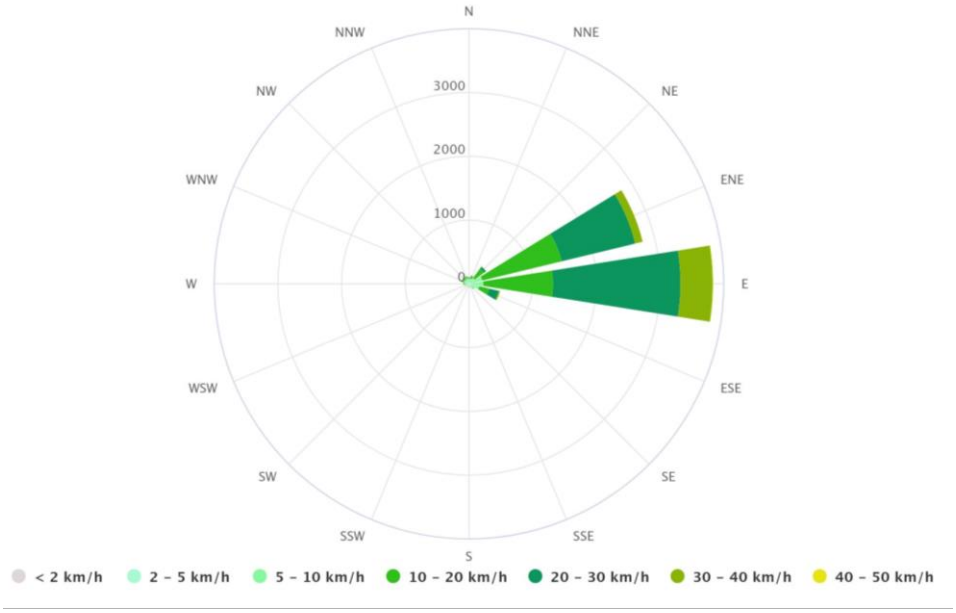
N° de días	Rango de velocidad (km/h)	Velocidad mín. (m/s)	Velocidad máx. (m/s)
2.7	10-20	2.78	5.56
19.5	20-30	5.56	8.34
8.7	30-40	8.34	11.12
0.1	40-50	11.12	13.89

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de Meteoblue (2025b).

Asimismo, en la Figura 34 se muestra la rosa de vientos, que indica la dirección del viento y cantidad de días del año en que se presenta cada rango de velocidad.

Figura 34.

Rosa de vientos Uribia, La Guajira



Nota: Tomado de Meteoblue (2025b).

Utilizando la fórmula (1) y, considerando *T= 27 °C* y *h=22 m*, se calculó el valor de la densidad del aire en el municipio de Uribia.

$$\rho = 1.173\ \frac{kg}{m^3}$$

Con la fórmula (2) se obtuvieron los valores de la densidad de potencia durante el mes, tomando los valores máximos de cada rango (Tabla 11).

Tabla 11.

Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Uribia, La Guajira

N° de días	Densidad de Potencia (W/m^2)
2.7	100.81

N° de días	Densidad de Potencia (W/m^2)
19.5	340.21
8.7	806.42
0.1	1571.64

Nota: Elaboración propia

Calculando el ponderado de la cantidad de días, se obtuvo una densidad media de potencia para el mes de marzo de 2025, de **450 W/m²**.

b.3 Biomasa:

Al igual que en el departamento Putumayo, con base en los datos de los cultivos disponibles en el departamento de La Guajira en el año 2020 se calculó el potencial energético de cada uno de ellos (Tabla 12).

Tabla 12.

Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de La Guajira

Producto	Área sembrada (ha) *	Producción (t/año) *	Cantidad de Residuo (t/año) **	Potencial Energético (TJ/año) **
Arroz	1551	9717	24778.35	326.72
Banano	1472	30884	189936.6	1594.88
Café	3993	3642.5	19523.8	354.22
Caña de panela	76	4920	30897.6	541.40
Maíz	10836	15278	21541.98	313.58
Palma de aceite	1789	6622	12648.02	217.01
Plátano	2256	12815	78812.25	661.78

Total	**21973**	**83878.5**	**378138.6**	**4009.59**

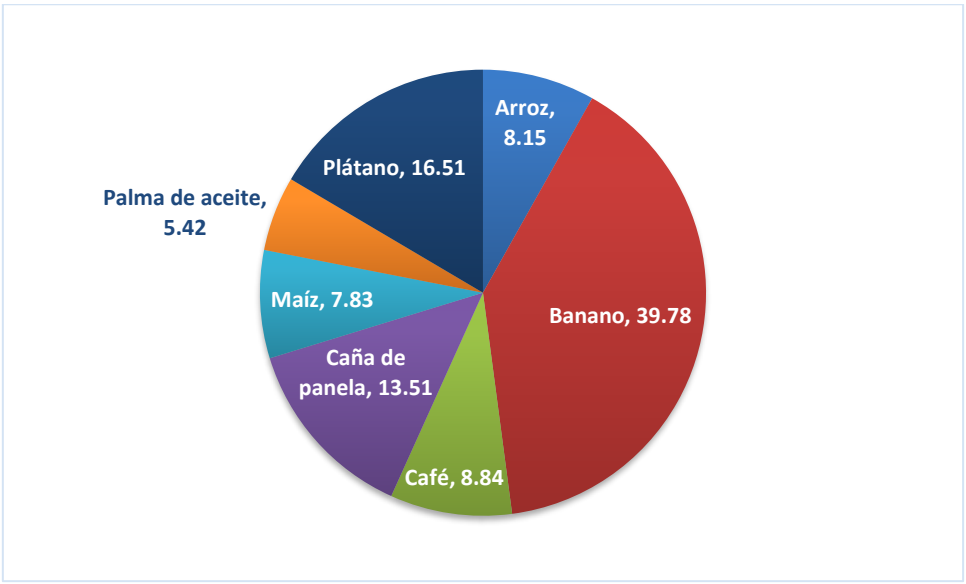
Nota: Elaboración propia. *Datos tomados de UPRA (s.f.) ** Datos calculados.

Por lo tanto, en el departamento de La Guajira se tiene un potencial energético de **0.1824 TJ/año/ha**, es decir, **18.24 MJ/año/m²** de biomasa residual agrícola.

A diferencia del departamento de Putumayo, donde la caña de panela presentó un mayor potencial energético, en La Guajira el cultivo de banano fue el que presentó un mayor aporte energético con cerca de un 40% del potencial total (Figura 35).

Figura 35.

Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de La Guajira [%]



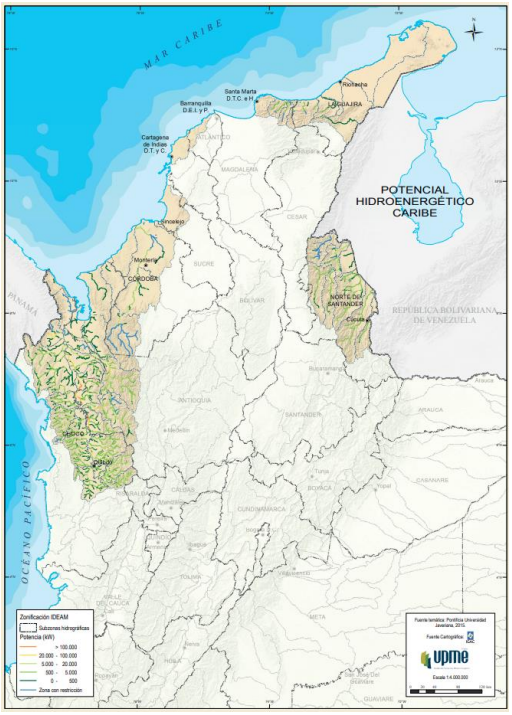
Nota: Elaboración propia

b.4 Energía Hidroeléctrica:

De acuerdo con la información obtenida en UPME y U. Javeriana (2015), (ver Figura 36), se evidencia que el departamento de La Guajira presenta un potencial máximo de 500 kW. Además, con base en la Figura 24, es posible determinar la cantidad de puntos de máximo aprovechamiento del recurso hídrico en el departamento mediante centrales eléctricas, como me menciona en la Tabla 13.

Figura 36.

Potencial Hidroenergético región Caribe



Nota. Tomado de UPME y U. Javeriana (2015).

Tabla 13.

Potencial hidroeléctrico- Departamento de La Guajira

Potencial (MW)	Cantidad de puntos	Tipo de Central
0.5	4	Mini

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de UPME y U. Javeriana (2015).

Realizando la sumatoria de la capacidad máxima instalada en todo el territorio del departamento, se obtuvo un total de **2 MW**.

c. Vaupés

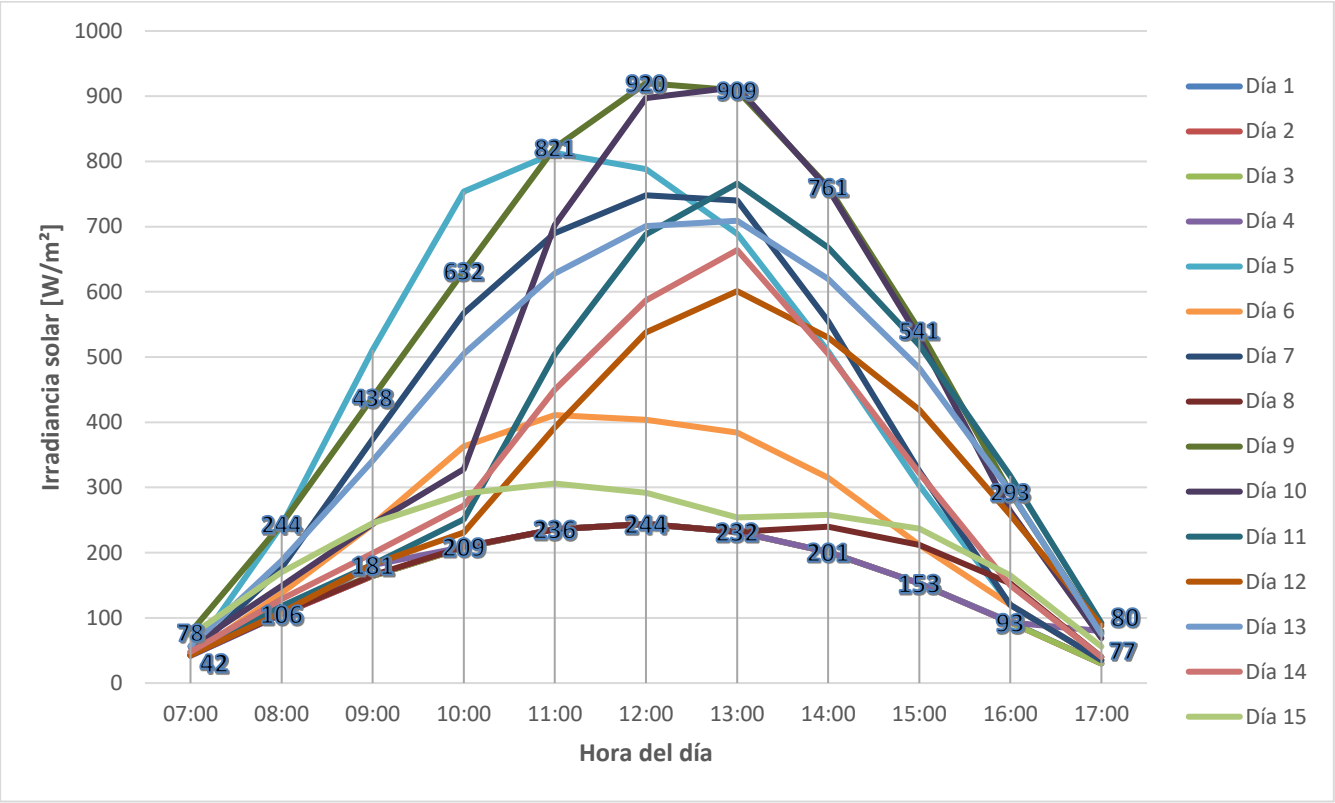
c.1 Energía Solar

Basado en los datos de irradiancia solar en W/m^2 del municipio de Mitú, se extrajo la información para los días 21 de febrero a 7 de marzo del 2025, entre las 7:00 am y las 5:00

pm, las cuales corresponden a las horas de sol disponibles en el departamento. La Figura 37 muestra el comportamiento de dicha variable para los días evaluados.

Figura 37.

Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Mitú, Vaupés



Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025c).

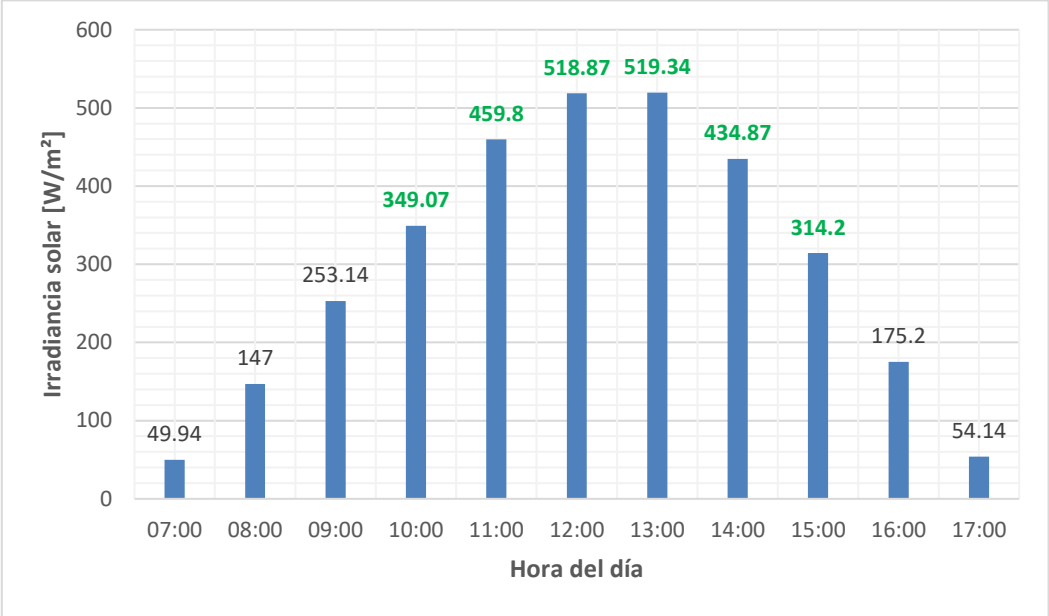
Los valores máximos registrados se ubican en los días 9 y 10, alcanzando un pico de irradiancia aproximado de 920 W/m^2 entre las 12:00 m y la 1:00 pm, mientras que el día 4 presentó los valores mínimos de irradiancia, en los que no se alcanzan los 250 W/m^2 en la misma franja de horas.

En la Figura 38 se observa la tendencia de radiación, en la franja entre las 10:00 am y las 3 pm se alcanzaron los valores mayores de irradiancia solar, superando los 310 W/m².

Por lo tanto, para el departamento del Vaupés se consideran **5 horas** efectivas de sol, puesto que son las que presentan mayor aprovechamiento del recurso solar.

Figura 38.

Promedio irradiancia por hora

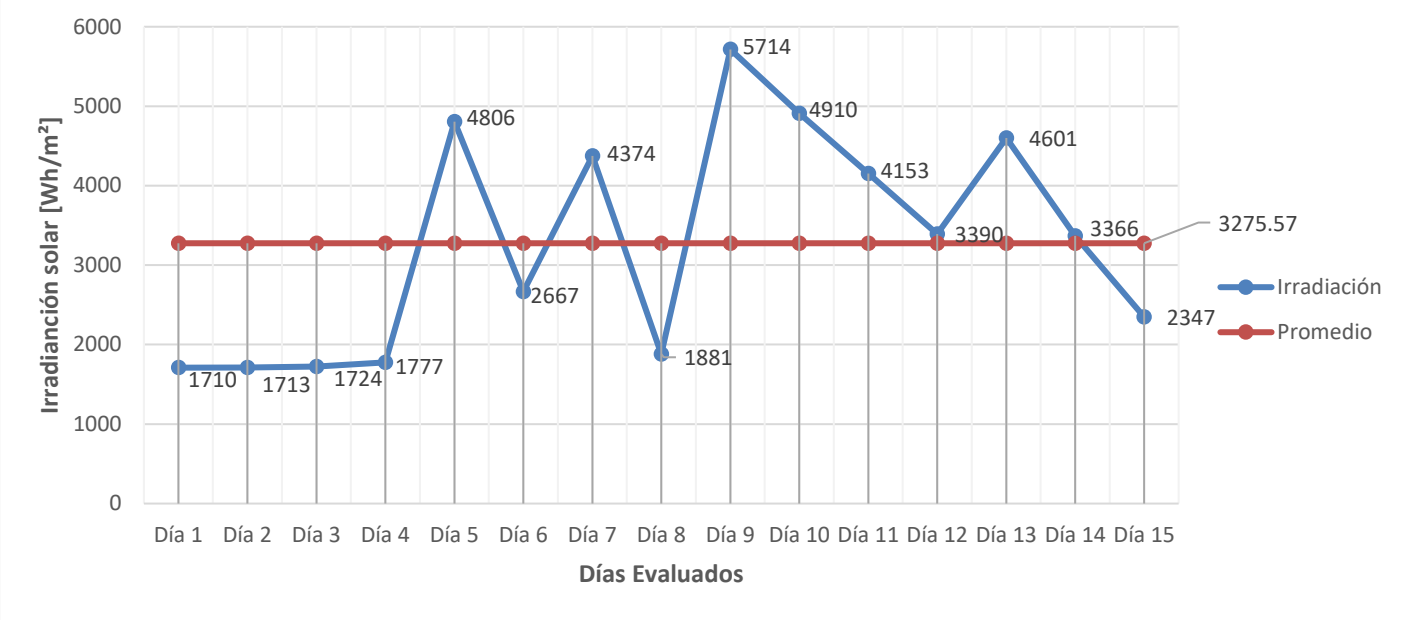


Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025c).

En la Figura 39, se muestra la irradiación solar, los valores máximos obtenidos alcanzan los 5.7 kWh/m² y el promedio de irradiación del departamento es de aproximadamente 3.3 kWh/m².

Figura 39.

Irradiación solar municipio de Mitú- Muestra 15 días



Nota: Elaboración propia

c.2 Energía Eólica

De igual manera que en los departamentos anteriores, se obtuvo la información meteorológica del municipio de Mitú. La Tabla 14 muestra los rangos de velocidad del viento en m/s y la cantidad de días del mes que se presenta cada uno.

Tabla 14.

Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Mitú, Vaupés

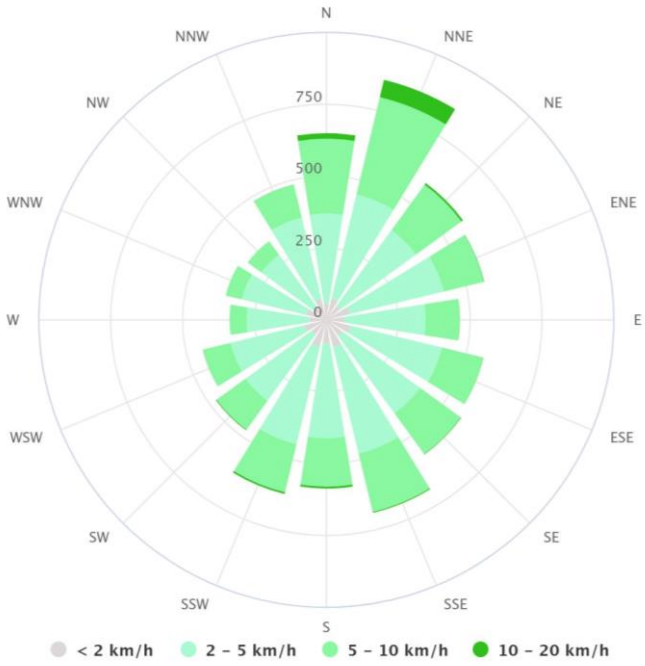
N° de días	Rango de velocidad (km/h)	Velocidad mín. (m/s)	Velocidad máx. (m/s)
1.8	2-5	0.56	1.39
26.6	5-10	1.39	2.78
2.7	10-20	2.78	5.56

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de Meteoblue (2025c).

De igual manera, en la Figura 40, la rosa de vientos indica la dirección del viento y cantidad de días del año en que se presenta cada rango de velocidad.

Figura 40.

Rosa de vientos Mitú, Vaupés



Nota: Tomado de Meteoblue (2025c).

Acorde a la fórmula (1), y considerando *T= 27 °C* y *h=174 m*, se determinó el valor de la densidad del aire en el municipio de Mitú.

$$\rho = 1.15\ \frac{kg}{m^3}$$

Con base en la fórmula (2), se determinaron los valores de la densidad de potencia durante el mes, tomando los valores máximos de cada rango (Tabla 15).

Tabla 15.

Densidad de Potencia máxima vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Mitú, Vaupés

N° de días	Densidad de Potencia (W/m^2)
6.8	1.55
21.2	12.38
3	99.01

Nota: Elaboración propia

Finalmente se calculó la densidad media de potencia durante el mes de marzo de 2025, la cual fue de **19.28 W/m²**.

c.3 Biomasa:

Considerando la información de los cultivos disponibles en el departamento de Vaupés en el año 2020, y a partir de la información de la Tabla 4 y la ecuación (3), se calculó el potencial energético de cada uno de los productos cultivados en TJ/año (Tabla 16).

Tabla 16.

Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Vaupés

Producto	Área sembrada (ha) *	Producción (t/año) *	Cantidad de Residuo (t/año) **	Potencial Energético (TJ/año) **
Arroz	17	40.5	103.275	1.36
Banano	0	0	0	0.00
Café	0	0	0	0.00
Caña de panela	60	2400	15072	264.10
Maíz	162	203	286.23	4.17
Palma de aceite	0	0	0	0.00
Plátano	378	1426	8769.9	73.64

Total	**617**	**4069.5**	**24231.405**	**343.27**

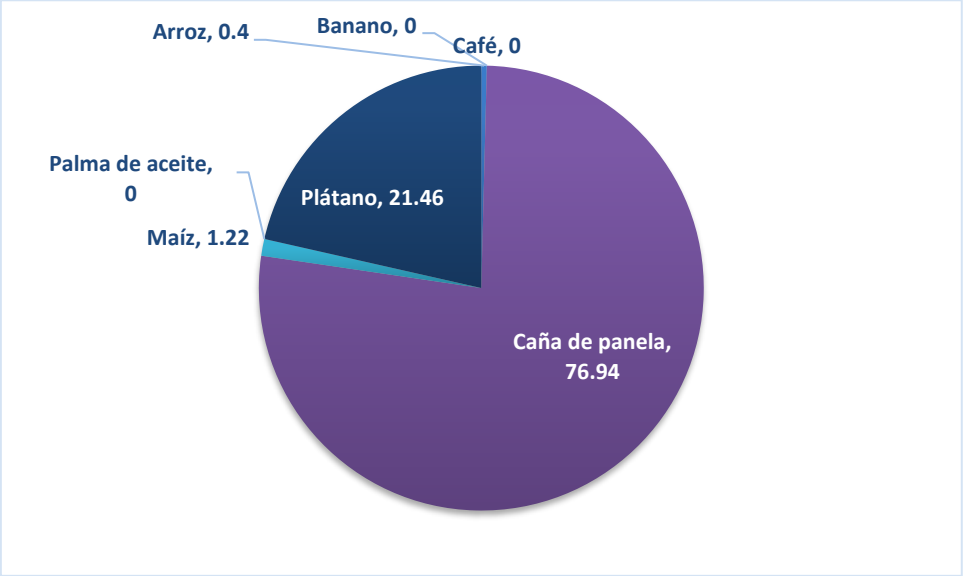
Nota: Elaboración propia. *Datos tomados de UPRA (s.f.). ** Datos calculados.

En este departamento de Vaupés el potencial energético calculado fue de **0.5563TJ/año/ha**, es decir, **55.63 MJ/año/m²** de biomasa residual agrícola**.**

Este departamento presentó un comportamiento igual al del Putumayo, donde el cultivo de la caña de panela presentó el potencial más alto, siendo en este caso el 77% del potencial total en el departamento.

Figura 41.

Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Vaupés [%]



Nota: Elaboración propia

c.4 Energía Hidroeléctrica:

De acuerdo con la información obtenida en UPME y U. Javeriana (2015) (Figura 29), el departamento de Vaupés presenta un potencial de entre 500 y 20.000 kW. La cantidad de puntos de máximo aprovechamiento del recurso hídrico en el departamento mediante centrales eléctricas se describe en la Tabla 17.

Tabla 17.

Potencial hidroeléctrico- Departamento de Vaupés

Potencial (MW)	Cantidad de puntos	Tipo de Central
0.05	8	Micro
0.5	9	Mini
15 - 19	1	Pequeña
19 - 19.5	1	
19.5 - 20	5	
20 - 50	3	Grande
100 - 250	2	
500 - 1000	1	

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de UPME y U. Javeriana (2015).

Realizando la sumatoria de la capacidad máxima instalada en todo el territorio del departamento se tiene un total de **1793 MW**.

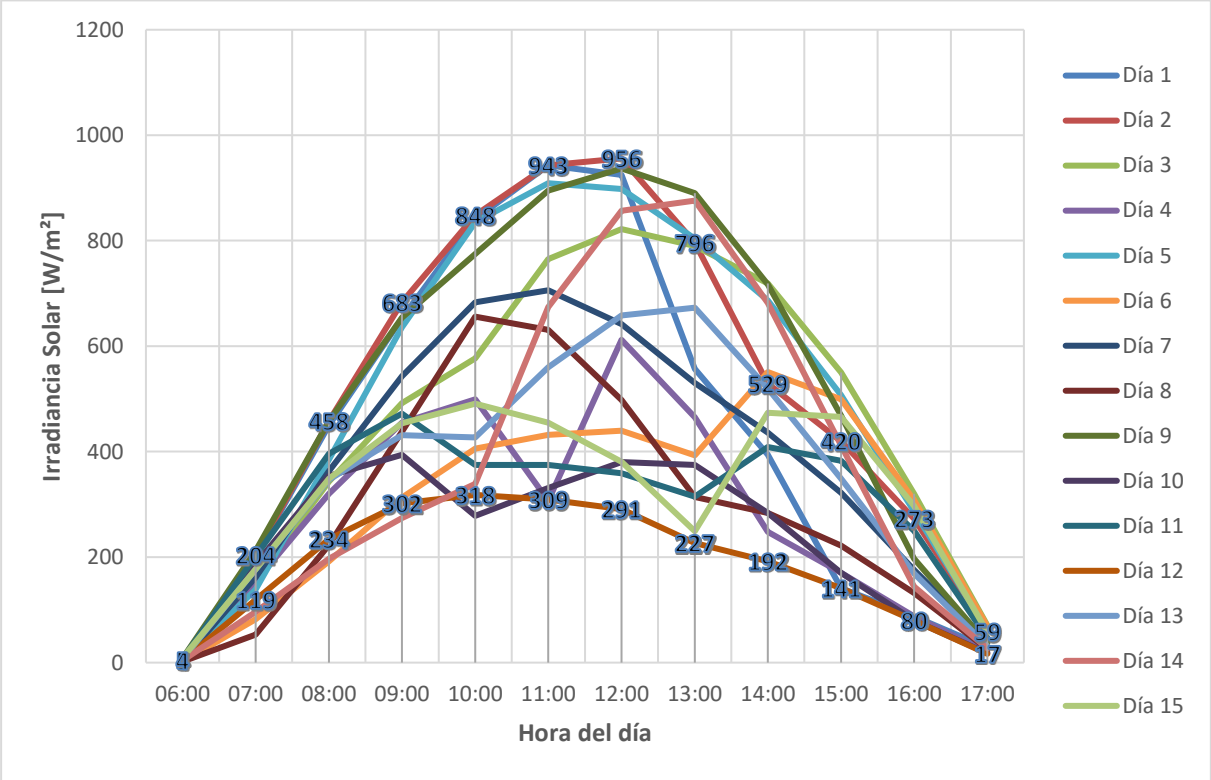
d. Vichada

d.1 Energía Solar

Para el departamento de Vichada, se extrajeron los datos de irradiancia solar en W/m^2 del municipio de Puerto Carreño de los días 21 de febrero a 7 de marzo del 2025 entre las 6:00 am y las 5:00 pm, correspondientes a las horas de sol del departamento. La Figura 42 muestra gráficamente el comportamiento de la variable en los días evaluados.

Figura 42.

Radiación por hora de sol en w/m² en el municipio de Puerto Carreño, Vichada



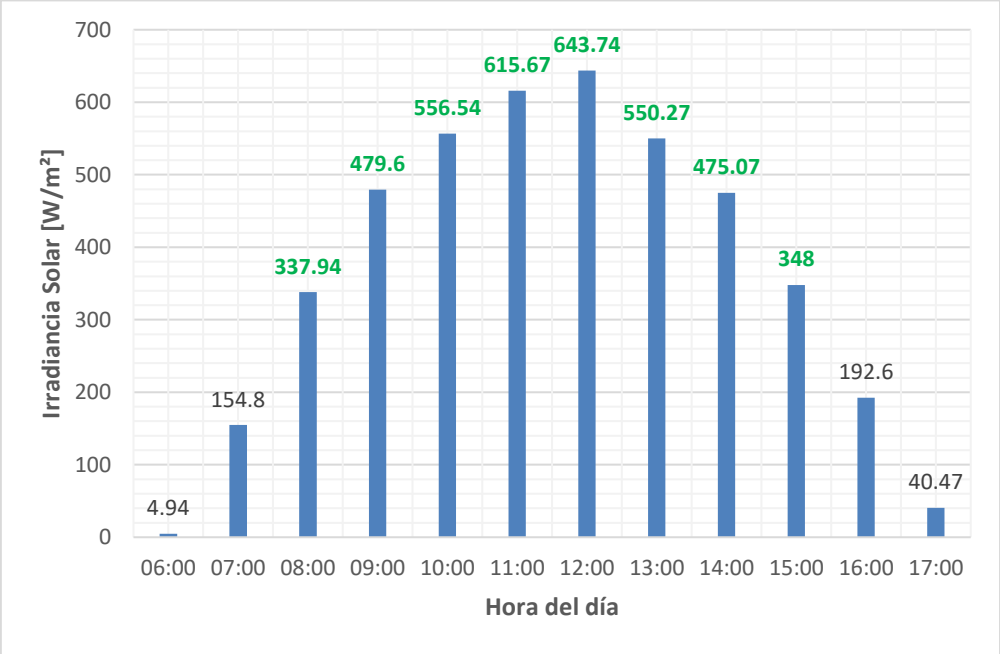
Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025d).

Los valores máximos alcanzados se dieron los días 2 y 9, alcanzando un pico de irradiancia aproximado de 950 W/m^2 entre las 11:00 am y la 12:00 pm. Asimismo, el día 12 presentó los valores mínimos de irradiancia, sin embargo, a diferencia de los demás departamentos, en Vichada se presentaron variaciones en las horas que registraron los picos de irradiancia, ya que en algunos casos se presentaron entre las 10:00 am y las 11:00 am y en otros entre la 1:00 pm y las 2:00 pm.

En la Figura 43 se observa que entre las 8:00 am y las 3 pm se alcanzan los valores mayores de irradiancia solar, superando los 330 W/m². Por lo que, para el departamento del Vichada, se consideran **7 horas** efectivas de sol, puesto que son las que presentan mayor aprovechamiento del recurso solar.

Figura 43.

Promedio irradiancia por hora

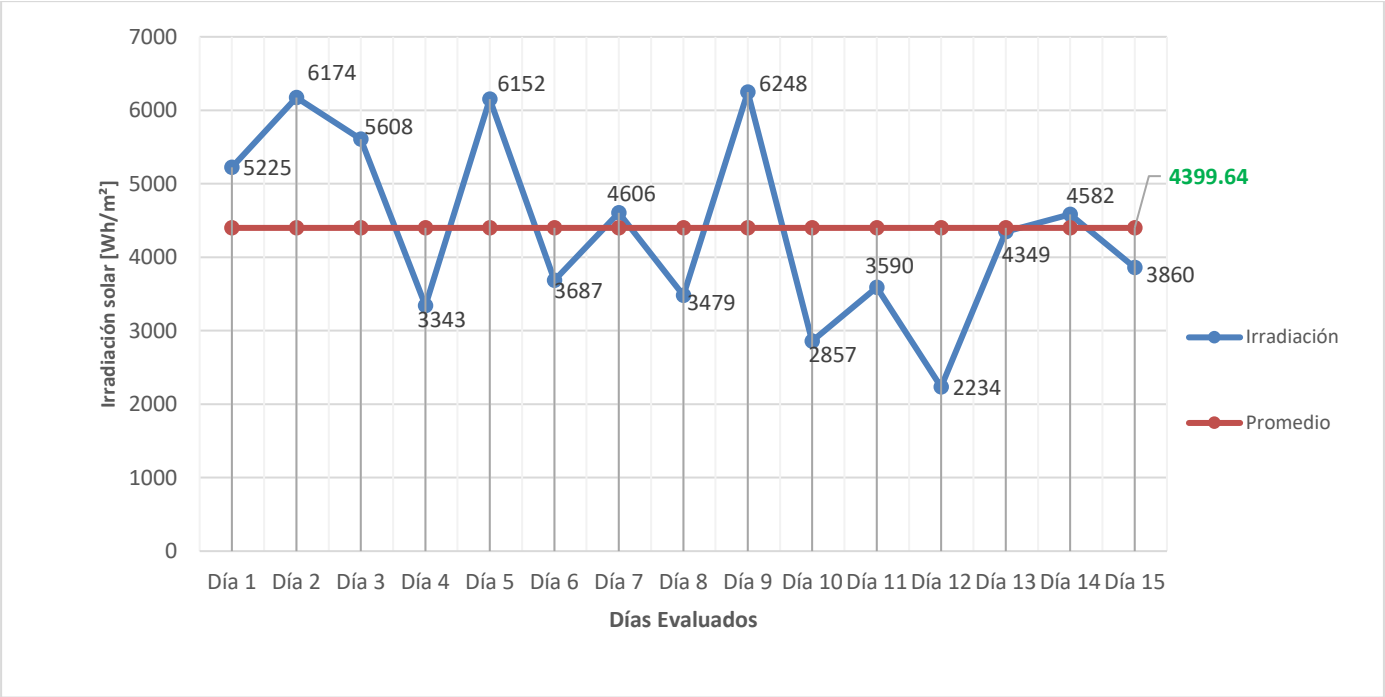


Nota: Elaboración propia, datos tomados de Tu Tiempo (2025d)

En la Figura 44 se observa que el valor máximo obtenido de irradiancia alcanzó los 6.2 kWh/m² y el promedio de irradiación del departamento es de aproximadamente 4.4 kWh/m².

Figura 44.

Irradiación solar municipio de Puerto Carreño- Muestra 15 días



Nota: Elaboración propia

d.2 Energía Eólica

Para este departamento, se obtuvo la información meteorológica del municipio de Puerto Carreño. La Tabla 18 muestra los rangos de velocidad del viento en m/s y la cantidad de días del mes que se presenta cada uno.

Tabla 18.

Rango de Velocidad del viento (km/h) vs Cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Carreño, Vichada

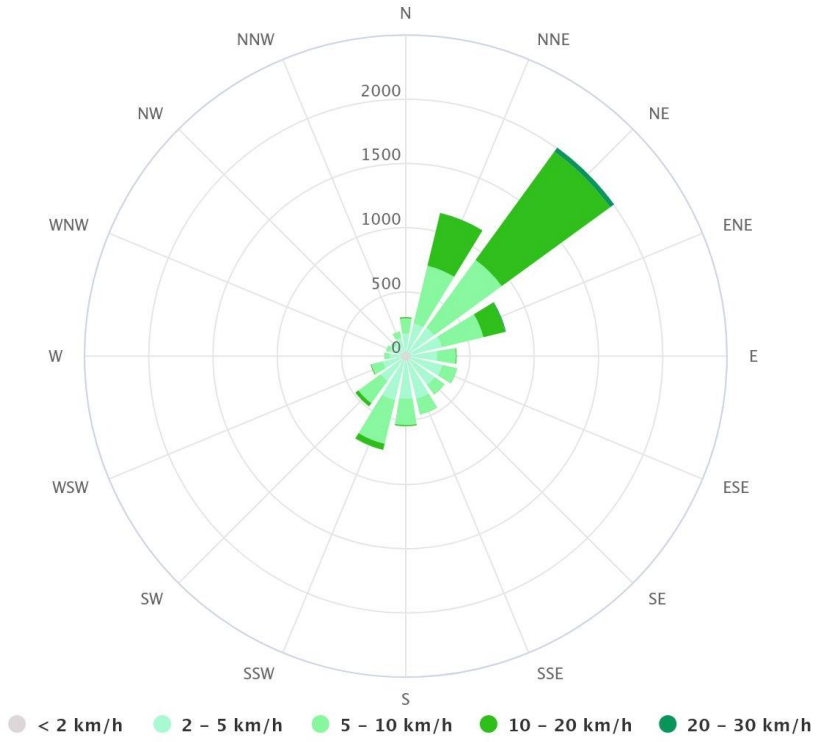
N° de días	Rango de velocidad (km/h)	Velocidad mín. (m/s)	Velocidad máx. (m/s)
6.8	5-10	1.39	2.78
21.2	10-20	2.78	5.56
3	20-30	5.56	8.34

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de Meteoblue (2025d).

En la Figura 45 se muestra la rosa de vientos, que indica la dirección del viento y cantidad de días del año en que se presenta cada rango de velocidad.

Figura 45.

Rosa de vientos Puerto Carreño, Vichada



Nota: Tomado de Meteoblue (2025d).

De acuerdo con la fórmula (1) y, considerando *T= 35 °C* y *h=51 m*, se calculó la densidad del aire en el municipio de Puerto Carreño.

$$\rho = 1.14\ \frac{kg}{m^3}$$

Utilizando la fórmula (2), se determinó la densidad de potencia del mes, tomando los valores máximos de cada rango, con base en la Tabla 19.

Tabla 19.

Densidad de potencia máxima vs cantidad de días del mes de marzo de 2025- Puerto Carreño, Vichada

N° de días	Densidad de Potencia (W/m^2)
6.8	12.24
21.2	97.85
3	330.24

Nota: Elaboración propia

Del mismo modo, la densidad media de potencia calculada para marzo de 2025 es de **101.57 W/m^2**.

d.3 Biomasa:

Con base en el método mencionado previamente en los otros departamentos se calculó el potencial energético de cada uno de los productos cultivados en TJ/año, el cual se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20.

Potencial energético Biomasa Residual del sector Agrícola- Departamento de Vichada

Producto	Área sembrada (ha) *	Producción (t/año) *	Cantidad de Residuo (t/año) **	Potencial Energético (TJ/año) **
Arroz	248	612	1560.60	20.58
Banano	0	0	0.00	0.00
Café	0	0	0.00	0.00
Caña de panela	192	19100	119948.00	2101.79
Maíz	480	815	1149.15	16.73

Producto	Área sembrada (ha) *	Producción (t/año) *	Cantidad de Residuo (t/año) **	Potencial Energético (TJ/año) **
Palma de aceite	8000	28855	55113.05	945.60
Plátano	2321	11407	70153.05	589.07
Total	**11241**	**60789**	**247923.85**	**3673.77**

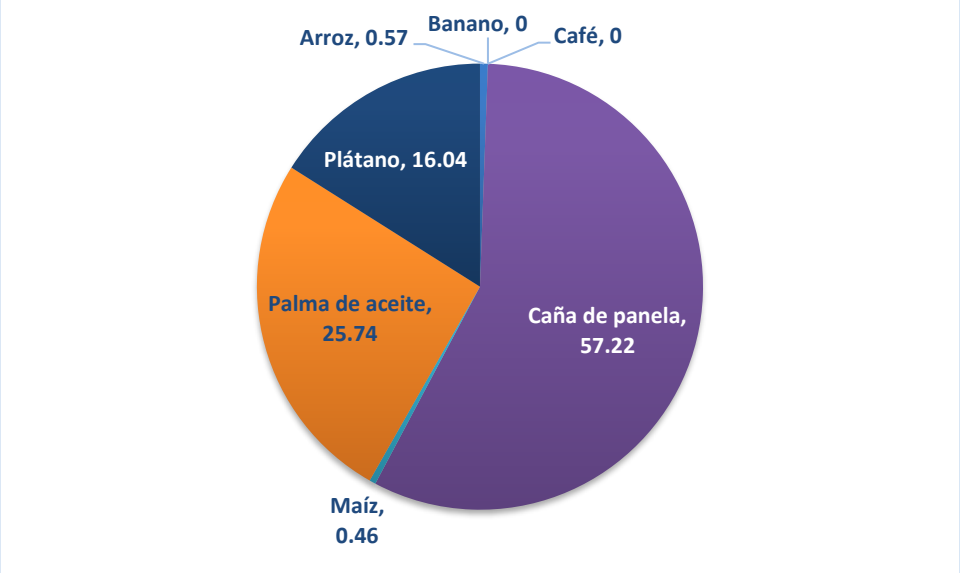
Nota: Elaboración propia. *Datos tomados de UPRA (s.f.). ** Datos calculados.

Por lo tanto, en el departamento de Vichada se tiene un potencial energético de **0.3268 TJ/año/ha**, es decir, **32.68 MJ/año/m²** de biomasa residual agrícola**.**

En la Figura 46 se puede observar que, al igual que en los departamentos de Putumayo y Vaupés, el máximo potencial energético lo presentó el cultivo de la caña de panela, con un 57% del potencial total en el departamento.

Figura 46.

Porcentaje de aporte energético de cada cultivo en el departamento de Vichada [%]



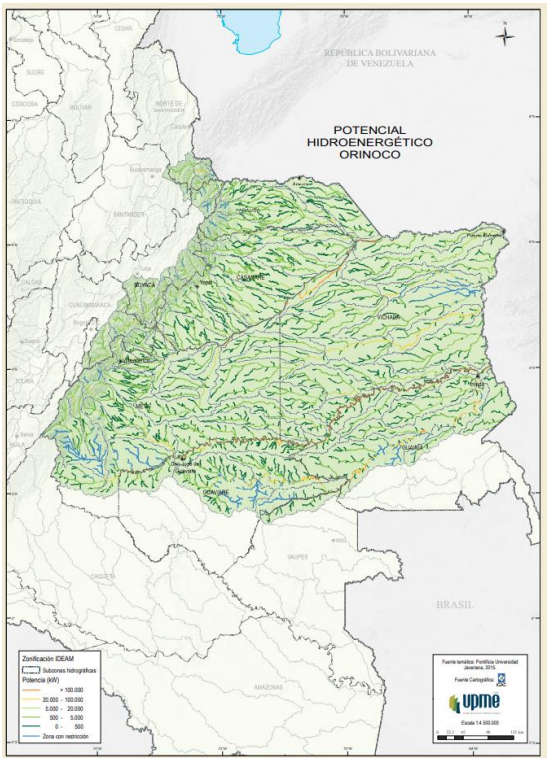
Nota: Elaboración propia

d.4 Energía Hidroeléctrica:

Con base en la información obtenida en UPME y U. Javeriana (2015), se determinó el potencial hidroenergético de la región Orinoco del país (Figura 47). El departamento de Vichada presenta un potencial de entre 500 y 20.000 kW. Además, de acuerdo con la Figura 24, es posible determinar la cantidad de puntos de máximo aprovechamiento del recurso hídrico en el departamento mediante centrales eléctricas, la cual se encuentra descrita en la Tabla 21.

Figura 47.

Potencial Hidroenergético región Orinoco



Nota. Tomado de UPME y U. Javeriana (2015).

Tabla 21.

Potencial hidroeléctrico- Departamento de Vichada

Potencial (MW)	Cantidad de puntos	Tipo de Central
0.05	16	Micro
0.5	17	Mini
15 - 19	5	Pequeña
19.5 - 20	16	Grande
20 - 50	12	
50 - 100	1	
100 - 250	3	
500 - 1000	1	

Nota: Elaboración propia. Datos tomados de UPME y U. Javeriana (2015).

Realizando la sumatoria de la capacidad máxima instalada en todo el territorio del departamento se tiene un total de **2874 MW**.

3.8.4. Evaluación

3.8.4.1. Energía eléctrica generada por FNCER en cada departamento. A partir de los potenciales energéticos obtenidos para cada una de las FNCER en los departamentos, se obtuvo la energía generada por cada una en kWh por año por hectárea en cada departamento (Tablas 22-25).

En los cuatro departamentos la energía solar y eólica presentaron los valores de potencial eléctrico más altos, siendo la primera la que tuvo un aporte mucho mayor respecto a las demás FNCER. Sin embargo, cabe resaltar que, en los departamentos de Putumayo y Vaupés, a pesar de que la energía eólica fue la segunda FNCER con mayor potencial, este valor es muy alto respecto a la energía solar, mientras que, para los departamentos de La Guajira y Vichada este tipo de energía (eólica) sí presentó valores representativos, evidenciado las altas velocidades de los vientos en la zona.

En lo que se refiere a la biomasa, al ser evaluada en términos de su potencial por hectárea, no se registraron valores representativos en comparación con otras FNCER. No obstante, su aprovechamiento no debería considerarse descartado, considerando que dicha biomasa residual agrícola ya se está generando en la cosecha de los cultivos y su potencial calórico puede resultar productivo mediante diferentes estrategias, ya sea para generación de energía eléctrica o térmica.

De igual forma, considerando que el recurso hídrico es aprovechable basado en la caída y la longitud de conducción de cada filo de agua, es posible considerar el aprovechamiento del recurso hídrico en cada departamento, de forma que las poblaciones cercanas a dichos puntos puedan verse beneficiadas mediante la instalación de las centrales hidroeléctricas en los puntos determinados para su mayor aprovechamiento.

Todo lo anterior coincide con las fuentes de energía determinadas por la IPSE en su caracterización energética (Figura 5), en la cual la energía solar es la mayormente utilizada en el planteamiento de proyectos de generación de energía con FNCER en los departamentos evaluados.

Tabla 22.

Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Putumayo

Tipo de FNCER	Potencial energético	Potencial Eléctrico (kW/ha)	Energía eléctrica (kWh/año/ha)	Energía eléctrica (GWh/año/ha)
Solar (Fotovoltaico)	3.5 kWh/m^2/día	303333.33	2657199971	2657.2
Eólico (Aerogeneradores)	13.47 W/m^2	902.78	7908352.8	7.909
Biomasa (Combustión directa)	33.46 MJ/año/m^2	2.38	20848.8	0.0209
Hidroeléctrica	3903.45 MW	1.57	13753.2	0.0138

Nota: Elaboración propia.

Tabla 23.

Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de La Guajira

Tipo de FNCER	Potencial energético	Potencial Eléctrico (kW/ha)	Energía eléctrica (kWh/año/ha)	Energía eléctrica (GWh/año/ha)
Solar (Fotovoltaico)	5.3 kWh/m^2/día	459333.33	4023759971	4023.76
Eólico (Aerogeneradores)	450 W/m^2	30159.67	264198709.2	264.199
Biomasa (Combustión directa)	18.24 MJ/año/m^2	1.3	11388	0.0114
Hidroeléctrica	2 MW	0.00096	8.4096	8.4096E-06

Nota: Elaboración propia.

Tabla 24.

Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Vaupés

Tipo de FNCER	Potencial energético	Potencial Eléctrico (kW/ha)	Energía eléctrica (kWh/año/ha)	Energía eléctrica (GWh/año/ha)
Solar (Fotovoltaico)	3.3 kWh/m^2/día	286000	2505360000	2505.36
Eólico (Aerogeneradores)	19.28 W/m^2	1292.18	11319496.8	11.32
Biomasa (Combustión directa)	55.63 MJ/año/m^2	3.96	34689.6	0.0347
Hidroeléctrica	1793.4 MW	0.332	2908.32	0.00290832

Nota: Elaboración propia.

Tabla 25.

Resultados Potencial Eléctrico de cada FNCER (kWh/año/ha). Departamento de Vichada

Tipo de FNCER	Potencial energético	Potencial Eléctrico (kW/ha)	Energía eléctrica en kWh/año/ha	Energía eléctrica en GWh/año/ha
Solar (Fotovoltaico)	4.4 kWh/m^2/día	381333.33	3340479971	3340.48
Eólico (Aerogeneradores)	101.57 W/m^2	6807.38	59632648.8	59.633
Biomasa (Combustión directa)	32.68 MJ/año/m^2	2.33	20410.8	0.0205
Hidroeléctrica	2874.3 MW	0.287	2514.12	0.00251412

Nota: Elaboración propia.

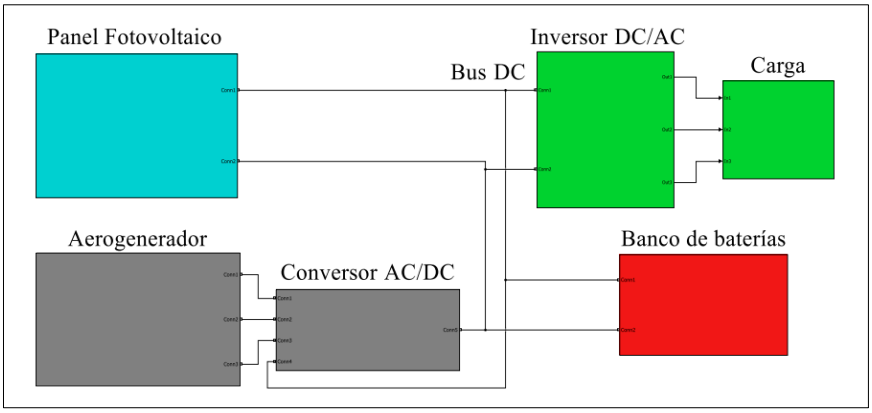
3.8.4.2. Propuesta de generación de energía eléctrica mediante FNCER. Con el fin aprovechar el potencial eléctrico de las FNCER en los departamentos evaluados, es posible considerar la implementación de un sistema híbrido en el que participen ambas fuentes de energía mediante su método de generación propio (fotovoltaico mediante paneles solares y eólico mediante aerogeneradores) en el suministro de una carga en común. Para esto, deben contemplarse las diferentes características de cada tipo de FNCER y cómo se podría garantizar el suministro de energía eléctrica hacia la carga.

Ya que el recurso solar depende de las horas de sol efectivas en cada lugar, y que la velocidad del viento depende también de las condiciones meteorológicas, ambos tipos de energía requieren de un sistema de **baterías** que permita el almacenamiento de energía aun cuando el recurso no esté inmediatamente disponible. Por otro lado, teniendo en cuenta que dichas baterías almacenan energía en corriente directa, y que los aerogeneradores entregan energía en corriente alterna, sería necesaria la **conversión AC/DC** para que pueda ser almacenada correctamente. Puesto que en Colombia el suministro eléctrico es de 110-120 VAC/ 60Hz, es requerida la incorporación de un sistema **inversor** que permita la conversión

de la energía eléctrica almacenada de ambas FNCER a corriente alterna. La Figura 48 muestra un diagrama de bloques de un sistema híbrido que incorpora las energías Solar y Eólica para el suministro eléctrico de una carga. El dimensionamiento específico del sistema dependerá del consumo de potencia estudiado para la carga, el cual puede considerar la energía requerida para una población específica de cada departamento o un suministro específico en cada uno de estos.

Figura 48.

Diagrama de bloques. Sistema híbrido de generación de energía Solar-Eólico



Nota. Tomado de Farez y Chicaiza (2024).

3.8.5. Discusión

Al compararse el potencial energético obtenido de cada FNCER en los departamentos evaluados con las referencias del territorio colombiano (mapas de densidad energética) es posible notar que: la energía solar presenta un potencial similar al presentado por IDEAM (2025), ya que en departamentos como La Guajira se registró un potencial de aproximadamente 5.3kWh/m^2, mientras que Vaupés fue de 3.3 kWh/m^2, siendo este valor más bajo al rango previamente asignado para este departamento (4.0 y 4.5 kWh/m^2). Por otro lado, el departamento de Putumayo presenta un potencial que coincide por el determinado por el IDEAM con cerca de 3.5 kWh/m^2 y Vichada presenta un valor más bajo con 4.4 kWh/m^2 en comparación al rango asignado entre 5.0 y 5.5 kWh/m^2.

Respecto al potencial de la energía eólica, este presentó comportamientos equivalentes a los mostrados por IDEAM (2025), ya que los departamentos Putumayo y Vaupés presentan la menor densidad de potencia con cerca de 13 W/m^2 y 19 Wh/m^2, respectivamente, lo cual coincide con lo mostrado en la Figura 20, puesto que estos presentan un rango de densidad de potencia entre 8 y 64 W/m^2. Así mismo, el departamento de Vichada presenta el mismo comportamiento presentando un potencial de aproximadamente 102 W/m^2 y La Guajira que posee el mayor potencial eólico de los cuatro departamentos, cumple con el rango definido entre 343 y 512 W/m^2, puesto que se obtuvo una densidad de potencia de 450 W/m^2.

Para la biomasa residual agrícola el potencial del departamento de Putumayo aumentó aproximadamente 9 veces con un potencial de 6500 TJ/año frente a 780 TJ/año que se tenía reportado. En el caso de La Guajira, este potencial aumentó cerca de 6 (4000 TJ/año frente a 670 TJ/año). Por otro lado, el potencial energético de biomasa residual agrícola aumentó 23 veces en el departamento de Vaupés y 72 veces en Vichada (343 TJ/año y 3700 TJ/año, frente a 15 TJ/año y 51 TJ/año, respectivamente). Esto se debe a que el rendimiento de cada cultivo presentó un gran aumento en el año 2020 respecto a los cultivos evaluados en el año 2009 en que se realizó el estudio de comparación. Adicionalmente, se debe a que algunos cultivos que no se encontraban plantados para el año 2009 ya presentaban producción en el año 2020.

- ***Discusión de la Hipótesis:***

La hipótesis de este trabajo plantea que *la energía solar, la energía eólica y la energía de biomasa tienen un mayor potencial de aprovechamiento en Colombia, lo que permitirá incrementar la cobertura de energía eléctrica en cuatro sectores con baja cobertura del país*. Los resultados obtenidos respaldan esta afirmación en gran medida, especialmente en lo que respecta a la energía solar y eólica.

En los cuatro departamentos analizados -Putumayo, La Guajira, Vaupés y Vichada-, la energía solar presentó consistentemente el mayor potencial eléctrico por hectárea, lo cual se

atribuye a la ubicación geográfica del país sobre la línea ecuatorial, que garantiza altos niveles de irradiancia solar durante todo el año. La energía eólica también mostró valores significativos, particularmente en La Guajira, donde las condiciones de viento son más favorables.

Respecto a la biomasa, aunque su potencial eléctrico fue menor en comparación con las fuentes solar y eólica, los resultados indican que su potencial calórico es considerable y puede ser aprovechado tanto para generación eléctrica como para aplicaciones térmicas. Esto refuerza la hipótesis en cuanto a su valor como fuente complementaria, especialmente en zonas agrícolas con disponibilidad de residuos orgánicos.

- ***Discusión de la Pregunta de Investigación:***

La pregunta de investigación planteada en este trabajo fue: *¿Cuáles son las dos fuentes de energía renovable que presentan mayor potencial en cada una de las ZNI seleccionadas para la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica?* A partir del análisis realizado en los departamentos de Putumayo, La Guajira, Vaupés y Vichada, los resultados permiten responder a esta interrogante. En todos los casos, la energía solar se posicionó como la fuente con mayor potencial eléctrico. La segunda fuente con mayor potencial varió ligeramente según el departamento, pero en general fue la energía eólica, especialmente destacada en La Guajira, donde las condiciones de viento son óptimas para la instalación de aerogeneradores.

En departamentos como Vaupés y Putumayo, aunque la energía eólica mostró un potencial menor en comparación con La Guajira, aún superó a otras fuentes como la hidroeléctrica y la biomasa en términos de generación eléctrica por hectárea. No obstante, la biomasa se identificó como una fuente complementaria relevante, con un potencial calórico considerable que podría aprovecharse en aplicaciones térmicas o en sistemas híbridos.

- ***Discusión con otros trabajos:***

Realizando una comparación con tres estudios relevantes que abordan la temática desde distintas perspectivas, se encontró lo siguiente:

El estudio de Mora y Quicaza (2021) se enfoca en las barreras estructurales, sociales y económicas que dificultan el acceso a la energía en las ZNI. A diferencia del enfoque técnico del presente trabajo, que cuantifica el potencial energético por fuente y por departamento, Mora y Quicaza proponen estrategias de implementación basadas en la caracterización territorial, la participación comunitaria y la necesidad de políticas públicas adaptadas. Ambos estudios coinciden en la importancia de las FNCER, especialmente la solar y la eólica, pero difieren en su aproximación: uno desde el potencial físico, el otro desde la viabilidad social y política.

Por otro lado, el trabajo de Roa y Gómez (2019) introduce un análisis técnico-económico aplicado a una comunidad específica (Puerto Carreño, Vichada), evaluando la viabilidad financiera de proyectos solares, eólicos y de biomasa. Su propuesta de sistemas híbridos, como la combinación fotovoltaica-biomasa, coincide con las recomendaciones del presente estudio sobre la complementariedad entre fuentes. Además, destacan la necesidad de financiamiento público-privado y tarifas ajustadas a la capacidad de pago local, aspectos que complementan el análisis técnico realizado en este trabajo.

Finalmente, el estudio de Pino (2021) se centra exclusivamente en la biomasa residual, aportando una caracterización detallada por tipo de cultivo (café, caña de azúcar, caña panelera, plátano y arroz). Su análisis del poder calorífico, contenido de humedad y composición elemental permite identificar cultivos con mayor potencial energético, como la caña de azúcar. Esta información complementa el enfoque territorial del presente trabajo, que presenta valores calóricos promedio por departamento, sin desagregación por cultivo. Pino

también sugiere futuras líneas de investigación orientadas a la validación experimental y a la evaluación técnico-económica de proyectos de cogeneración.

4. Conclusiones y recomendaciones

- Basado en el índice de cobertura de energía eléctrica, se identificaron y seleccionaron varios sectores pertenecientes a las Zonas No Interconectadas (ZNI) del territorio colombiano, elegidos a partir del ICEE y la densidad poblacional. Los sectores seleccionados fueron los departamentos de Putumayo, La Guajira, Vaupés y Vichada, ubicados en diferentes posiciones geográficas del territorio colombiano.
- Se realizó la identificación y evaluación de las diferentes Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) disponibles en cada departamento, mediante el cálculo y obtención del potencial energético y eléctrico de cada una. Dicho potencial presentó una relación directa con las condiciones meteorológicas, climáticas y geográficas de cada departamento.
- Se observó que, en los departamentos elegidos, la energía solar presentó el mayor potencial energético debido a la ubicación geográfica del país, que al situarse sobre la línea del ecuador presenta una mayor irradiancia solar y más horas de sol disponibles, en comparación con países ubicados en el hemisferio norte y sur, cuyas horas de sol varían con las estaciones del año.
- En todos los casos, las FNCER solar (mediante paneles fotovoltaicos) y eólica (mediante aerogeneradores) presentaron mayor potencial eléctrico por año y por hectárea en comparación con la biomasa y la hidroeléctrica. Sin embargo, es importante resaltar que en este trabajo se observó el potencial obtenido por unidad de área (hectárea) y en las dos primeras dicho potencial es directamente proporcional al área de instalación.
- La biomasa no debería descartarse en este estudio ni considerarse como una FNCER con potencial insuficiente para su aprovechamiento, puesto que el potencial calórico de los cultivos ya plantados en cada departamento puede ser fructífero tanto para la

generación de energía eléctrica como para su uso como recurso térmico en diferentes aplicaciones.

- Teniendo en cuenta que la disponibilidad del recurso hídrico en cada departamento está distribuida por todo su territorio (excepto en el departamento de La Guajira, que presenta escasez del recurso), es necesario considerar puntos estratégicos para el establecimiento de centrales hidroeléctricas. Estas deben no solo tener en cuenta su capacidad, sino también las necesidades y la demanda que deben satisfacer, con el fin de optimizar su aprovechamiento.
- En todos los casos se recomienda evaluar la posibilidad de implementar generación de energía híbrida con el fin de aprovechar las diferentes condiciones climáticas dadas en cada departamento, garantizando el almacenamiento apropiado para suplir la demanda energética de su instalación y usuarios finales.
- Puesto que este trabajo se enfoca únicamente en el potencial de las FNCER, en futuros estudios relacionados con la generación de energía eléctrica a partir de estas fuentes, se deben considerar otros aspectos como los costos, el impacto ambiental, entre otros, para determinar la factibilidad de su instalación.

5. Referencias

Banrep. (2022). *División Política Administrativa de Colombia*. https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-145/division-politica-administrativa-de-colombia

Cancillería. (s. f.). *Información general*. Consulado de Colombia en Londres. https://londres.consulado.gov.co/viajar/informacion#:~:text=Colombia%20est%C3%A1%20ubicada%20en%20el,los%20oc%C3%A9anos%20Atl%C3%A1ntico%20y%20Pac%C3%ADfico.

Castillo, J., & Romero, R. (2023). *Diseño de un sistema de energía solar fotovoltaico para la reducción de la huella de carbono, en la generación eléctrica de Zonas No Interconectadas. Caso de estudio Bocas del Pauto Casanare* [Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás]. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/49529

Colombia-Sa. (2024). *Vichada-Colombia*. https://www.colombia-sa.com/departamentos/vichada/vichada.html

Datos Abiertos. (s. f.). *Datos Abiertos de Colombia-Minas y Energía*. https://www.datos.gov.co/browse?limitTo=datasets&sortBy=relevance&pageSize=20&category=Minas+y+Energ%C3%ADa&q=fuente

Davies, L., & Saygin, D. (2023). *Energía renovable distribuida en Colombia*. OECD. https://doi.org/10.1787/58322dd6-es

Dávila-Rueda, E. A. (2022). *Factores que afectan la supervivencia de los proyectos de energía eléctrica en las zonas no interconectadas: Lecciones para Colombia de la experiencia internacional* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81275/1026262330.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Farez, D., & Chicaiza, E. (2024). *Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico fotovoltaico para el abastecimiento energético* [Tesis de pregrado, Ingeniería en electricidad, Universidad Técnica de Cotopaxi]. https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/614e2594-cc76-4945-b948-d2aabbce3578/content

Fernández-Barón, J. A. (2019). *Evaluación del impacto económico y social de la electrificación en zonas no interconectadas (ZNI) de áreas rurales en Colombia* [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/15902

Grupo de investigación Xué. (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la Región Central*. https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf

Gutiérrez, A. S., Eras, J. J. C., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal Of Cleaner Production, 269*, 122317. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317.

IDEAM. (2025). *Visualizador IDEAM-Clima Potencial Energético*. https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/maps-gallery/search-by-group/22258778

Intégrame. (2024). *Cobertura de Energía Eléctrica – ICEE Actual*. http://www.integrame.gov.co

IPSE. (2023a). *Boletín de Datos IPSE 2023*. https://ipse.gov.co/wp-content/uploads/2023/01/Boletin%20Datos%20IPSE%2031%20Enero%202023.pdf

IPSE. (2023b). 946 familias en Zonas No Interconectadas acceden a la energía en el mes de agosto. *IPSE*. https://ipse.gov.co/blog/2023/09/29/946-familias-en-zonas-no-interconectadas-acceden-a-la-energia-en-el-mes-de-agosto/

IPSE. (2024). *Caracterización Energética de las ZNI*. https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/

La Guajira. (8 de junio de 2025). En *Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=La_Guajira&oldid=167851342

Lizarazo-Sandoval, C. J., & Martínez-Rojas, D. G. (2023). *Metodología para determinar el potencial de reemplazo de combustible diésel por hidrógeno verde en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia.* [Tesis de maestría, Universidad del Rosario]. https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/c4fccf52-ce8b-47e9-8406-ba25e32871fa/content

Londoño, C. (2022). *Sostenibilidad en los proyectos de energías renovables no convencionales (FNCER).* SER Colombia. https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2022/12/Whitepaper-Final-Sostenibilidad.pdf

Meteoblue. (2025a). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puerto Asís.* https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/puerto-as%c3%ads_colombia_3671549

Meteoblue. (2025b). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Uribia.* https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/uribia_colombia_3666409

Meteoblue. (2025c). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Mitú.* https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/mit%c3%ba_colombia_3674676

Meteoblue. (2025d). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puerto Carreño.* https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/puerto-carre%c3%b1o_colombia_3671519

MinEnergía. (2023a). *Comunidades Energéticas*. https://www.minenergia.gov.co/es/comunidades-energeticas/

MinEnergía. (2023b). *En ZNI del Pacífico colombiano, en Comunidades Energéticas, se implementará un sistema innovador híbrido solar-diésel inaugurado por Minenergía y FENOGE*. https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/en-zni-del-pac%C3%ADfico-colombiano-en-comunidades-energ%C3%A9ticas-se-implementar%C3%A1-un-sistema-innovador-h%C3%ADbrido-solar-di%C3%A9sel-inaugurado-por-minenerg%C3%ADa-y-fenoge/

MinEnergía. (2024). *Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER*. https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/

Mora-Puentes, S., & Quicaza-Duque, A. H. (2021). *Formulación de estrategias para la implementación y fomento de fuentes no convencionales de energías renovables en Zonas No Interconectadas de Colombia* [Tesis de Especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b74a6e3-a410-4e6e-ac96-a7e7a30463a5/content

Muñoz-Arias, C., Villamil-Villar, B., Restrepo-Álvarez, A., & Bolívar-Chaves, O. (2021). Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas. *Revista UIS Ingenierías*, *21*(1). https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022002

Muñoz-Sarria, F., & Bueno-López, M. (2022). Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural. *Revista UIS Ingenierías*, *21*(3). https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022008

Neira, C., & Quiroga, E. (2021). *Sistema solar fotovoltaico para Zonas No Interconectadas en San Vicente del Caguán - Caquetá* [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/items/24a4cb06-4924-46b1-af1f-4c3460eea570

Oñate, B. (2020). *Estimación de la producción de energía eléctrica en base a la velocidad de viento registrado en la estación meteorológica ubicada en el campus sur de la Sede Quito de la Universidad Politécnica Salesiana* [Tesis de Pregrado, Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18563/1/UPS%20-%20ST004492.pdf

Pino, D. (2021). *Potencial energético de la biomasa residual de 5 cultivos en Colombia* [Tesis de Maestría, Universidad Americana de Europa UNADE]. https://unade.edu.mx/area-investigacion/tfm-trabajos-maestrias/

Putumayo. (5 de junio de 2025). En *Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Putumayo_(Colombia)&oldid=167793591

Restrespo, S. (2020). *Electricidad a partir de fuentes renovables en una Zona No Interconectada en Colombia* [Tesis de Pregrado- Ingeniería Industrial, Universidad EIA]. https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/6b5547d8-7e62-4b72-8594-9e2c900ceaa5/content

Roa, D., & Gómez, D. (2019). *Implementación de proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable en zonas no interconectadas: estudio de caso (Puerto Carreño –Vichada)* [Tesis de Especialización, Universidad

Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/6c853146-1eea-4f68-87a7-54b197b9162a/content

Rojas, M. (2020). *Plan de manejo a partir del uso de biomasa para la producción de energía basado en la aplicación de la Ley 1715 del 2014 Capitulo IV "Desarrollo y promoción de las FNCER"* [Tesis de Pregrado, Ingeniería Ambiental, Universidad Cooperativa de Colombia]. https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/d3f8fca8-f033-4386-961d-01ab0f28e323/content

Sigipse. (2024). *Sistema de Información Geográfico IPSE*. https://ipse.gov.co/sigipse/#caracterizacion-sigipse

SUI. (s. f.). *Indicadores sobre el servicio, reportes comerciales, financieros, administrativos y técnico operativos, acceso a la bodega de datos y cadena de prestación del servicio de energía*. Consultado el 28 de noviembre de 2024. https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia

Superservicios (2023). *Informe Sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica 2023 para las Zonas No Interconectadas*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-servicio-de-energia-ZNI-2023.pdf

Tu Tiempo. (2025a). *Radiación Solar En Puerto Asís- Radiación Solar 15 Días*. https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/puerto-asis.html

Tu Tiempo. (2025b). *Radiación Solar En Uribia- Radiación Solar 15 Días*. https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/uribia.html

Tu Tiempo. (2025c). *Radiación Solar En Mitú- Radiación Solar 15 Días*. https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/mitu.html

Tu Tiempo. (2025d). *Radiación Solar En Puerto Carreño- Radiación Solar 15 Días*. https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/puerto-carreno.html

UPME & U. Javeriana. (2015). *Atlas Hidroenergético de Colombia*. https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx

UPME. (2009). Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia. En *UPME & IDEAM*. https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx

UPME. (2022). *Documento Metodológico de Cálculo del Índice de Cobertura de Energía Eléctrica, 2018*. https://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/Documento_Metodologico_ICEE_2018_Sep152022.pdf

UPRA. (s. f.). *Agronet- Reporte:Área, Producción y Rendimiento Nacional Por Cultivo*. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1

Upra. (2023a). *Putumayo- Documento Regional*. https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/PUTUMAYO/2-%20Documento%20Regional%20UPRA%20Putumayo.pdf

Upra. (2023b). *La Guajira- Documento Regional*. https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/LA%20GUAJIRA/2-%20Documento%20Regional%20UPRA%20La%20Guajira.pdf

Upra. (2023c). *Vaupés- Documento Regional*. https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/VAUP%C3%89S/2-%20Documento%20Regional%20UPRA%20Vaup%C3%A9s.pdf

Vaupés. (5 de julio de 2025). En *Wikipedia.* https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Vaup%C3%A9s&oldid=168312833

Vichada. (16 de junio de 2025). En *Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Vichada&oldid=167983209

Villarrubia, M. V. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Alpha Editorial.