

**DESARROLLO DE UN ESTUDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA
RURALIDAD BOGOTANA, EN EL MARCO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE
INFORMACIÓN PARA LA PLANEACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL DESARROLLO RURAL**

Informe Final



Elaborado para:
Secretaría Distrital de Planeación

Elaborado por:
Universidad Nacional de Colombia



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Bogotá, D.C.
Diciembre 2023



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

DESARROLLO DE UN ESTUDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA RURALIDAD BOGOTANA, EN EL MARCO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA PLANEACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL DESARROLLO RURAL

Informe Final

Versión: 2.0	Elaboró	Revisó y Aprobó	Fecha de aprobación: 04 de diciembre de 2023
	Universidad Nacional de Colombia	Carlos Galeano - Cindy López Vo. Bo.:	

Tipo de documento	Anexos (AX)	
	Bitácora (BT)	
	Informe de Actividades (IA)	
	Informe de Resultados Experimentales (IR)	
	Informe Técnico (IT)	X
	Project Charter (PJ)	
	Propuesta (PR)	
	Protocolo de pruebas (PP)	
	Resumen Ejecutivo (RE)	
Propósito	Este Anexo ha sido preparado por la Universidad Nacional de Colombia con un conocimiento razonable y con el cuidado y la diligencia establecidos en los términos del contrato con la Secretaría Distrital de Planeación. La Universidad Nacional de Colombia niega alguna responsabilidad y con terceros al respecto de cualquier materia fuera del alcance anterior. Este informe es confidencial y la Universidad Nacional de Colombia no acepta ninguna responsabilidad en absoluto, si otros tienen acceso a parte o la totalidad del informe.	

HISTORIAL DE VERSIONES

Número	Fecha	Autor	Cambios
1.0	04 de diciembre de 2023	Universidad Nacional de Colombia	Versión inicial
2.0	12 de diciembre de 2023	Universidad Nacional de Colombia	Modificaciones SDP

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. Introducción	9
2. Metodología para la identificación de puntos de registro hidrometeorológico en la zona rural de Bogotá	10
2.1. Metodología para la definición de los puntos de instalación de estaciones meteorológicas	10
2.2. Metodología para la definición de los puntos de instalación del sensor de nivel	17
3. Indicadores de potencial de energía renovable en la ruralidad de Bogotá	20
3.1. Potencial de energía eólica y solar	21
Indicadores de energía eólica definidos	21
Indicadores de energía solar definidos	22
Bases de datos consultadas	22
Procesamiento de la información e interpolación	23
Mapas de indicadores de potencial de energía eólica y solar	29
3.2. Potencial de energía hidráulica	36
Metodología para el cálculo del potencial de energía hidráulica en la ruralidad de Bogotá	37
Mapas de indicadores de potencial de energía hidráulica	38
3.3. Potencial de energía por biomasa	41
Metodología para el cálculo del potencial energético de la biomasa residual de la ruralidad de Bogotá	41
Mapas de indicadores de potencial de energía de biomasa	44
4. Módulos para la visualización de indicadores de potencial energético	46
4.1. Módulo 1: Atlas de energías renovables de la ruralidad de Bogotá	46
Indicadores de potencial de energía eólica	47
Indicadores de potencial de energía solar	49
Indicadores de potencial de energía hidráulica	50
Indicadores de potencial de energía por biomasa	51
4.2. Módulo 2: Visualización de la información de las estaciones meteorológicas	52
5. Conclusiones	53
5.1. Conclusiones sobre el potencial eólico y solar	53
Desarrollo de herramientas para la implementación de proyectos de generación de energía renovables en la ruralidad bogotana	54
Fortalecimiento y actualización de la información climática en la ruralidad bogotana	55

5.2.	Conclusiones sobre el potencial de energía hidráulica	55
5.3.	Conclusiones sobre el potencial de energía por biomasa	56
5.4.	Otras conclusiones	57
6.	Referencias	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del protocolo de selección de zonas de interés.	11
Figura 2. Mapa potenciales puntos de medición para el área rural de Bogotá. a) Generación fotovoltaica. b) Generación eólica.	12
Figura 3. Puntaje consolidado para la priorización de los potenciales puntos de medición climática en la ruralidad de Bogotá.	13
Figura 4. Mapa de potenciales puntos de medición - Puntaje ponderado.	13
Figura 5. Colegios de la ruralidad seleccionados para la instalación de las estaciones de meteorológicas.	14
Figura 6. Estaciona meteorológicas instaladas en los colegios de la ruralidad. a) Colegio El Verjon, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.	14
Figura 7. Muestra de las mediciones de velocidad de viento reportadas para las ubicaciones rurales escogidas. a) Colegio El Verjon, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.	15
Figura 8. Muestra de las mediciones de dirección de viento reportadas para las ubicaciones rurales escogidas. a) Colegio El Verjon, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.	16
Figura 9. Diagrama de flujo – metodología de identificación de ubicaciones potenciales sensor de nivel.	17
Figura 10. Resultado de la superposición ponderada.	18
Figura 11. Visita a campo de dos puntos de instalación identificados: a) punto son el el río Chochal y b) punto sobre el río Santa Rosa.	19
Figura 12. Sensor de nivel instalado en el colegio Jaime Garzón – Sede Las Auras.	20
Figura 13. Área de estudio y área rural.	23
Figura 14. Distribución estadística del promedio anual multianual de la variable W10 (fila superior) y de la variable transformada con Box-Cox (fila inferior).	27
Figura 15. Ejemplo de la interpolación construida empleando Kriging ordinario para la variable W10. a) Mapa construido, b) semivariograma empelado y c) gráfico de validación cruzada.	28
Figura 16. Valor medio del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [m/s].	31
Figura 17. Valor medio del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [m/s].	31
Figura 18. Comportamiento del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura para las 15 veredas con mayor valor promedio.	32
Figura 19. Comportamiento del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura para las 15 veredas con mayor valor promedio.	32
Figura 20. Valor medio del promedio anual multianual de la irradiación global horizontal dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [kWh//m ² /día].	35
Figura 21. Valor medio del promedio anual multianual del brillo solar dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [h/día].	35

Figura 22. Comportamiento del promedio anual multianual de la irradiación global horizontal para las 15 veredas con mayor valor promedio.	36
Figura 23. Comportamiento del promedio anual multianual del brillo solar para las 15 veredas con mayor valor promedio.	36
Figura 24. Diagrama de flujo para el cálculo del potencial hidráulico convencional – Método 1.	37
Figura 25. Diagrama de flujo para el cálculo del potencial hidrocínético – Método 2.	38
Figura 26. Indicador de potencial hidráulico gravitacional – Método 1 para 100 m.	38
Figura 27. Indicador de potencial hidrocínético – Método 2 para 100 m.	38
Figura 28. Distribución porcentual de la potencia acumulada por unidad de área UPL – Método 1.	39
Figura 29. Distribución porcentual de la potencia acumulada por unidad de área UPL – Método 2.	39
Figura 30. Valor promedio por vereda del indicador de potencial hidráulico – Método 1. Unidades [kW].	40
Figura 31. Valor promedio por vereda del indicador de potencial hidrocínético – Método 2. Unidades [kW].	40
Figura 32. Metodología resumida para la determinación del potencial de biomasa residual de la ruralidad de Bogotá.	42
Figura 33. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico para los residuos generados en los cultivos principales de la ruralidad de Bogotá.	43
Figura 34. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento por biodigestión para los residuos generados en los cultivos principales de la ruralidad de Bogotá.	43
Figura 35. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a las flores por veredas. Unidades [kW].	44
Figura 36. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a los tubérculos por veredas. Unidades [kW].	44
Figura 37. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a las frutas por veredas. Unidades [kW].	44
Figura 38. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociada a las hortalizas por veredas. Unidades [kW].	45
Figura 39. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a los residuos generados por animales por veredas. Unidades [kW].	45
Figura 40. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico por veredas. Unidades [kW].	45
Figura 41. Comportamiento de la energía térmica de la biomasa para las 15 veredas con mayor potencial energético.	45
Figura 42. Comportamiento de la energía por digestión anaerobia de la biomasa para las 15 veredas con mayor potencial energético.	46
Figura 43. Botón de acceso al Módulo 1: Atlas de energías renovables.	47
Figura 44. Vista general de la interfaz de usuario desarrollada para el módulo 1.	47
Figura 45. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía eólica.	48
Figura 46. Ejemplo de las opciones de visualización por sectores disponibles en el módulo 1: a) mapa raster de la variable, b) análisis por vereda y c) análisis por UPL.	49
Figura 47. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía solar.	49
Figura 48. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía hidráulica.	50
Figura 49. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía de biomasa.	51

Figura 50. Botón de acceso al Módulo 2: Visualización de la información de las estaciones meteorológicas.

52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas de los colegios rurales seleccionados para la instalación de las estaciones de meteorológicas.	14
Tabla 2. Características técnicas de las estaciones RK900-10 instaladas en los colegios rurales.	15
Tabla 3. Coordenadas del colegio rural seleccionado para la instalación del sensor de nivel.	20
Tabla 4. Variables eólicas y solares consideradas.	22
Tabla 5. Fuentes de datos gratuitas seleccionadas.	26
Tabla 6. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].	29
Tabla 7. Parámetros de la variación del promedio anual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].	30
Tabla 8. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].	30
Tabla 9. Parámetros de la variación del promedio anual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].	31
Tabla 10. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la irradiación global horizontal dentro de cada pieza rural. Unidades [kWh/m ² /día].	33
Tabla 11. Parámetros de la variación del promedio anual de la irradiación global horizontal dentro de cada pieza rural. Unidades [kWh/m ² /día].	33
Tabla 12. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].	34
Tabla 13. Parámetros de la variación del promedio anual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].	34
Tabla 14. Parámetros de la variación del promedio anual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].	34
Tabla 15. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].	35
Tabla 16. Potencia acumulada UPL- Método 1.	39
Tabla 17. Potencia acumulada UPL- Método 2.	39
Tabla 18. Capas de información disponibles para la energía eólica.	49
Tabla 19. Capas de información disponibles para la energía solar.	50
Tabla 20. Capas de información disponibles para la energía hidráulica.	51
Tabla 21. Capas de información disponibles para la energía por biomasa.	51

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones políticas, climáticas y tecnológicas de la sociedad moderna impulsan, cada vez con mayor prioridad, el uso de energías limpias para el reemplazo de las fuentes energéticas convencionales no-renovables. Esta tendencia no es ajena a las políticas energéticas del gobierno colombiano, el cual trabaja en el desarrollo de una estrategia de transición energética nacional.

La implementación de soluciones de generación de energía a través de métodos no convencionales y renovables requiere, como punto de partida, el reconocimiento del potencial energético en campo. Estos indicadores de potencial dependen del tipo de energía a considerar y se basan en mediciones realizadas *in situ* de variables climáticas, de caudal, de producción agropecuaria, etc.

Actualmente el área urbana del Distrito Capital se encuentra cubierta por una amplia red de sensores meteorológicos y de calidad de aire, que ha permitido construir series de tiempo de diferentes variables climáticas y, por tanto, de indicadores de potencial energético. No obstante, el área rural de la capital no se encuentra cubierta por esta red y se carece de un histórico de datos que permitan evaluar para las diferentes zonas y veredas de la ruralidad el nivel de potencial de energía renovable.

Considerando esta asimetría de la información disponible entre el área urbana y el área rural bogotana, la subsecretaría de Desarrollo Rural Sostenible de la Secretaría Distrital del Planeación (SDP) plantea el diseño y ejecución de un proyecto que se enfoque en la recopilación de la información requerida para el cálculo de los indicadores de potencial de energía eólica, solar, hídrica y de biomasa para toda la zona rural. El objetivo del proyecto contempla el uso de herramientas de información geográfica para la construcción de un atlas de indicadores de potencial energético para la ruralidad.

Si bien, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ha desarrollado diversos atlas de potencial de energías renovables para el contexto nacional, no se tiene un registro de mapas desarrollados para el análisis de dichos potenciales en las principales ciudades del país. Esto hace que los resultados alcanzados en el presente proyecto sean pioneros, dentro del contexto nacional, en el análisis de potenciales energéticos a nivel de ciudades.

De esta forma, se suscribe el Contrato Interadministrativo 841 de 2022 entre la SDP y la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, con el fin de ejecutar el mencionado proyecto.

En el presente informe ejecutivo final, se presenta de forma general las principales actividades y productos desarrollados durante el proyecto. En la segunda sección se presenta la metodología construida para priorizar la instalación de estaciones hidrometeorológicas y se describen los cuatro puntos de instalación seleccionados para una red piloto de registro climático de la ruralidad. En la tercera sección se presentan los indicadores de energía renovable calculados para la ruralidad en el marco del proyecto y se discuten brevemente los mapas de distribución obtenidos. En la cuarta sección se describen dos módulos de la plataforma Bogotá Rural¹ que se desarrollaron en el marco del proyecto y que tienen como objetivo permitir la visualización de la información recopilada en el proyecto. Por

¹ <https://bogotarural.sdp.gov.co/>

último, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan de la ejecución del proyecto y que buscan orientar futuros pasos en el proceso de desarrollo y suficiencia energética de la ruralidad bogotana. A lo largo del documento se hará referencia a los productos realizados durante la ejecución del proyecto, que se encuentran en el Drive de la Secretaría Distrital de Planeación.

2. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE REGISTRO HIDROMETEOROLÓGICO EN LA ZONA RURAL DE BOGOTÁ

Uno de los objetivos trazados para el proyecto consistió en el despliegue de una red piloto de estaciones hidrometeorológicas en la zona rural de Bogotá. Esta red consiste en tres estaciones climáticas y un sensor de nivel para la estimación del caudal de una afluente hídrico.

Aunque los mapas desarrollados para el atlas de energías renovables serán construidos principalmente con información secundaria, proveniente de fuentes como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el proyecto Copernicus², etc., se consideró importante la implementación de estaciones de medición climática en puntos estratégicos de la ruralidad. Estas estaciones climáticas permitieron la recolección de información primaria, durante un periodo de cinco meses, la cual, junto con mapas construidos, será importante para la evaluación local de los potenciales en futuros planes piloto de generación de energía eólica, solar o hídrica en las ubicaciones definidas.

Para la selección de los puntos de instalación de los equipos de medición se desarrolló una metodología que permitía evaluar y priorizar zonas de la ruralidad bogotana de acuerdo con ciertos parámetros. Considerando las particularidades de cada tipo de medición (climática y de caudal), se desarrollaron dos metodologías independientes, las cuales se describen con detalle en la sección 3 del Producto 2 del proyecto (consultar sección 3. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN, correspondiente al Producto 2 del presente proyecto).

2.1. Metodología para la definición de los puntos de instalación de estaciones meteorológicas

Para el caso particular de la instalación de las estaciones climáticas, se definió una metodología consistente en evaluar una serie de criterios, los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

1. Criterios técnicos: corresponden a las variables meteorológicas e hídricas del lugar que determinan el potencial teórico de generación del lugar
2. Criterios sociales: son aquellas variables que corresponden a tipo de comunidades que habitan la región, uso del suelo, urbanismo.
3. Criterios ambientales: se consideran variables del entorno (e.g. geográficas, forestales) y de impacto ambiental (e.g. fuentes hídricas, biodiversidad).
4. Criterios económicos: están relacionada con la cercanía a infraestructura de transporte y consumo de energía.

² <https://www.copernicus.eu/>

Se estableció para cada criterio una rúbrica de evaluación, así como una tabla de ponderación para el cálculo de un indicador consolidado. La evaluación de cada uno de los criterios se implementó usando una herramienta de información geográfica (ArcGIS), con el fin de facilitar la revisión de toda la zona rural. En la Figura 1 se ilustra la estrategia empleada para el cálculo del indicador consolidado y la construcción del mapa correspondiente para la zona rural de Bogotá.

De esta forma, en la Figura 2-a se puede observar un mapa de la ruralidad de Bogotá, donde las zonas de color naranja representan los puntos de medición más viables en el contexto de generación fotovoltaica y las zonas de color verde los puntos menos viables según los criterios analizados. De forma análoga, en la Figura 2-b se muestra el resultado obtenido al evaluar los criterios para la variable eólica. En dicho mapa, las zonas naranjas representan los puntos de medición más viables para generación eólica y las zonas de color verde los puntos menos viables.

Así mismo, en la Figura 3 se puede observar el mapa con la integración de los resultados presentados en la Figura 2 y que permitió priorizar diferentes zonas para la instalación de las tres estaciones climáticas de la red piloto planteada. Los detalles de la metodología diseñada para la valoración de los puntos de instalación de las estaciones, puede ser consultada en la sección 3.1 *Metodología para la definición de los puntos de instalación de estaciones meteorológicas*, correspondiente al Producto 2 del presente proyecto.

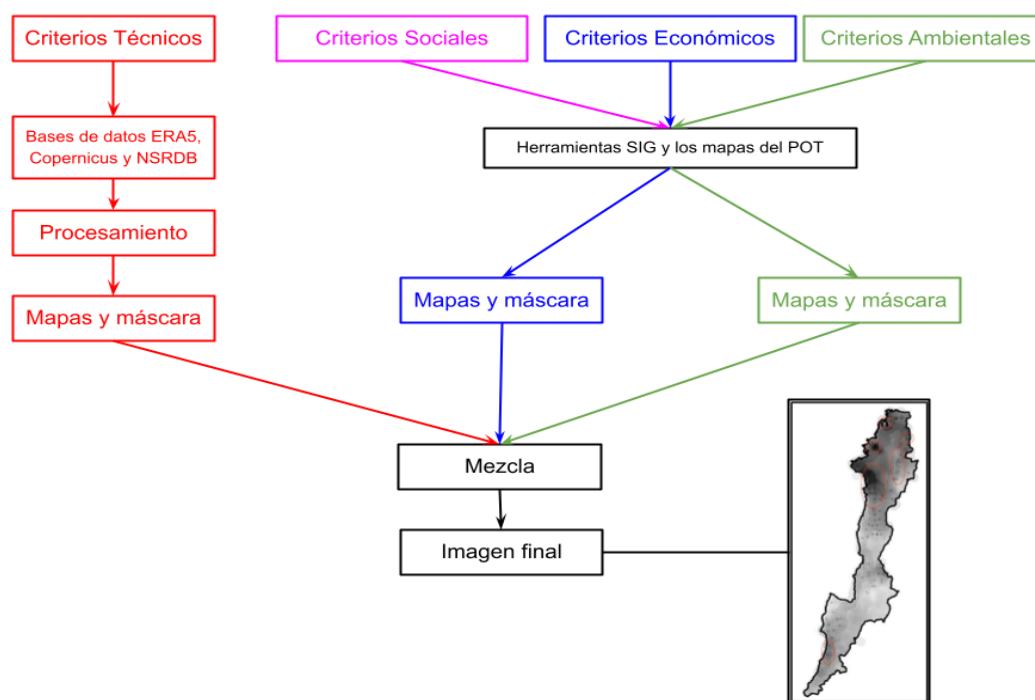
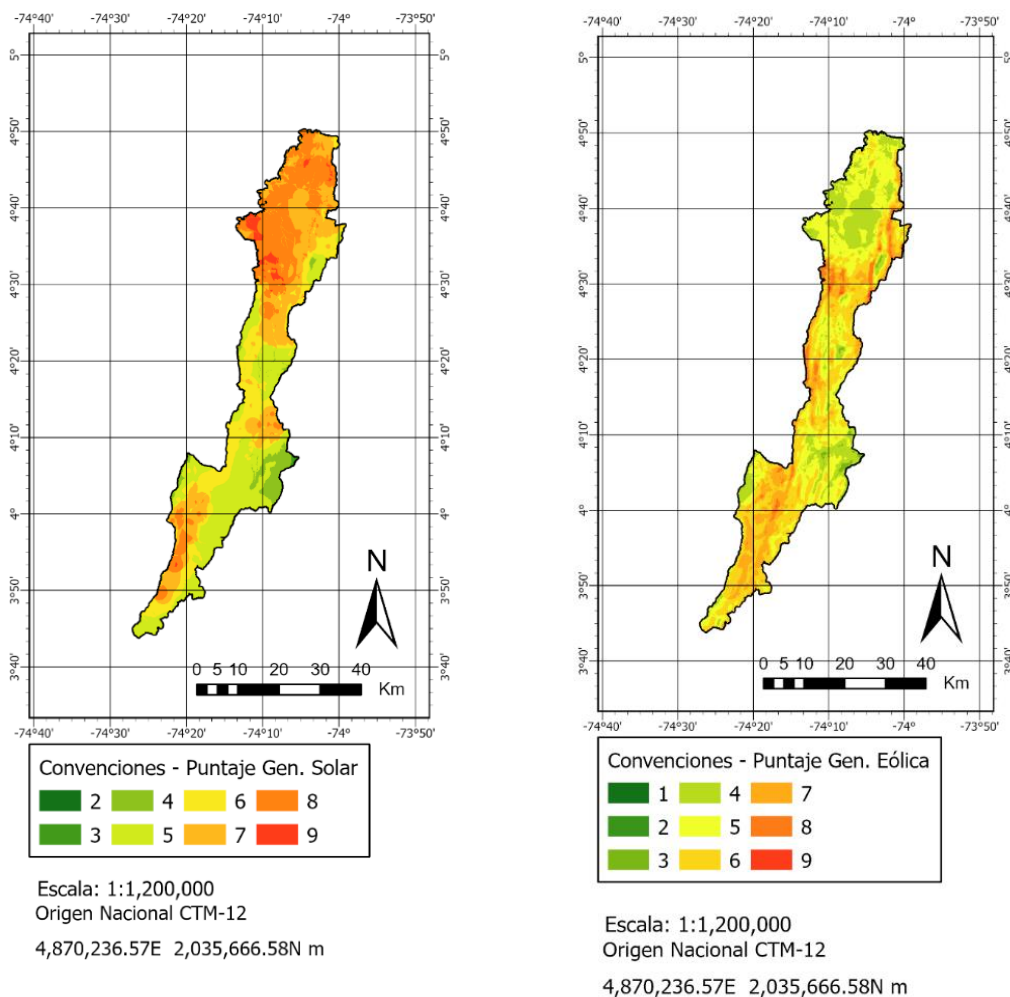


Figura 1. Diagrama de flujo del protocolo de selección de zonas de interés.



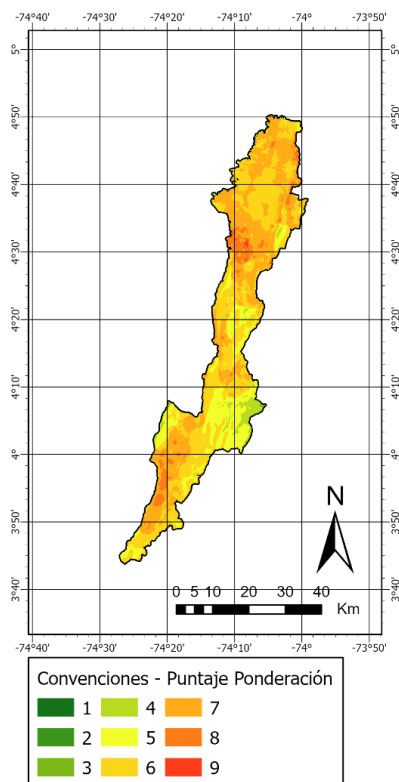
a)

b)

Figura 2. Mapa potenciales puntos de medición para el área rural de Bogotá. a) Generación fotovoltaica. b) Generación eólica.

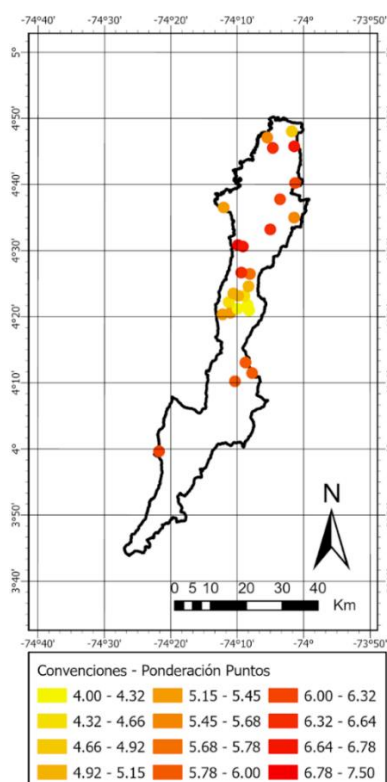
A partir de los resultados de la Figura 3, se realizó la búsqueda de equipamientos en el área rural dentro de los cuales se pudiera hacer la instalación de los equipos, buscando garantizar unas condiciones mínimas de seguridad e integridad operativa de los mismos. En esta búsqueda se prestó especial énfasis en las instituciones educativas distritales, las cuales ofrecían el beneficio adicional de integrar a estudiantes y profesores al desarrollo del proyecto y proporcionaban resguardo para los equipos.

Identificados los colegios rurales, se evaluó el puntaje ponderado de cada uno, tal como se muestra en la Figura 4, y se realizaron los contactos con la Secretaría Distrital de Educación y los rectores de diferentes colegios con el fin de analizar la viabilidad de instalación en cada institución.



Escala: 1:1,200,000
 Origen Nacional CTM-12
 4,870,236.57E 2,035,666.58N m

Figura 3. Puntaje consolidado para la priorización de los potenciales puntos de medición climática en la ruralidad de Bogotá.



Escala: 1:1,200,000
 Origen Nacional CTM-12
 4,870,236.57E 2,035,666.58N m

Figura 4. Mapa de potenciales puntos de medición - Puntaje ponderado.

Finalmente, se escogieron tres colegios para la instalación de las estaciones meteorológicas:

- Colegio El Verjón.
- Colegio José Celestino Mutis.
- Colegio Campestre Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.

Las coordenadas de los colegios rurales seleccionados se listan en la Tabla 1 y su ubicación se ilustra en el mapa de la Figura 5. Finalmente, el 1 de agosto del presente año se realizó la instalación de las tres estaciones en las instituciones mencionadas y se comenzó el registro de los datos, el cual se extenderá hasta el 31 de diciembre del presente año, con el fin de dar cumplimiento a lo acordado en el contrato interadministrativo. Los registros logrados durante el periodo señalado permitirán contar con un mínimo de información climática tomada en el sitio, con el fin de corroborar la información de los mapas de energía renovable construidos y apoyar futuros proyectos piloto para la instalación, en estas ubicaciones, de sistemas de generación local de energía renovable. En la Figura 6 se muestran las tres estaciones instaladas en las instituciones educativas seleccionadas.

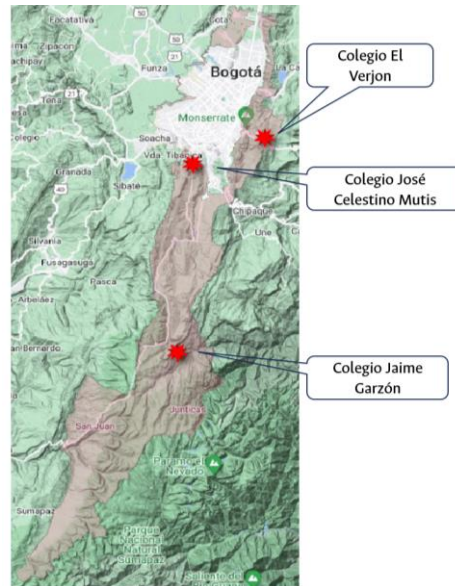


Figura 5. Colegios de la ruralidad seleccionados para la instalación de las estaciones de meteorológicas.

COLEGIO	LATITUD	LONGITUD
El Verjón	4.583568269481306°	-74.0236117634019°
José Celestino Mutis	4.516297209952549°	-74.15200710196831°
Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez	4.218746366126926°	-74.14551673595292°

Tabla 1. Coordenadas de los colegios rurales seleccionados para la instalación de las estaciones de meteorológicas.



a)



b)



c)

Figura 6. Estaciones meteorológicas instaladas en los colegios de la ruralidad. a) Colegio El Verjón, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.

Para la instalación se seleccionaron estaciones marca RIKA modelo RK900-10, la cual cuenta con las características técnicas listadas en la Tabla 2.

	RANGO	RESOLUCIÓN	PRECISIÓN
Velocidad de viento	0 – 60 [m/s]	0.01 [m/s]	±2%
Dirección de viento	0 – 360 [°]	1°	±3°
Temperatura del aire	-40 – 80 [C]	0.1 [C]	±0.4 [C]
Humedad del aire	0 – 100 [%]	0.1 [%]	±3 [%]
Precipitación	0 – 200 [mm/hr]	0.1 [mm]	±5 [%] (@ velocidad del viento < 5 m/s)
Radiación solar	0 – 2000 [W/m²]	0.1 [W/m²]	±5 [%]

Tabla 2. Características técnicas de las estaciones RK900-10 instaladas en los colegios rurales.

Adicionalmente, como se observa en la Figura 6, las estaciones cuentan con un panel solar de 60 W, una batería de 12 V / 12000 mAh y un datalogger marca Campbell Scientific, modelo CR300, para el almacenamiento de la información registrada por los sensores. De acuerdo con la programación generada en el datalogger, se hace un reporte de datos cada 10 minutos, de modo que diariamente se almacenan 144 registros para cada una de las variables medidas.

De esta forma y una vez instalados los equipos se ha realizado un registro de la información meteorológica, la cual se extenderá hasta el 31/12/2023. En Figura 7 se presenta una muestra de la información recopilada para la velocidad de viento en cada uno de los tres colegios rurales, reportada usando los histogramas de frecuencia. Así mismo, en la Figura 8 se presenta una muestra de las mediciones de dirección de viento tomada para las tres ubicaciones seleccionadas.

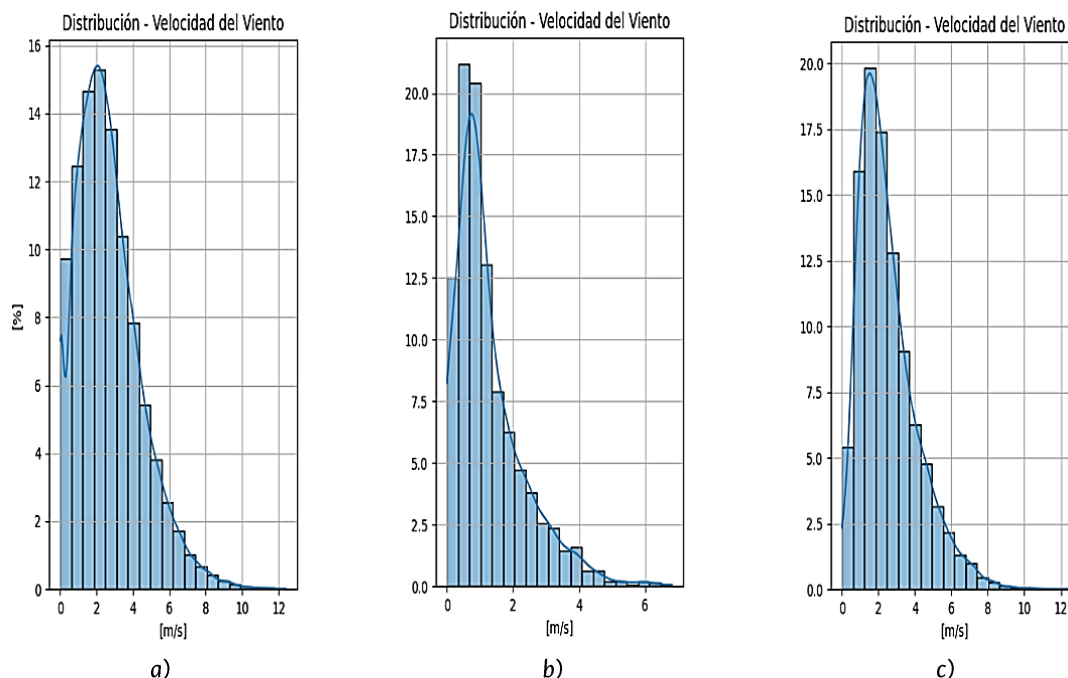
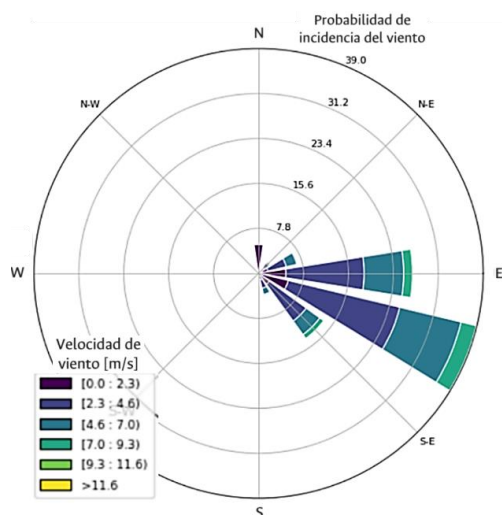
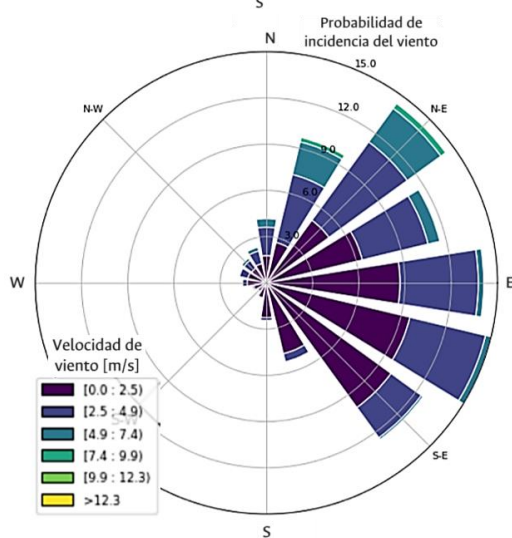


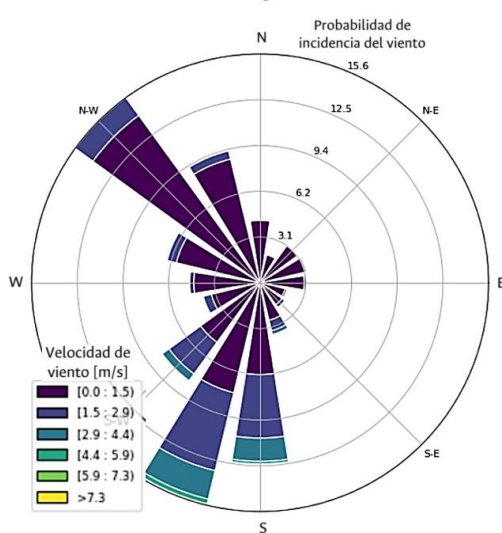
Figura 7. Muestra de las mediciones de velocidad de viento reportadas para las ubicaciones rurales escogidas. a) Colegio El Verjon, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.



a)



b)



c)

Figura 8. Muestra de las mediciones de dirección de viento reportadas para las ubicaciones rurales escogidas. a) Colegio El Verjón, b) Colegio José Celestino Mutis y c) Colegio Jaime Garzón – Sede Adelina Gutiérrez.

El reporte completo de la información registrada por las estaciones meteorológicas instaladas se encuentra consignado en una base de datos compartida con la SDP. Esta base de datos hace parte de los módulos desarrollados, en el contexto del presente proyecto, para la plataforma Bogotá Rural (ver Sección 4. Módulos para la visualización de indicadores de potencial energético en el presente documento).

2.2. Metodología para la definición de los puntos de instalación del sensor de nivel

De forma similar a la metodología desarrollada para la identificación de los puntos de instalación de las estaciones meteorológicas, también se desarrolló una metodología para determinar la ubicación adecuada para el sensor de nivel.

Esta metodología se formuló en 3 fases: la fase I corresponde a la revisión de fuentes de información geográfica y recopilación de la información básica disponible, la fase II corresponde a la definición de criterios ambientales, socioeconómicos y técnicos, y en la fase III se realiza el procesamiento de la información de acuerdo con los criterios definidos previamente, utilizando sistemas de información geográfica.

De manera general, se buscó identificar segmentos de ríos que:

- No estuvieran ubicados en áreas de Parques Nacionales Naturales.
- Tuvieran una sección regular.
- Se ubicaran próximos a bocatomas y a puentes (cruces de vías y ríos).
- Transporten agua suficiente para mover un generador hidrocínético (orden hidrológico del río mayor a 4).
- Presentaran una pendiente reducida, con el fin de evitar avenidas torrenciales que pongan en peligro el sensor o generador hidrocínético.
- Garantizaran unas condiciones de seguridad mínimas para los equipos.

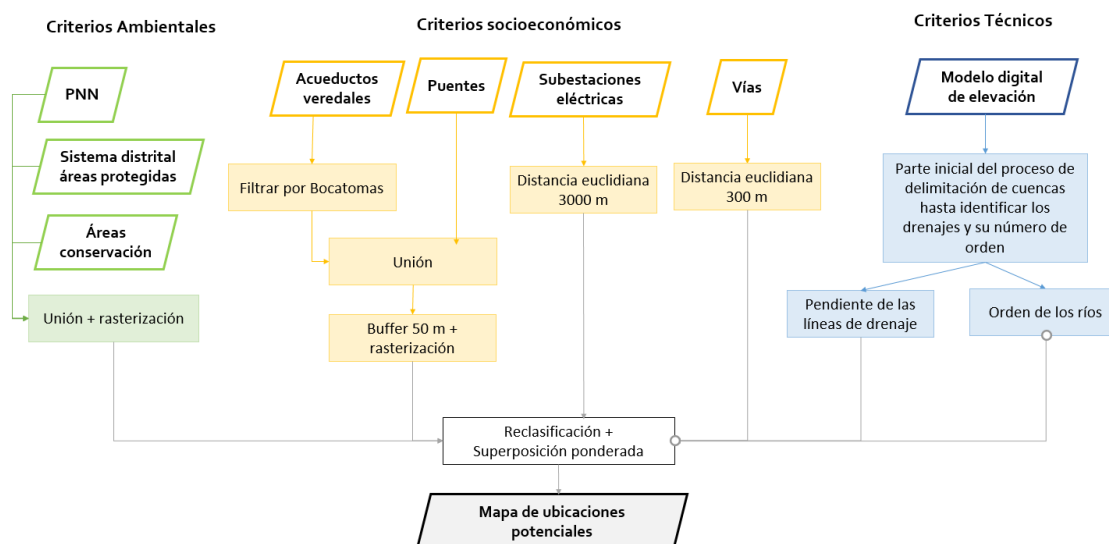


Figura 9. Diagrama de flujo – metodología de identificación de ubicaciones potenciales sensor de nivel.

La implementación de esta metodología dentro de una herramienta de información geográfica facilitó la superposición ponderada de los criterios y la obtención de una capa ráster, con una evaluación por cada pixel de acuerdo con los criterios y ponderaciones definidas. Como se observa en la Figura 10, estos resultados permitieron identificar 5 regiones potenciales a lo largo del área rural que incluyen ríos como Tunjuelo, Fucha y Sumapaz.

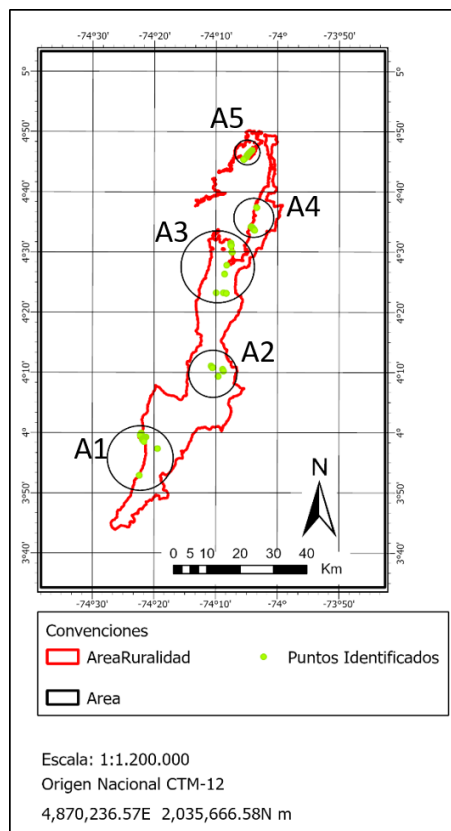


Figura 10. Resultado de la superposición ponderada.

Los detalles de la metodología diseñada para la valoración de los puntos de instalación de las estaciones, puede ser consultada en la sección 3.2 *Metodología para la definición de los puntos de instalación del sensor de nivel*, correspondiente al Producto 2 del presente proyecto.

El siguiente paso consistió en realizar visitas de inspección a campo con el fin de identificar algunas de las características de las cuencas de las ubicaciones identificadas. Algunas de las características a evaluar en las visitas fueron:

- Regularidad de la sección transversal.
- Tipo de flujo: continuo, discontinuo, turbulento.
- Altura de puente sobre el cauce.
- Facilidad de acceso.
- Cobertura de red de telefonía celular.
- Condiciones de seguridad para los equipos.

Se realizó un trabajo precampo en el cual se verificaron las condiciones de acceso a los puntos identificados a través de la metodología, aquí el criterio fueron las vías de acceso y la viabilidad técnica de localización de un sensor asociado a la pendiente del terreno. Para esto se utilizaron las capas de vías, imágenes satelitales de apoyo como *Google Maps*, *OpenStreet Map* y *Google Earth*. A partir de este análisis se aislaron los puntos con mejores características.

A partir de esta evaluación se realizó un plan de visitas a los puntos de la ruralidad priorizados y se realizaron las observaciones necesarias. En la Figura 11 se muestran fotografías de dos visitas de inspección realizadas a puntos sobre el río Chochal y Santa Rosa.



Figura 11. Visita a campo de dos puntos de instalación identificados: a) punto sobre el río Chochal y b) punto sobre el río Santa Rosa.

De esta manera, se realizaron visitas a múltiples posibles puntos de instalación de los equipos, muchos de los cuales tuvieron que ser descartados por alguna (o varias) de las siguientes razones:

- Irregularidad del cauce y/o presencia de detritos que evidenciaban crecientes con material de gran tamaño transportado por el río.
- Ausencia de puentes o infraestructura física adecuada para la instalación del sensor. Por lo cual era necesario el trámite de permisos ante la autoridad ambiental para la instalación de los equipos de medición.
- Altura inadecuada del puente.
- Ubicación en predios privados.
- Condiciones de seguridad incierta en el punto de instalación.

Una descripción completa de las visitas a campo realizadas, incluyendo coordenadas y hallazgos, se encuentra reportada en la sección *Verificación en campo de puntos potenciales de monitoreo hidrológico (nivel-caudal)* del *Producto 2. Análisis de la información hidrometeorológica recopilada a partir de fuentes secundarias*

y descripción de metodología empleada para la identificación de los puntos de medición seleccionados del presente proyecto.

Finalmente, después de un extenso proceso de revisión de posibles puntos de instalación para el sensor de nivel, el cual contó con un apoyo importante de las comunidades, se identificó una ubicación dentro del colegio Jaime Garzón – Sede Las Auras en la localidad de Sumapaz. Las coordenadas de la zona de instalación del sensor de nivel se encuentran listadas en la Tabla 3 y en la Figura 12 se ilustra la instalación de este.

En el punto mencionado se instaló un sensor de nivel tipo radar marca Geolux, referencia LX80. Este sensor cuenta con las siguientes características técnicas:

- Distancia de detección: 8 [m].
- Resolución: 0.5 [mm].
- Precisión: ± 2 [mm].
- Ángulo de barrido: 5 [°].

El sistema de medición instalado contó adicionalmente con un panel solar de 50W/12VDC, una batería de 12 V / 12000 mAh y un *datalogger* marca Campbell Scientific, modelo CR300, para el almacenamiento de la información registrada por el sensor.

COLEGIO	LATITUD	LONGITUD
Jaime Garzón – Sede Las Auras	4.171472616871381°	-74.17219231270192°

Tabla 3. Coordenadas del colegio rural seleccionado para la instalación del sensor de nivel.



Figura 12. Sensor de nivel instalado en el colegio Jaime Garzón – Sede Las Auras.

3. INDICADORES DE POTENCIAL DE ENERGÍA RENOVABLE EN LA RURALIDAD DE BOGOTÁ

Considerando que uno de los objetivos centrales del proyecto consiste en el desarrollo de un atlas digital con los potenciales de energías renovables, una tarea importante fue el levantamiento de información

climática e hídrica proveniente de fuentes secundarias que permita el cálculo de los indicadores de potencial energético.

Seleccionadas las fuentes de información, se recopilaron los datos, se analizó estadísticamente la consistencia de esta y se realizaron las interpolaciones espaciales que permitieran la construcción de las imágenes tipo raster y demás información geográfica para el atlas digital.

A continuación, se describe brevemente el proceso para la recopilación y procesamiento de la información secundaria. Mayores detalles sobre esta tarea pueden ser consultados en la sección 2. *DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA RENOVABLE EN LA RURALIDAD DE BOGOTÁ del Producto 2. Análisis de la información hidrometeorológica recopilada a partir de fuentes secundarias y descripción de metodología empleada para la identificación de los puntos de medición seleccionados del presente proyecto.*

Así mismo, se presenta un resumen del comportamiento de los indicadores de potencial energético calculados para la ruralidad. La información completa con el reporte de estos resultados puede ser consultada en las secciones 2, 3 y 4 del *Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

3.1. Potencial de energía eólica y solar

A continuación, se describen los indicadores de potencial de energía eólica y solar planteados en el contexto del proyecto desarrollado, así como la información recabada para el cálculo de estos y los resultados obtenidos para dichos indicadores dentro de la ruralidad bogotana.

Indicadores de energía eólica definidos

Para la estimación del potencial de energía eólica se plantearon los siguientes indicadores:

Velocidad del viento

La velocidad del viento es una de las variables de estado más importantes para obtener el potencial energético del viento. Usualmente es necesario conocer el comportamiento de este parámetro a diferentes alturas del suelo, con el fin de conocer el perfil de velocidad del viento y el potencial energético real que recibiría la turbina eólica a emplear. Esta variable se reportó en unidades de metros sobre segundo (m/s). En el contexto del proyecto desarrollado se definieron tres alturas para el reporte de la velocidad de viento: 10, 50 y 100 m.

Densidad de potencia del viento

Esta variable permite obtener datos del potencial de energía eólica como una función de la velocidad. Esta variable se reportó en unidades de W/m^2 . En el contexto del proyecto desarrollado se definieron tres alturas para el reporte de la densidad de potencia de viento: 10, 50 y 100 m.

Dirección del viento

La dirección del viento indica la frecuencia a la cual una diferentes direcciones del viento se dan. En la dirección se manejan como unidades los grados (°).

Indicadores de energía solar definidos

Para el caso de la energía solar, sobre la base de la revisión de literatura realizada, se priorizaron dos indicadores: la irradiación global horizontal y el brillo solar.

Irradiación global horizontal (IGH)

La irradiación global horizontal es toda la radiación solar que llega a la tierra y que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados. Este indicador se puede obtener a partir de la suma de la radiación solar directa y la radiación solar difusa. Los valores de irradiación global horizontal se reportan en unidades de (kW.h/m²/día).

Brillo Solar (BS)

El brillo solar es el periodo de tiempo de radiación solar directa que supera un valor mínimo de 120 W/m² en alguna ubicación determinada. Las cantidades de brillo solar fueron reportadas en unidades de (h/día).

En la Tabla 4 se consignan los indicadores, con sus abreviaturas y unidades, empleados para la estimación del potencial eólica y solar.

Bases de datos consultadas

Una vez se identificaron los indicadores de potencial energético a emplear, se definieron las variables climáticas requeridas para el cálculo de los indicadores y se relacionaron las fuentes de información secundaria a ser consultadas.

Se hizo un barrido de múltiples fuentes de información con el fin de obtener las bases de datos climatológicas y meteorológicas más adecuadas y se seleccionaron las fuentes reportadas en la Tabla 5.

ABREVIATURA	VARIABLE	UNIDADES
W10	Velocidad de viento medida a 10 m de altura	[m/s]
W50	Velocidad de viento medida a 50 m de altura	[m/s]
W100	Velocidad de viento medida a 100 m de altura	[m/s]
P10	Densidad de potencia de viento medida a 10 m de altura	[W/m ²]
P50	Densidad de potencia de viento medida a 50 m de altura	[W/m ²]
P100	Densidad de potencia de viento medida a 100 m de altura	[W/m ²]
IGH	Irradiación global horizontal	[kW.h/m ² /día]
Br	Brillo solar	[h/día]

Tabla 4. Variables eólicas y solares consideradas.

Procesamiento de la información e interpolación

Región definida y rango de tiempo considerado

La información cruda obtenida para la interpolación de las variables eólicas y solares se generaron para el área de interés que se observa en la Figura 13 como el recuadro rojo. Esta área se define a través de la caja trazada por la diagonal comprendida entre el punto con coordenadas 4818131.191E-2116833.8189999997N y el punto con coordenadas 4921329.7544E- 1952761.4629999995N. Esta zona cuenta con un área total de 16932.03 km².

Por otro lado, la ventana de tiempo definida para la recopilación de la información cruda corresponde a los años de 1998 – 2018, a partir de la cual se calcularon los promedios anuales multianuales y mensuales multianuales.

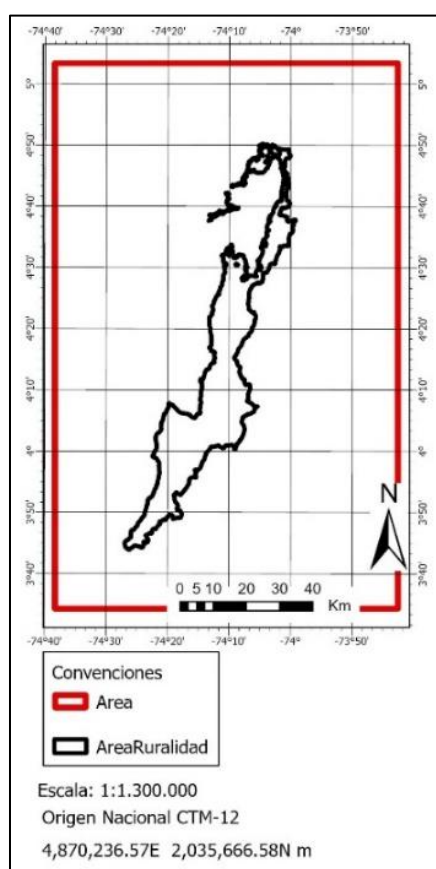


Figura 13. Área de estudio y área rural.

NOMBRE	ENLACE	COMENTARIO	ESPECIFICACIONES			
			VARIABLE	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN TEMPORAL	TIPO DE DATOS DESCARGA
ERA5	ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis	ERA5-Land se ha producido reproduciendo el componente terrestre del reanálisis climático ECMWF ERA5	surface_net_solar_radiation_sum [J/m2]: Cantidad de radiación solar (también conocida como radiación de onda corta) que llega a la superficie de la Tierra (tanto directa como difusa) menos la cantidad reflejada por la superficie terrestre (que se rige por el albedo)	11x11km	Datos promedio mensuales, período de los datos: primer día del mes 1990 - 2022	ImageCollection de la API de GEE, se puede descargar en csv
			total_precipitation_sum [mm]: Agua líquida y congelada acumulada, incluidas la lluvia y la nieve, que cae sobre la superficie de la Tierra. Es la suma de la precipitación a gran escala y la precipitación convectiva. Las variables de precipitación no incluyen la niebla, el rocío ni la precipitación que se evapora en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra.			
			u_component_of_wind_10m [m/s]: velocidad horizontal del aire que se desplaza hacia el este, a una altura de diez metros sobre la superficie de la Tierra			
			v_component_of_wind_10m [m/s]: velocidad horizontal del aire que se desplaza hacia el norte, a una altura de diez metros sobre la superficie de la Tierra			
			surface_pressure [Pa]: Presión de la atmósfera sobre la superficie de la tierra. Es una medida del peso de todo el aire en una columna situada verticalmente sobre el área de la superficie terrestre representada en un punto fijo. La presión superficial se utiliza a menudo en combinación con la temperatura para calcular la densidad del aire. temperature_2m [K]: Temperatura del aire a 2 m por encima de la superficie de la tierra. La temperatura a 2 m se calcula			

			interpolando entre el nivel más bajo del modelo y la superficie de la Tierra, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas. skin_temperature [K]: Temperatura de la superficie de la Tierra			
Copernicus	Balance de Radiación Superficial (SRB)	EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) / CM SAF (Climate Monitoring Satellite Application Facility)	surface_downwelling_longwave_flux [W/m ²]: Cantidad de energía de radiación de onda larga que llega al límite inferior de la atmósfera por unidad de tiempo y superficie desde arriba. (1 y 100 μ m) surface_downwelling_shortwave_flux [W/m ²]: Cantidad de energía de radiación de onda corta que llega al límite inferior de la atmósfera por unidad de tiempo y superficie desde arriba. (0,2 a 3 μ m) surface_upwelling_longwave_flux [W/m ²]: Cantidad de energía de radiación de onda larga que llega al límite inferior de la atmósfera por unidad de tiempo y superficie desde abajo (1 y 100 μ m)	0,25° x 0,25° 28x28km aprox.	Promedio diario y mensual 1990-2018	NETCDF
NSRDB	NSRDB (nrel.gov)	NSRDB: National Solar Radiation Database.	DHI: Diffuse Horizontal Irradiance [W/m ²] – Radiación que llega de todas las otras direcciones diferentes a la normal a la superficie de la tierra DNI: Direct Normal Irradiance [W/m ²] – Radiación que llega a la superficie terrestre perpendicularmente GHI: Global Horizontal Irradiance [W/m ²] – Es la radiación total que llega a la superficie terrestre (suma de normal y difusa) Wind Speed: [m/s] – Valor sacado de MERRA 10 m sobre la superficie terrestre Wind Direction: [Grados] – Valor sacado de MERRA Temperature: [C] - Valor sacado de MERRA Pressure: [mbar] - Valor sacado de MERRA	0,038°x0,038° 4 km x 4 km	Serie de tiempo: 30 o 60 minutos; Periodo de tiempo: 1998 - 2021	CSV

Atlas solar y de viento globales (energydata.info)	solar	Proporcionados por World Bank Group y Esmap, las bases de datos que toman son: -(solar) Solargis alimenta de datos el mapa solar: se pueden descargar mapas de alta resolución (formato TIF) de la radiación promedio en el periodo de 1999-2018 y también se pueden descargar otros recursos de octubre del 2019 -(eólico) datos orográficos son proporcionados por la NASA y Viewfinder Paramas, y los datos batimétricos son proporcionados por GEBCO, ref. Global Wind Atlas Datasets. Todos los demás datos disponibles para descarga son propiedad de DTU Wind Energy, ref. las Condiciones de uso del Atlas Eólico Global	Producción de energía fotovoltaica (PVOUT) Irradiación Horizontal Global (GHI) Irradiación Horizontal Difusa (DIF) Irradiación Normal Directa (DNI) Inclinación Óptima [°] para Módulos Fotovoltaicos (OPTA) Temperatura del aire a 2 m de la superficie (TEMP) Elevación (ELE) Sin embargo, la página presenta mapas con promedios diarios y anuales para el periodo de tiempo comprendido entre 1999 y 2018 de los siguientes indicadores: Irradiación Normal Directa (DNI) Irradiación Horizontal Global (GHI) Producción de energía fotovoltaica (PVOUT) Los indicadores presentados para viento son: • Velocidad Media del Viento • Densidad Energética Media • Densidad Media del Aire • Factor de Capacidad • Weibull Combinado	1 km x 1 km		
---	--	---	--	-------------	--	--

Tabla 5. Fuentes de datos gratuitas seleccionadas.

Procesamiento estadístico de la información

Con el fin de evaluar la consistencia de la información recopilada se realizó un procesamiento estadístico de la misma.

En primera instancia se realizó un análisis para identificar las transformaciones matemáticas adecuadas para la normalización de la información. Para el caso de las variables eólicas se encontró que estas en su forma natural exhiben una distribución tipo *Weibull* ([3], [7], [8]) y una transformación tipo *BoxCox* permite normalizar la distribución de los datos ([4], [5]). Por otro lado, las variables solares mostraron distribuciones más cercanas a una normal y por tanto en muchos de los casos no requirieron la aplicación de una transformación. En la Figura 14 se presenta un ejemplo del efecto de la transformación *BoxCox* sobre la velocidad de viento a 10 m de altura.

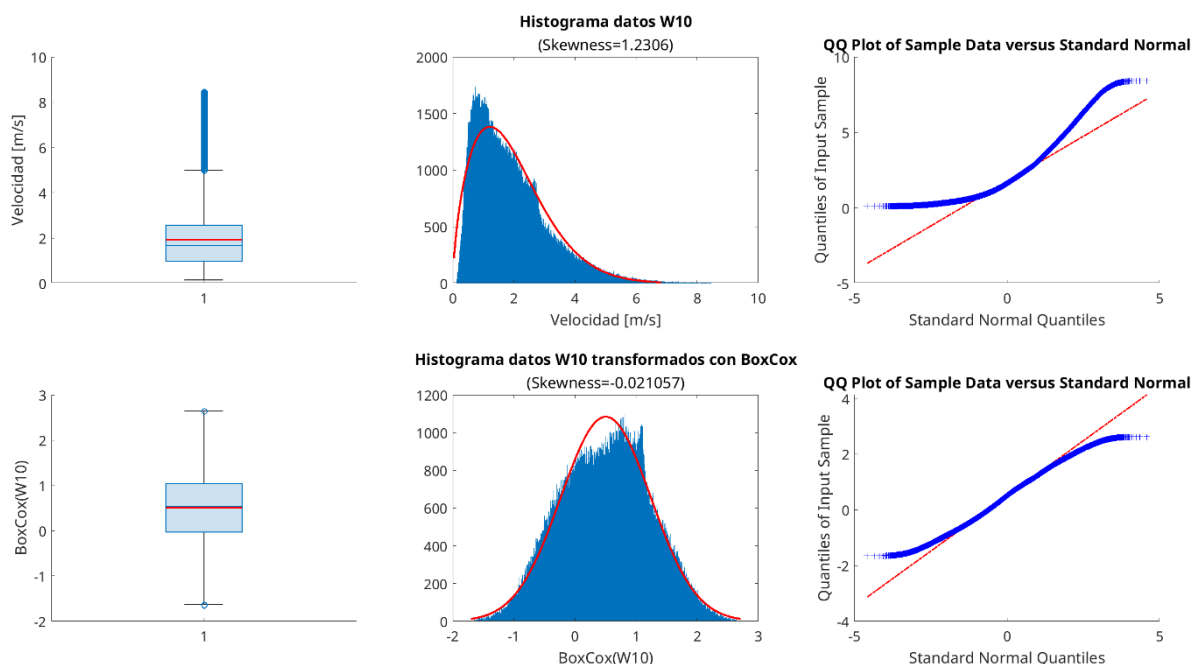


Figura 14. Distribución estadística del promedio anual multianual de la variable W10 (fila superior) y de la variable transformada con Box-Cox (fila inferior).

Posteriormente, se empleó un análisis de *Anselin Local Moran's I* para la determinación y remoción de los valores atípicos espaciales ([1], [2]). Este procesamiento mostró ser de gran utilidad para garantizar una alta autocorrelación y consistencia en los datos a interpolar.

Mayores detalles sobre el procesamiento estadístico realizado a la información recopilada, se puede consultar en la sección 2. INDICADORES DE POTENCIAL TEÓRICO DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.

Interpolación de datos

Depuradas las nubes de puntos, obtenidas de las bases de datos relacionadas en la Tabla 5, para cada una de las variables mencionadas en la Tabla 4, se realizó un proceso de interpolación para cada caso, con el fin de construir los mapas tipo raster correspondientes. En cada caso se empleó el método de interpolación de Kriging ordinario. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de la interpolación construida para la variable W10, así como del semivariograma construido y del gráfico de validación cruzada para evaluar el éxito de la interpolación.

En la sección 2.3 y 2.4 del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural, se reportan los resultados de las interpolaciones construidas para todas las variables eólicas y solares listas en la Tabla 4.

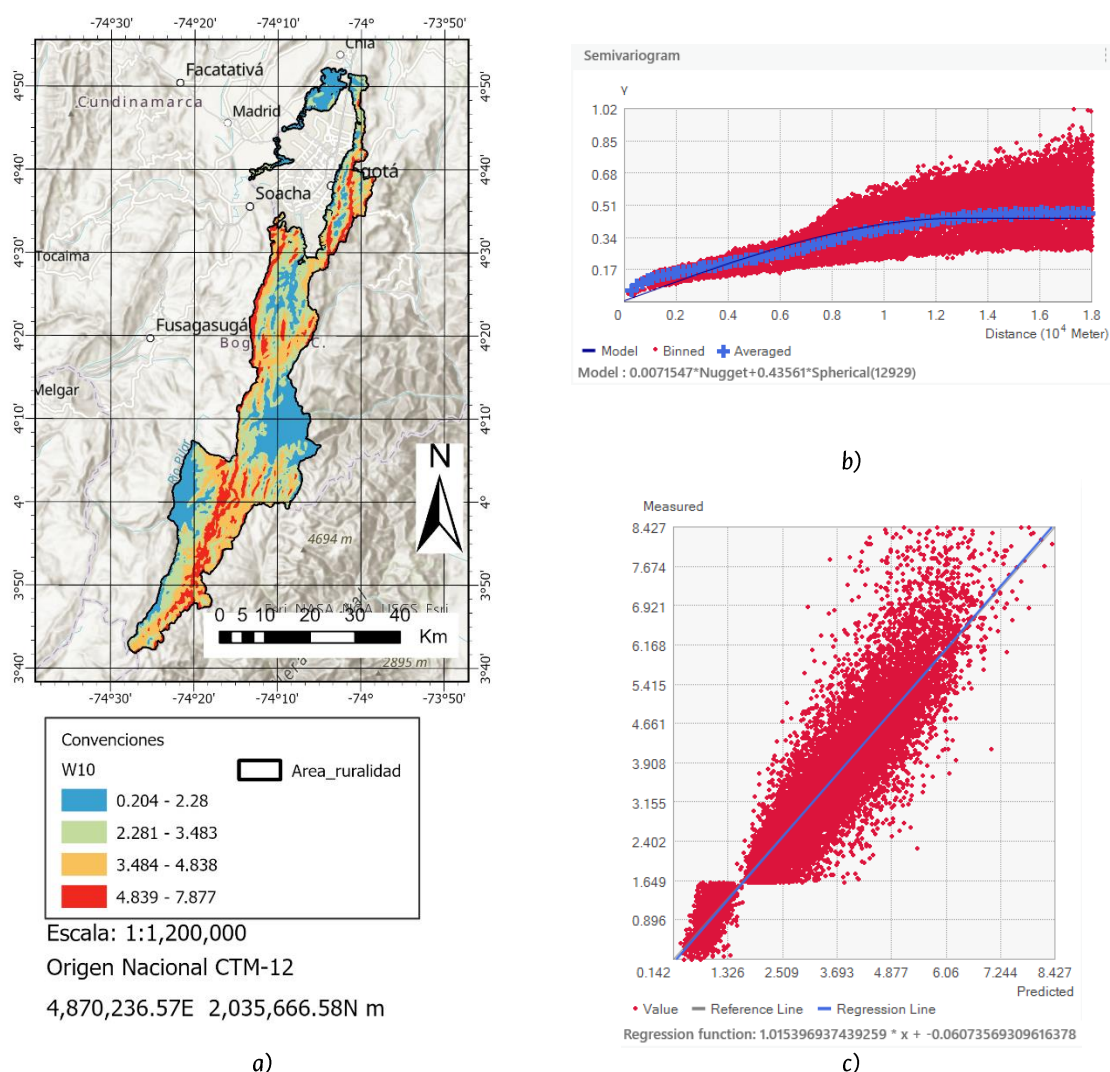


Figura 15. Ejemplo de la interpolación construida empleando Kriging ordinario para la variable W10. a) Mapa construido, b) semivariograma empelado y c) gráfico de validación cruzada.

Mapas de indicadores de potencial de energía eólica y solar

A continuación, se presentan algunos de los mapas construidos y resultados obtenidos para los indicadores de potencial de energía eólica y solar en la ruralidad de Bogotá. El reporte completo de resultados se puede consultar en el *Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

Indicadores de potencial de energía eólica

A partir de las interpolaciones construidas se elaboraron mapas tipo raster, los cuales fueron a su vez procesados empleando herramientas de información geográfica, para obtener el comportamiento de las variables por zonas de la ruralidad. Particularmente, para el análisis sectorizado se empleó la división por veredas y la división por unidades de planeación local o UPLs.

Para la velocidad de viento medida a una altura de 10 m se observa que a nivel mensual multianual sus valores máximos rondan entre 1.6 y 13.2 m/s. El valor promedio de esta variable a nivel mundial es de 8.1 m/s y para Colombia es de 3.5 m/s. La pieza rural en la cual se presentan mayores registros de velocidad de viento es la zona de Sumapaz en los meses de junio, julio y agosto. La pieza rural en la cual se registran los menores valores de viento es en la cuenca el Tunjuelo para los meses de octubre, noviembre y diciembre. Sin embargo, para todos los meses la región de Rural norte es la que menores valores de velocidad de viento registra. En la Tabla 6 se presentan el comportamiento mensual de la velocidad de viento a 10 m de altura para cada una de las UPL de la ruralidad. A nivel anual multianual el máximo promedio de velocidad a 10 m es igual a 3.6 m/s y se registra en Cerros Orientales, mientras que el promedio más bajo es de 2.1 m/s y se ubica en la UPL Rural Norte. En la Tabla 7 se presentan la media multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura para cada una de las UPL de la ruralidad.

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cerros Orientales	Max.	6.9	6.3	6.6	6.7	7.5	11.9	13.0	11.2	10.1	6.9	6.2	7.3
	Min.	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Promedio	2.6	2.5	2.5	2.7	2.9	3.8	4.1	3.7	3.5	2.6	2.2	2.5
	Desv.	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	2.0	2.2	1.9	1.8	1.2	1.1	1.2
Sumapaz	Max.	6.9	6.4	6.7	6.9	7.8	11.9	13.2	11.3	10.6	7.1	6.3	7.2
	Min.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Promedio	2.3	2.3	2.3	2.4	2.6	3.8	4.1	3.6	3.4	2.4	2.2	2.4
	Desv.	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.9	2.1	1.8	1.7	1.1	1.0	1.2
Rural Norte	Max.	2.0	1.6	1.9	2.0	2.3	3.1	3.2	3.0	2.7	2.1	1.8	2.0
	Min.	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
	Promedio	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.5	1.5	1.4	1.3	1.0	0.9	1.0
	Desv.	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3
Cuenca del Tunjuelo	Max.	6.5	6.0	6.4	6.7	7.2	10.8	11.9	10.3	9.3	6.6	6.0	6.8
	Min.	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Promedio	2.3	2.2	2.2	2.3	2.5	3.7	3.9	3.3	3.1	2.3	2.0	2.3
	Desv.	1.1	1.0	1.0	1.1	1.2	1.8	2.0	1.6	1.5	1.1	0.9	1.1

Tabla 6. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].

Sumapaz				Cuenca del Tunjuelo			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
7.6	0.2	3.1	1.4	7.9	1.7	3.5	1.2
Cerros Orientales				Rural Norte			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
7.7	0.9	3.6	1.3	3.8	1.7	2.1	0.2

Tabla 7. Parámetros de la variación del promedio anual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].

Para la velocidad de viento medida a una altura de 50m se observa que a nivel mensual multianual sus valores máximos rondan entre 1.0 y 12.5 m/s. El valor promedio de esta variable a nivel mundial es de 9.7 m/s y para Colombia de 5.0 m/s. La pieza rural en la cual se presentan mayores registros de velocidad de viento es la zona de Sumapaz y cerros orientales en los meses de junio, julio y agosto. La pieza rural en la cual se registran los menores valores de viento es en la cuenca el Tunjuelo para los meses de enero, febrero y marzo. Sin embargo, para todos los meses la región de Rural norte es la que menores valores de velocidad de viento registra. En la Tabla 8 se presentan el comportamiento mensual de la velocidad de viento a 10 m de altura para cada una de las UPL de la ruralidad.

A nivel anual multianual se registran picos máximos de velocidad a 50 m entre 3.8 y 9.0 m/s. El promedio más alto se reporta en la UPL Cerros Orientales con un valor de 5.4 m/s. Así mismo, el promedio mínimo de velocidad a 50 m de altura se reporta en la UPL Rural Norte con un valor de 3.2 m/s. En la Tabla 9 se presentan la media multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura para cada una de las UPL de la ruralidad.

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cerros Orientales	Max.	7.0	7.0	7.0	7.1	7.5	12.5	11.5	11.7	9.0	6.4	5.7	6.7
	Min.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
	Promedio	2.6	2.5	2.5	2.7	2.9	4.0	4.2	3.8	3.5	2.6	2.2	2.5
	Desv. Est.	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.9	2.0	1.8	1.5	1.1	0.9	1.0
Sumapaz	Max.	7.1	6.9	6.9	7.2	7.8	12.3	12.1	11.7	9.3	6.2	5.8	6.2
	Min.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.3	0.2	0.2	0.2
	Promedio	2.8	2.8	2.7	2.8	2.6	4.6	5.0	4.4	4.1	2.9	2.6	2.9
	Desv. Est.	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	2.3	2.5	2.1	1.9	1.2	1.1	1.3
Rural Norte	Max.	1.6	1.6	1.7	1.8	2.2	2.3	1.6	2.2	1.4	1.1	1.0	1.1
	Min.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Promedio	0.4	0.5	0.5	0.5	1.1	0.6	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
	Desv. Est.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Cuenca del Tunjuelo	Max.	5.9	5.7	5.8	6.2	7.2	9.9	10.0	8.7	7.6	5.7	5.1	5.7
	Min.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.3	0.2	0.2	0.2
	Promedio	2.2	2.1	2.1	2.3	2.5	3.5	3.7	3.2	3.0	2.2	1.9	2.2
	Desv. Est.	1.0	0.9	0.9	1.0	1.2	1.7	1.7	1.5	1.3	0.9	0.8	1.0

Tabla 8. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].

Sumapaz				Cuenca del Tunjuelo			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
8.5	0.6	4.3	1.6	8.6	2.7	4.9	1.1
Cerros Orientales				Rural Norte			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
9.0	2.5	5.4	1.3	3.9	2.7	3.2	0.2

Tabla 9. Parámetros de la variación del promedio anual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada pieza rural. Unidades [m/s].

En cuanto al análisis por vereda, en la Figura 16 y Figura 17 se presentan los resultados, sectorizados por veredas, para las variables de velocidad de viento a 10 y 50 m de altura, respectivamente.

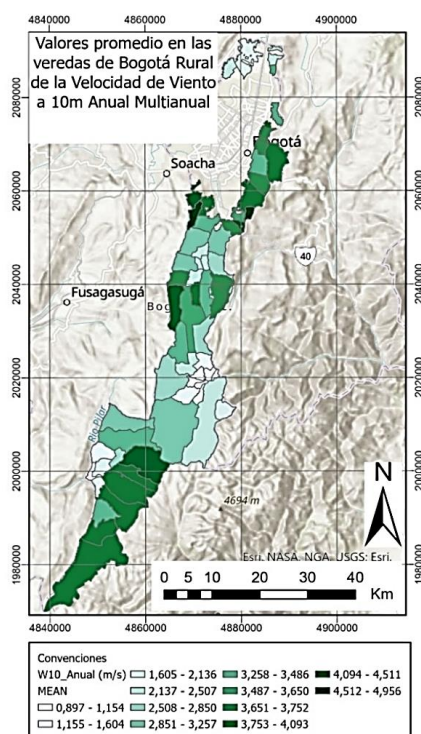


Figura 16. Valor medio del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [m/s].

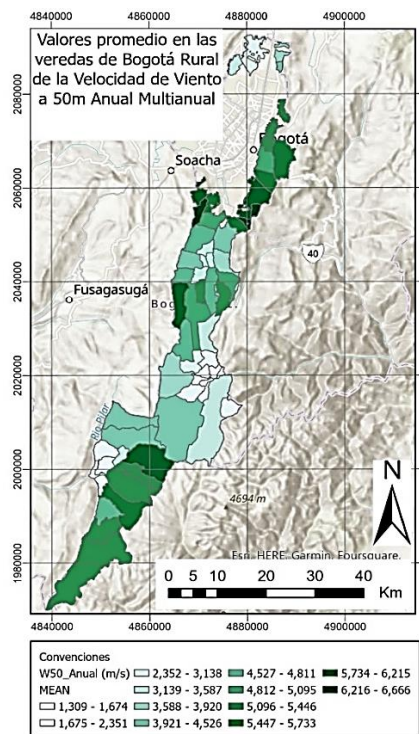


Figura 17. Valor medio del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [m/s].

A partir de esta información, se pudo hacer una clasificación de las veredas, de acuerdo con los valores de potencial energético. Así, en la Figura 18 y Figura 19 se presenta el comportamiento de la velocidad de viento a 10 y 50 m de altura en las veredas con mejor desempeño en este indicador.

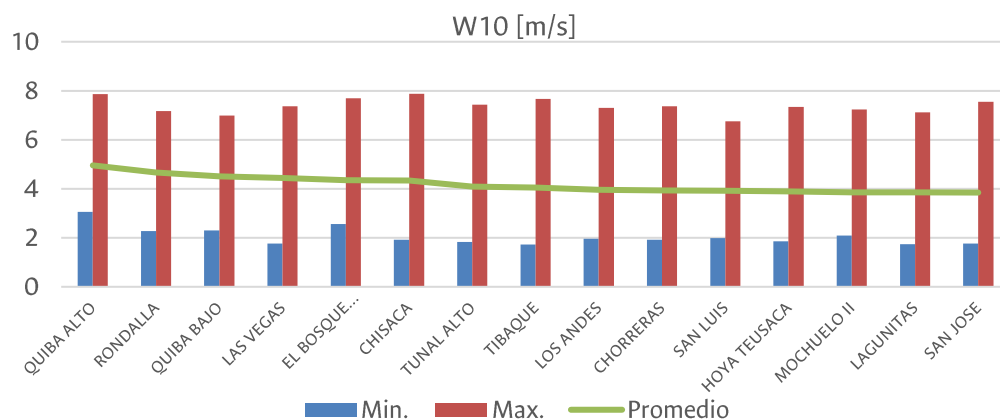


Figura 18. Comportamiento del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 10 m de altura para las 15 veredas con mayor valor promedio.

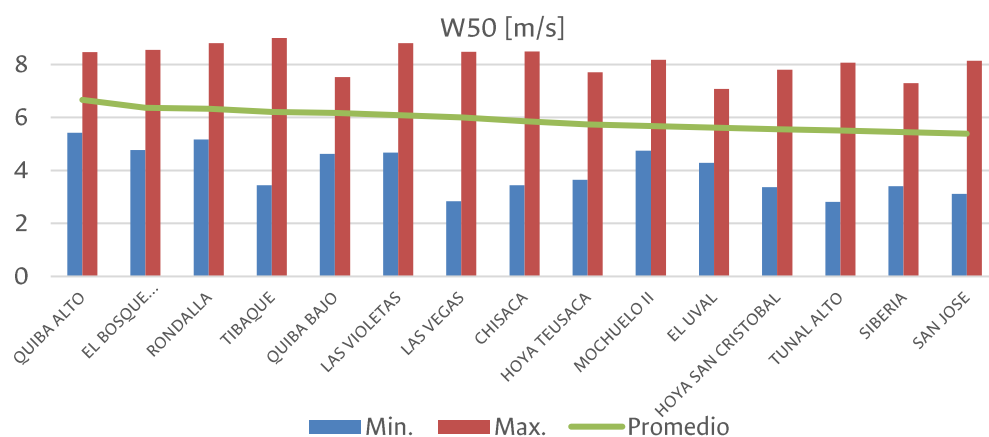


Figura 19. Comportamiento del promedio anual multianual de la velocidad de viento a 50 m de altura para las 15 veredas con mayor valor promedio.

Un reporte completo de los resultados obtenidos para los indicadores de potencial de energía eólica en la ruralidad bogotana se incluye en la sección 2.6 *Análisis de los indicadores de energía eólica y solar por zonas de la ruralidad del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

Indicadores de potencial de energía solar

De forma similar, para el caso de los indicadores de energía solar se calcularon interpolaciones y se construyeron los mapas tipo raster con la ayuda de una herramienta de información geográfica. A partir de estos mapas se pudieron estimar los comportamientos por sectores (UPLs o veredas).

De esta forma, en la Tabla 10 se presenta el comportamiento mensual de la irradiación global horizontal para las diferentes UPLs de la ruralidad bogotana. Para la irradiación global horizontal se observa que a nivel mensual multianual sus valores máximos rondan entre 3.1 y 6.3 (kW.h/m²/día) y sus valores mínimos entre 1.6 y 5.8 (kW.h/m²/día). El valor promedio de esta variable a nivel mundial es de 4.6 kWh/m²/día, y para Colombia de 4.9 kWh/m²/día. La pieza rural en la cual se presentan mayores

registros de irradiación global horizontal es la cuenca del Tunjuelo en los meses de marzo, abril y mayo. La pieza rural en la cual se registran los menores valores de densidad de potencia es en Sumapaz para los meses de septiembre, octubre y noviembre.

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cerro Orientales	Max.	3.8	4.4	5.5	6.0	5.3	4.1	3.5	3.3	3.6	3.8	3.7	3.8
	Min.	3.4	3.4	5.0	5.5	4.6	3.6	2.9	2.5	2.1	2.0	2.2	3.3
	Promedio	3.5	3.9	5.2	5.7	5.0	3.8	3.2	2.9	2.8	2.9	3.0	3.5
	Desv. Est.	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.4	0.1
Sumapaz	Max.	3.4	4.4	5.6	6.2	5.3	3.8	3.1	3.4	3.7	4.2	3.9	3.4
	Min.	2.5	3.0	4.2	4.5	3.6	2.8	2.0	1.9	1.6	1.7	1.6	2.2
	Promedio	3.1	3.6	5.1	5.6	4.6	3.4	2.8	2.8	2.9	3.1	2.9	3.1
	Desv. Est.	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.5	0.2
Rural Norte	Max.	3.8	4.5	5.6	6.1	5.3	4.3	3.7	3.3	3.5	3.8	3.7	3.7
	Min.	3.6	4.2	5.4	5.8	5.1	4.0	3.5	3.2	3.2	3.4	3.4	3.5
	Promedio	3.8	4.5	5.5	6.0	5.2	4.2	3.6	3.2	3.4	3.6	3.6	3.7
	Desv. Est.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
Cuenca del Tunjuelo	Max.	3.9	4.5	5.7	6.3	5.6	4.3	3.7	3.6	3.9	4.2	4.1	4.2
	Min.	2.7	2.9	4.5	4.7	3.7	2.9	2.6	2.5	2.0	2.1	2.2	2.9
	Promedio	3.4	3.9	5.3	5.8	5.0	3.7	3.0	2.8	2.8	2.9	2.9	3.3
	Desv. Est.	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2

Tabla 10. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de la irradiación global horizontal dentro de cada pieza rural. Unidades [kWh/m²/día].

A nivel anual multianual mayor promedio se registra en la cuenca del Tunjuelo con un valor de 4.5 (kW.h/m²/día), mientras que el promedio más bajo es de 3.6 (kW.h/m²/día) correspondiente a la UPL Sumapaz. En la Tabla 11 se reporta el comportamiento del promedio anual multianual para cada una de las UPL de la ruralidad.

Sumapaz				Cuenca del Tunjuelo			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
4.1	2.3	3.6	0.2	4.5	3.3	3.8	0.2
Cerro Orientales				Rural Norte			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
4.3	3.4	3.8	0.2	4.4	4.1	4.3	0.0

Tabla 11. Parámetros de la variación del promedio anual de la irradiación global horizontal dentro de cada pieza rural. Unidades [kWh/m²/día].

Con respecto a la variable brillo solar, se realizó el análisis sectorizado correspondiente. Se observa que a nivel mensual multianual sus valores máximos rondan entre 2.3 y 4.6 [h/día] y sus valores mínimos entre 1.1 y 4.2 [h/día]. El valor promedio de esta variable a nivel mundial es de 5.5 [h/día], y para Colombia de 6.7 [h/día]. La pieza rural en la cual se presentan mayores registros de brillo solar es la cuenca del Tunjuelo en los meses de marzo, abril y mayo. La pieza rural en la cual se registran los menores valores de brillo solar es en Sumapaz para los meses de septiembre, octubre y noviembre. En la Tabla 15 se presenta el comportamiento mensual del brillo solar en cada una de las UPL de la ruralidad.

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cerros Orientales	Max.	2.8	3.2	4.1	4.4	3.9	3.0	2.6	2.5	2.6	2.8	2.7	2.8
	Min.	2.5	2.5	3.7	4.0	3.4	2.7	2.2	1.9	1.5	1.5	1.6	2.4
	Promedio	2.6	2.9	3.8	4.2	3.7	2.8	2.4	2.1	2.1	2.1	2.2	2.6
	Desv. Est.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.1
Sumapaz	Max.	2.5	3.3	4.1	4.6	3.9	2.8	2.3	2.5	2.7	3.1	2.8	2.5
	Min.	1.8	2.2	3.1	3.2	2.6	2.1	1.4	1.4	1.1	1.2	1.1	1.6
	Promedio	2.3	2.6	3.7	4.1	3.4	2.5	2.1	2.1	2.1	2.3	2.2	2.3
	Desv. Est.	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
Rural Norte	Max.	2.8	3.3	4.1	4.5	3.9	3.1	2.7	2.4	2.6	2.8	2.7	2.8
	Min.	2.6	3.1	4.0	4.2	3.7	3.0	2.6	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6
	Promedio	2.8	3.3	4.1	4.4	3.9	3.1	2.7	2.4	2.5	2.7	2.6	2.7
	Desv. Est.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
Cuenca del Tunjuelo	Max.	2.9	3.3	4.2	4.6	4.1	3.1	2.7	2.6	2.8	3.1	3.0	3.1
	Min.	1.9	2.1	3.3	3.3	2.7	2.2	1.9	1.8	1.5	1.5	1.6	2.1
	Promedio	2.5	2.9	3.9	4.3	3.7	2.7	2.2	2.1	2.0	2.1	2.1	2.5
	Desv. Est.	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2

Tabla 12. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].

Sumapaz				Cuenca del Tunjuelo			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
3.0	1.7	2.7	0.1	3.3	2.4	2.8	0.2
Cerros Orientales				Rural Norte			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
3.2	2.5	2.8	0.2	3.2	3.0	3.2	0.0

Tabla 13. Parámetros de la variación del promedio anual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].

A nivel anual multianual, el promedio más alto se registra en la UPL Rural Norte con un valor de 3.2 [h/día], mientras que el promedio más bajo se presenta en Sumapaz con un valor de 2.7 [h/día]. En la Tabla 14 se reporta el comportamiento del promedio anual multianual del brillo solar en las UPL de la zona rural.

Con respecto al análisis por veredas, en la Figura 20 se presenta el mapa construido para el comportamiento de la irradiación global horizontal para las veredas de la ruralidad y en la Figura 22 se presenta el comportamiento de esta variable en las 15 veredas con mejores registros de irradiación.

Sumapaz				Cuenca del Tunjuelo			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
3.0	1.7	2.7	0.1	3.3	2.4	2.8	0.2
Cerros Orientales				Rural Norte			
Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.	Max.	Min.	Promedio	Desv. Est.
3.2	2.5	2.8	0.2	3.2	3.0	3.2	0.0

Tabla 14. Parámetros de la variación del promedio anual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cerros Orientales	Max.	2.8	3.2	4.1	4.4	3.9	3.0	2.6	2.5	2.6	2.8	2.7	2.8
	Min.	2.5	2.5	3.7	4.0	3.4	2.7	2.2	1.9	1.5	1.5	1.6	2.4
	Promedio	2.6	2.9	3.8	4.2	3.7	2.8	2.4	2.1	2.1	2.1	2.2	2.6
	Desv. Est.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.1
Sumapaz	Max.	2.5	3.3	4.1	4.6	3.9	2.8	2.3	2.5	2.7	3.1	2.8	2.5
	Min.	1.8	2.2	3.1	3.2	2.6	2.1	1.4	1.4	1.1	1.2	1.1	1.6
	Promedio	2.3	2.6	3.7	4.1	3.4	2.5	2.1	2.1	2.1	2.3	2.2	2.3
	Desv. Est.	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
Rural Norte	Max.	2.8	3.3	4.1	4.5	3.9	3.1	2.7	2.4	2.6	2.8	2.7	2.8
	Min.	2.6	3.1	4.0	4.2	3.7	3.0	2.6	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6
	Promedio	2.8	3.3	4.1	4.4	3.9	3.1	2.7	2.4	2.5	2.7	2.6	2.7
	Desv. Est.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
Cuenca del Tunjuelo	Max.	2.9	3.3	4.2	4.6	4.1	3.1	2.7	2.6	2.8	3.1	3.0	3.1
	Min.	1.9	2.1	3.3	3.3	2.7	2.2	1.9	1.8	1.5	1.5	1.6	2.1
	Promedio	2.5	2.9	3.9	4.3	3.7	2.7	2.2	2.1	2.0	2.1	2.1	2.5
	Desv. Est.	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2

Tabla 15. Parámetros de la variación del promedio mensual multianual de brillo solar dentro de cada pieza rural. Unidades [h/día].

De forma similar, en la Figura 21 se muestran los resultados obtenidos para la variable de brillo solar en las 66 veredas de la ruralidad bogotana, mientras que en la Figura 23 se reportan las 15 veredas con valores de brillo solar más alto de la ruralidad.

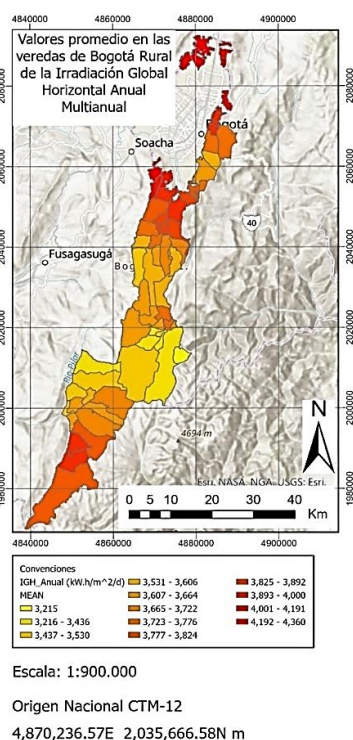


Figura 20. Valor medio del promedio anual multianual de la irradiación global horizontal dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [kWh/m²/día].

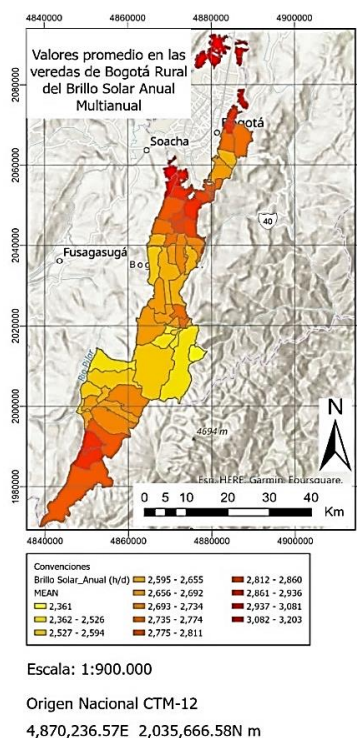


Figura 21. Valor medio del promedio anual multianual del brillo solar dentro de cada una de las veredas de la ruralidad. Unidades [h/día].

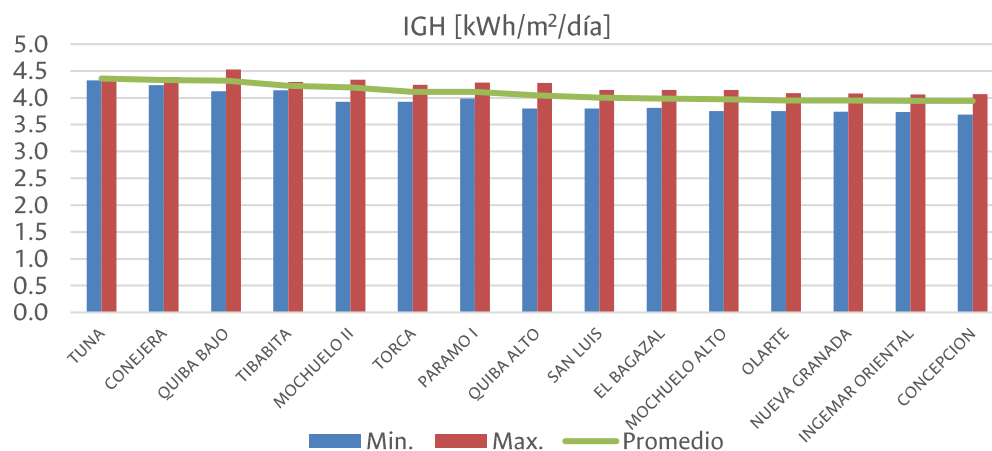


Figura 22. Comportamiento del promedio anual multianual de la irradiación global horizontal para las 15 veredas con mayor valor promedio.

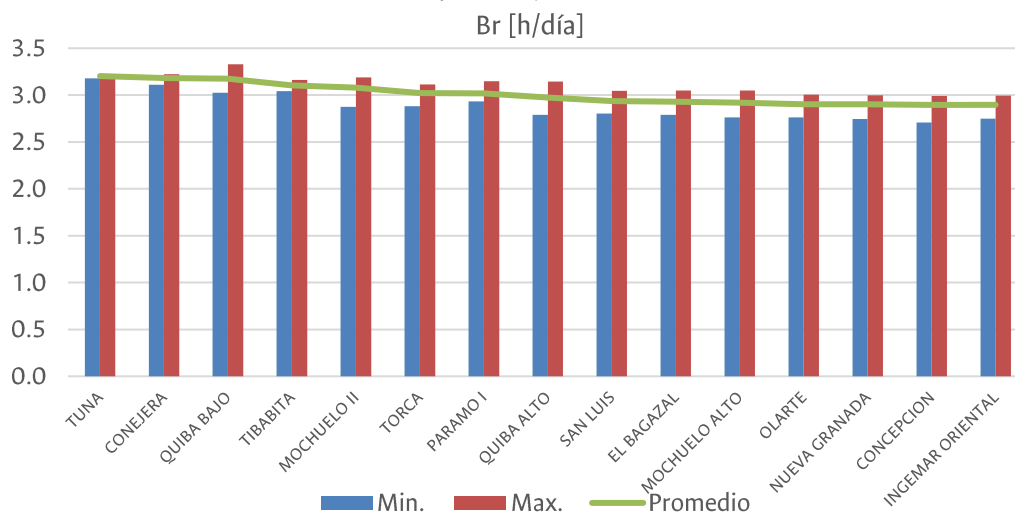


Figura 23. Comportamiento del promedio anual multianual del brillo solar para las 15 veredas con mayor valor promedio.

Un reporte completo de los resultados obtenidos para los indicadores de potencial de energía solar en la ruralidad bogotana se incluye en la sección 2.6 *Análisis de los indicadores de energía eólica y solar por zonas de la ruralidad del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

3.2. Potencial de energía hidráulica

En esta sección resume brevemente la metodología desarrollada para el cálculo del potencial de aprovechamiento hidráulico. En términos generales, la energía hidráulica se puede producir de dos maneras: la primera es la convencional en la que se aprovecha la energía potencial del agua (caída de elevación) y la segunda es con el aprovechamiento de energía hidrocínética (velocidad del agua). En el contexto del presente trabajo se plantearon y calcularon dos tipos de indicadores de potencial de energía hidráulica: hidrocínético y gravitacional. En ambos casos, la metodología de cálculo se

implementó dentro de una herramienta de información geográfica, lo cual facilitó la generación de mapas y el análisis de los mismos para producir información sectorizada por veredas o UPLs dentro de la ruralidad.

Metodología para el cálculo del potencial de energía hidráulica en la ruralidad de Bogotá

Se construyó una metodología para el cálculo del potencial teórico de aprovechamiento hidráulico convencional e hidrocínético en el área de la ruralidad de Bogotá basada en información disponible del IDEAM (ENA 2022) y del modelo de elevación digital (Alos Palsar). Esta metodología tuvo como fin abordar el problema de cuantificación de la potencia hidráulica a partir de las fuentes de información disponibles, dado que, por la falta de estaciones de monitoreo que brinden una cobertura suficiente y estudios detallados de la hidrodinámica de los ríos de la ruralidad bogotana, no se conoce la velocidad ni el caudal de las corrientes hídricas de la zona.

Aquí la adaptación se basó en la información disponible. Para calcular el potencial de generación hidrocínética, tanto gravitacional como hidrocínética, es fundamental obtener el caudal en cada tramo de la red de drenajes. Como consecuencia, se plantearon los diagramas de flujo de la Figura 24 y la Figura 25. Para ambos métodos se tomó como insumo los rendimientos hídricos calculados en el ENA 2022 de las subzonas hidrográficas (SZH) que cubren el área del proyecto Bogotá Rural. Adicionalmente, se tiene como insumo el ráster de acumulación de flujo generado a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) disponible y la pendiente del cauce.

El cálculo de los indicadores involucró el cómputo de cantidades como la acumulación y la dirección de flujo, además de operaciones de rasterización y álgebra de mapas. Todos estos procesos se realizaron empleando las herramientas del software de información geográfica ArcGIS.

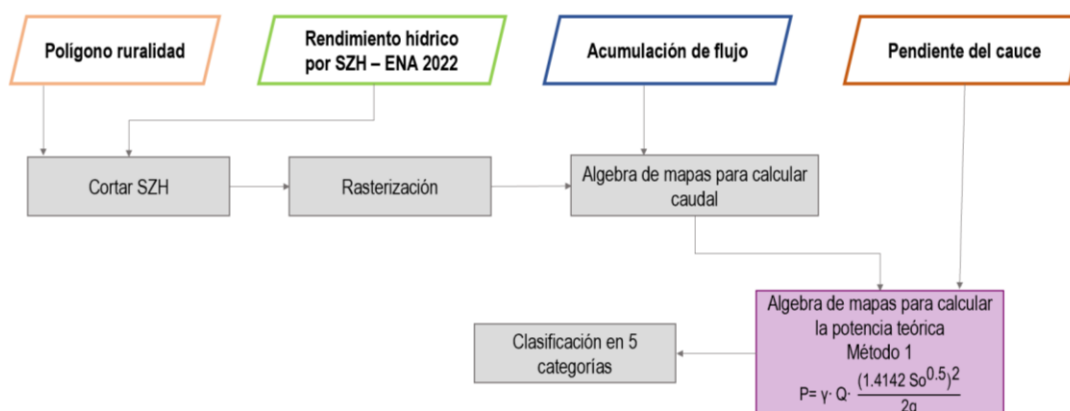


Figura 24. Diagrama de flujo para el cálculo del potencial hidráulico convencional – Método 1.

Una descripción completa de la metodología empleada para el cálculo de los dos indicadores de potencial hidráulico trabajados en el proyecto puede ser consultada en la sección 3.6. Marco metodológico para el cálculo de los indicadores de potencial de energía hidráulica del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.

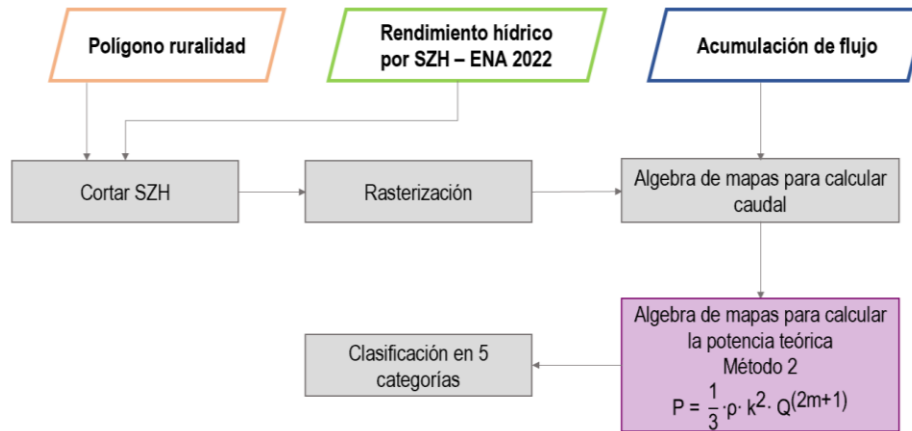


Figura 25. Diagrama de flujo para el cálculo del potencial hidrocínético – Método 2.

Mapas de indicadores de potencial de energía hidráulica

A partir de la metodología descrita en la sección anterior, se calcularon los indicadores de potencial de energía hidráulica, tanto gravitacional como hidrocínética. Así, en la Figura 26 se presenta el mapa de potencial por energía gravitacional calculado para los afluentes de la ruralidad y en la Figura 27 se muestra el mapa con el potencial de energía hidrocínética calculado para los afluentes de la zona rural.

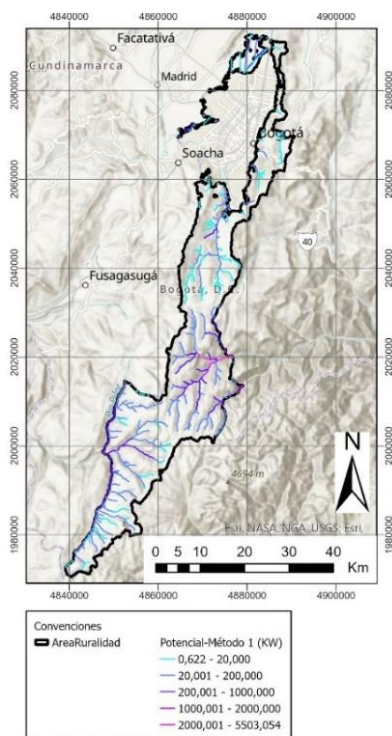


Figura 26. Indicador de potencial hidráulico gravitacional – Método 1 para 100 m.

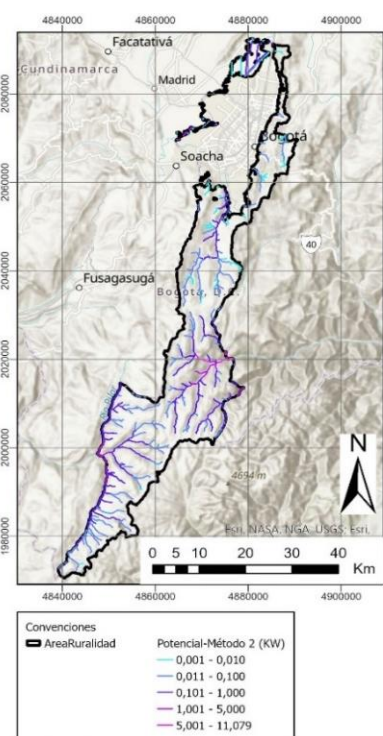


Figura 27. Indicador de potencial hidrocínético – Método 2 para 100 m.

El análisis de estos mapas por sectores permitió determinar el potencial consolidado en cada una de las UPL de la zona rural. En la Tabla 16 y Tabla 17 se reporta el potencial calculado para cada UPL y el indicador por unidad de área. Como se puede apreciar en estas tablas y en los gráficos de torta de la Figura 28 y Figura 29, la UPL que exhibe el mayor potencial hídrico es Sumapaz con cerca del 60% de potencial total de la ruralidad. Esto se verifica en cualquiera de las dos metodologías empeladas para el cálculo. Por su parte, la UPL Cerros Orientales muestra un potencial notablemente menor, el cual solo representa aproximadamente el 2% del potencial rural total.

Este resultado se ajusta bastante bien con las observaciones realizadas en las diferentes visitas a campo realizadas. No obstante, se debe recordar que cualquiera que sea el indicador de potencial empelado, éste debe ser evaluado en el contexto de las características específicas del cauce y otros factores que viabilizan la instalación de una turbina para la recuperación de energía.

NOMBRE UPL	POTENCIA ACUMULADA [kW]	POTENCIA ACUMULADA POR UNIDAD ÁREA [kW/km ²]
Cerros Orientales	10619	75.7
Sumapaz	1809473	2318.8
Rural Norte	43266	1137.2
Cuenca Río Tunjuelo	89808	325.3

Tabla 16. Potencia acumulada UPL- Método 1.

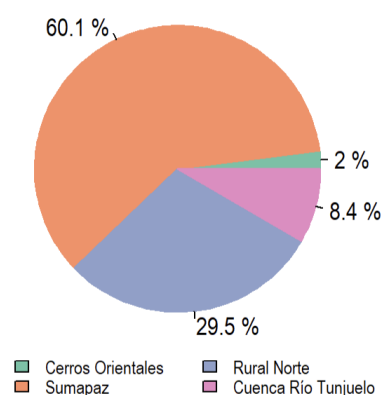


Figura 28. Distribución porcentual de la potencia acumulada por unidad de área UPL - Método 1.

NOMBRE UPL	POTENCIA ACUMULADA [kW]	POTENCIA ACUMULADA POR UNIDAD ÁREA [kW/km ²]
Cerros Orientales	29.1	2.6
Sumapaz	3376.2	55.0
Rural Norte	101.3	33.8
Cuenca Río Tunjuelo	186.8	8.6

Tabla 17. Potencia acumulada UPL- Método 2.

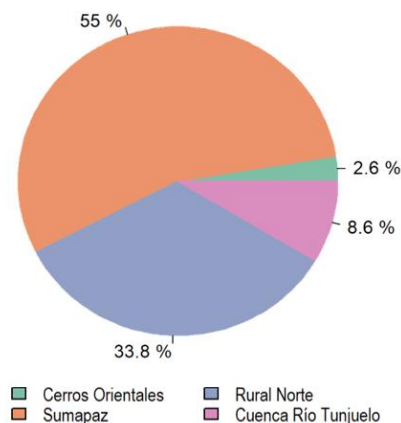


Figura 29. Distribución porcentual de la potencia acumulada por unidad de área UPL - Método 2.

Al igual que en los casos anteriores, el análisis por sectores también se realizó a nivel de veredas, obteniendo un valor medio para cada una de las 66 veredas de la ruralidad. En los mapas de la Figura 30 y Figura 31 se muestra el resultado de este análisis, para cada una de las dos metodologías de cálculo empleadas.

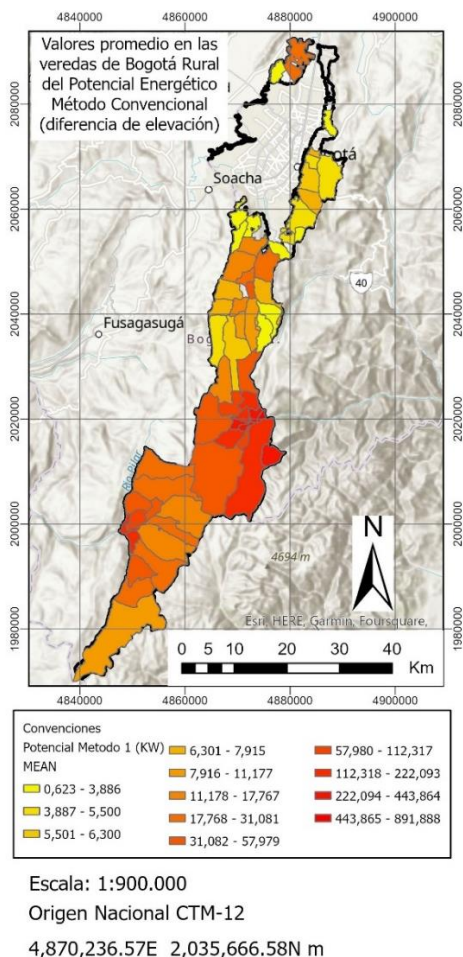


Figura 30. Valor promedio por vereda del indicador de potencial hidráulico – Método 1. Unidades [kW].

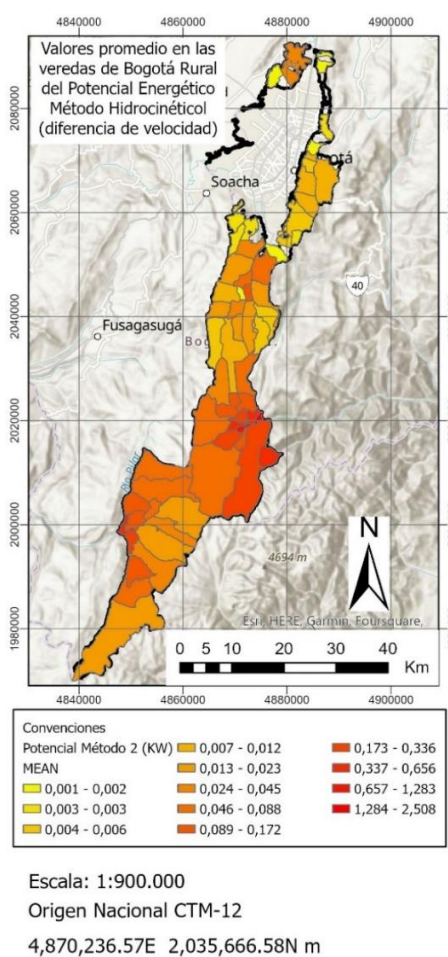


Figura 31. Valor promedio por vereda del indicador de potencial hidrocinético – Método 2. Unidades [kW].

Luego de la ejecución de la metodología, se recomienda el uso de generadores convencionales (a filo de agua) para las zonas altas de las cuencas y de generadores hidrocinéticos para zonas bajas de las mismas.

A partir de este ejercicio se identificó que la región de Sumapaz es la UPL que tiene mayor potencial de generación de energía hidráulica. Aunque los valores máximos de potencia teórica hidráulica se calcularon para los tramos de ríos de mayor caudal, se identifica que en diversos tramos de la UPL Sumapaz las magnitudes se encuentran en la categoría desde 200 hasta 1000 kW (método 1, a filo de agua). Lo cual sugiere que en estos tramos deberían realizarse estudios con mayor detalle que permitan identificar puntos óptimos para la instalación de sistemas de aprovechamiento.

El reporte completo de los indicadores de potencial de energía hidráulica se puede consultar en la sección 3.11. *Indicador de potencial teórico del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

3.3. Potencial de energía por biomasa

Metodología para el cálculo del potencial energético de la biomasa residual de la ruralidad de Bogotá

Así como para los indicadores de potencial eólico, solar e hidráulico, para el caso del cálculo de indicadores de potencial por energía por biomasa se planteó una metodología específica. En la Figura 32 se resume la metodología empleada para el cálculo de los indicadores definidos para el potencial energético por biomasa. Particularmente, para la etapa de identificación de fuentes de biomasa residual se emplearon los datos de producción agrícola y de tenencia de animales procedentes del Censo Nacional Agropecuario de 2014 [6], el cual contiene la información oficial más actualizada con que se cuenta actualmente. Esta información fue organizada, fue procesada y georeferenciada para cada una de las veredas de la ruralidad.

El cálculo del potencial energético requirió de la determinación de la cantidad de residuo generada por tipo de producto agrícola o pecuario y las propiedades energéticas específicas de los mismos. Estos valores se obtuvieron en la etapa 2, a partir de información consignada en literatura especializada y en reuniones con actores y visitas presenciales a los lugares de producción. Esta recopilación de información permitió la consolidación de una base de datos que será de utilidad para estudios posteriores en el campo del aprovechamiento de la biomasa residual.

En la etapa 3 se cuantificó el potencial energético como la energía total contenida en los principales residuos generados en actividades agrícolas y pecuarias en la ruralidad de Bogotá. Finalmente, la información georeferenciada se empleó para construir los mapas de potencial energético para cada una de las veredas de la ruralidad. Dada la amplia variedad de actividades agropecuarias que generan residuos de biomasa y para los cuales se realizó el cálculo del potencial energético, se decidió agrupar estos residuos en cinco grupos de productos: de animales, de cultivos de flores, de cultivos de tubérculos, de cultivos de frutas y de cultivos de hortalizas. Adicionalmente, se calculó el potencial consolidado en cada vereda, adicionando el aporte de cada uno de los grupos de residuos al potencial total.

Etapas	Recursos	Resultado
Etapas 1: Identificación fuentes de biomasa residual	Estadísticas georreferenciadas de producción agrícola y pecuaria	Cantidad de producto obtenido o cantidad de animales criados
Etapas 2: Determinación de propiedades de la biomasa residual	Literatura especializada, informes técnicos, visitas y entrevistas	Base de datos con información de propiedades de la biomasa residual
Etapas 3: Cuantificación del potencial energético por tipo de residuo	Información de la base de datos y producción georreferenciada	Potencial energético por tipo de residuo y escenario de aprovechamiento
Etapas 4: Generación de mapas de potencial energético	Mapas de georreferenciación de la ruralidad de Bogotá	Mapas de potencial energético de biomasa residual

Figura 32. Metodología resumida para la determinación del potencial de biomasa residual de la ruralidad de Bogotá.

En este proyecto la cuantificación del potencial energético de la biomasa residual se realizó para dos escenarios de aprovechamiento, que permiten definir dos potenciales. Los escenarios se establecen de acuerdo con la potencialidad de generación de energía de los residuos identificados así:

- **Escenario de aprovechamiento por medio de procesos termoquímicos (Aprovechamiento térmico):** El potencial energético se determina con base en la máxima cantidad de energía que puede ser obtenida de la biomasa cuando se somete a un proceso de combustión. El tipo de aprovechamiento corresponde a aquel en el cual la biomasa se somete a procesos termoquímicos de transformación que incluyen la combustión directa de la biomasa y los procesos de pirólisis, gasificación y licuefacción en los cuales los productos obtenidos de cada proceso son sometidos posteriormente a combustión.
- **Escenario de aprovechamiento por el proceso bioquímico de digestión anaeróbica (Aprovechamiento biodigestión):** En este escenario se determina el potencial energético de la biomasa residual partiendo de un aprovechamiento por medio de digestión anaeróbica. Su determinación se realiza a partir de los valores de potencial bioquímico de metano (PBM) que permite obtener la cantidad de biogás que se obtiene por unidad de masa del residuo. El potencial energético se determina con base en el poder calorífico inferior del biogás generado.

Los detalles completos de la metodología empleada para calcular los indicadores se encuentran descritos en la sección 4.2 *Metodología para el cálculo del potencial energético de la biomasa residual de la ruralidad de Bogotá* del Producto 3. *Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

De esta manera, para cada una de las veredas y grupos de productos definidos, se calcularon dos tipos de indicador de potencial energético derivado de la biomasa residual. En la Figura 33 se presenta el

potencial energético en el escenario de aprovechamiento térmico para los productos más importantes de la ruralidad. Se destaca el potencial energético de los residuos animales, especialmente del estiércol bovino. De forma complementaria, en la Figura 34 se reporta el valor del indicador de energía en el escenario de aprovechamiento mediante digestión anaerobia para los principales grupos de productos trabajados.

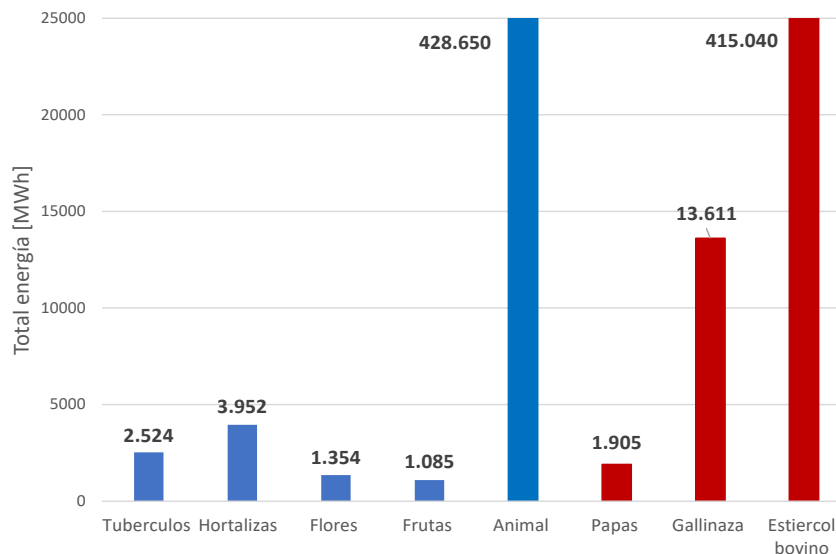


Figura 33. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico para los residuos generados en los cultivos principales de la ruralidad de Bogotá.

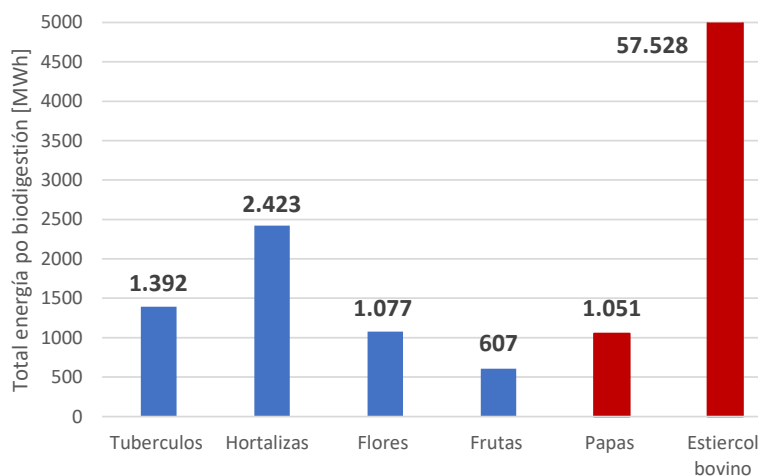


Figura 34. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento por biodigestión para los residuos generados en los cultivos principales de la ruralidad de Bogotá.

Es de notar que, aunque el potencial energético exhibido por los residuos de flores no representa el mayor valor entre el grupo de productos analizados, este tipo de residuo tienen la ventaja de encontrarse concentrado en ubicaciones específicas (especialmente en cultivos del norte de la ruralidad), lo cual permite su fácil aprovechamiento. Por el contrario, los residuos de animales y de cultivos de hortalizas, los cuales reportan importantes niveles de potencial, se generan de forma distribuida en amplias zonas

de cada vereda, lo cual implica que su aprovechamiento requiere mecanismos y protocolos para su recolección y acumulación en puntos específicos.

Mapas de indicadores de potencial de energía de biomasa

A partir de la metodología descrita en la sección anterior, se calcularon los indicadores de potencial energético por biomasa, los cuales se incorporaron en mapas para facilitar su consulta y análisis. Así, por ejemplo, en la Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se presenta el potencial de energía térmica asociada a los cinco grupos de productos analizados en el proyecto. Mientras que en la Figura 40 se reporta el potencial de energía térmica consolidado para la ruralidad.

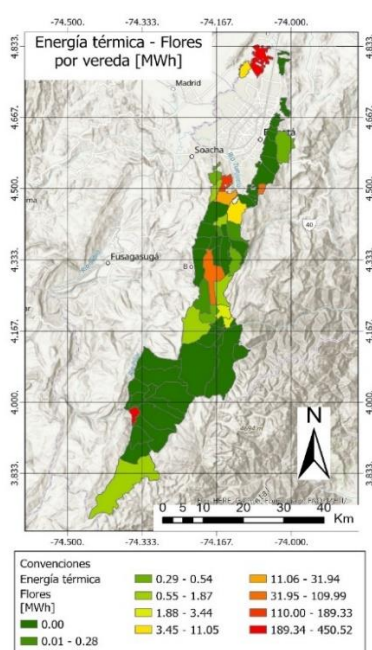


Figura 35. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a las flores por veredas. Unidades [kW].

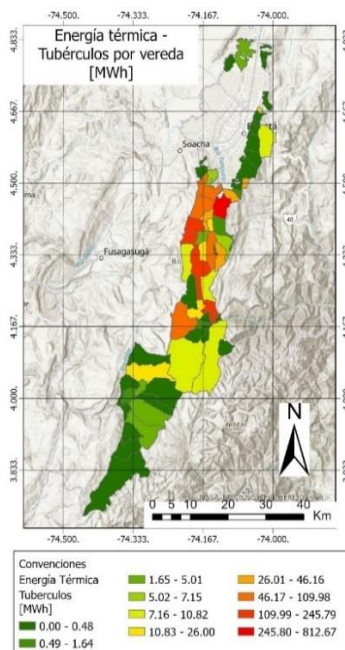


Figura 36. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a los tubérculos por veredas. Unidades [kW].

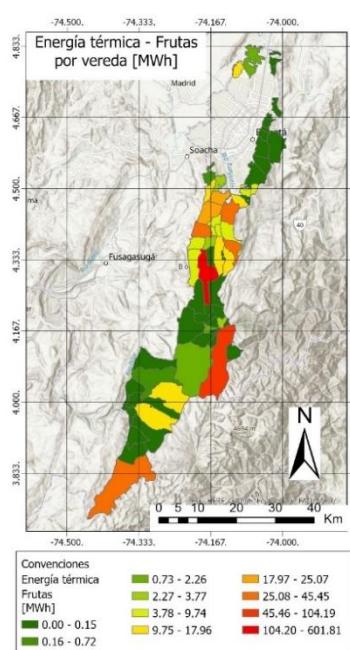


Figura 37. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a las frutas por veredas. Unidades [kW].

En la Figura 41 se presenta el valor de energía térmica total aprovechable a partir de la biomasa, para las quince veredas con mejores cifras de potencial energético. Este valor consolida el aporte de todos los grupos de residuos de productos analizados. Se destaca la vereda La Conejera, la cual no solo presenta el mayor valor de potencial energético, sino que también presenta el mayor valor de energía disponible por unidad de área. En este sentido, también se destaca las veredas Rondalla y Pasquillita, con valores de potencial energético por unidad de área similares a los de la vereda La Conejera, aunque con valores de disponibilidad neta total muy inferiores debido a las menores áreas de estas veredas.

De forma similar, en la Figura 42 se presentan las quince veredas con mejores valores de potencial de energía por biomasa, considerando el escenario de aprovechamiento por digestión anaerobia. Al igual

que en la Figura 41, en esta gráfica se reporta el valor total considerando los cinco grupos de residuos analizados. En este indicador nuevamente se destaca la vereda La Conejera, no solo en términos de potencial energético, sino en término de potencial por unidad de área. Considerando el indicador energético por unidad de área, también se destacan las veredas Rodalla y Pasquillita, las cuales reportan valores de potencial similares a los encontrados en La Conejera.

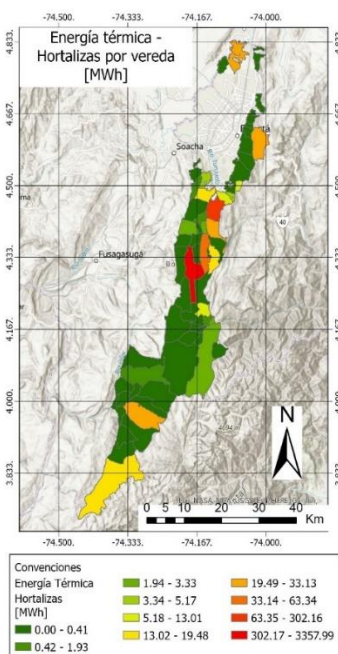


Figura 38. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociada a las hortalizas por veredas. Unidades [kW].

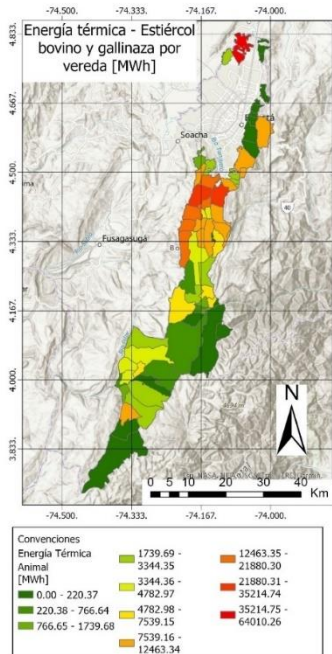


Figura 39. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico asociado a los residuos generados por animales por veredas. Unidades [kW].

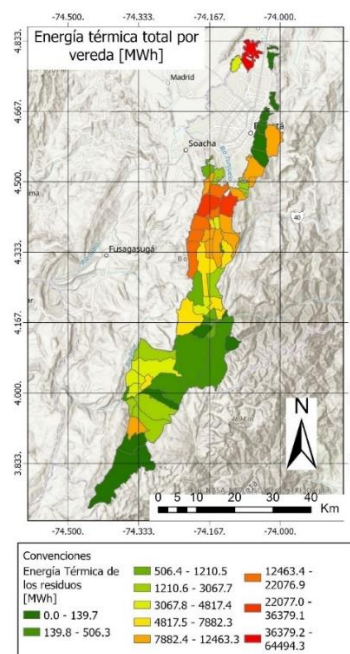


Figura 40. Potencial energético para el escenario de aprovechamiento térmico por veredas. Unidades [kW].

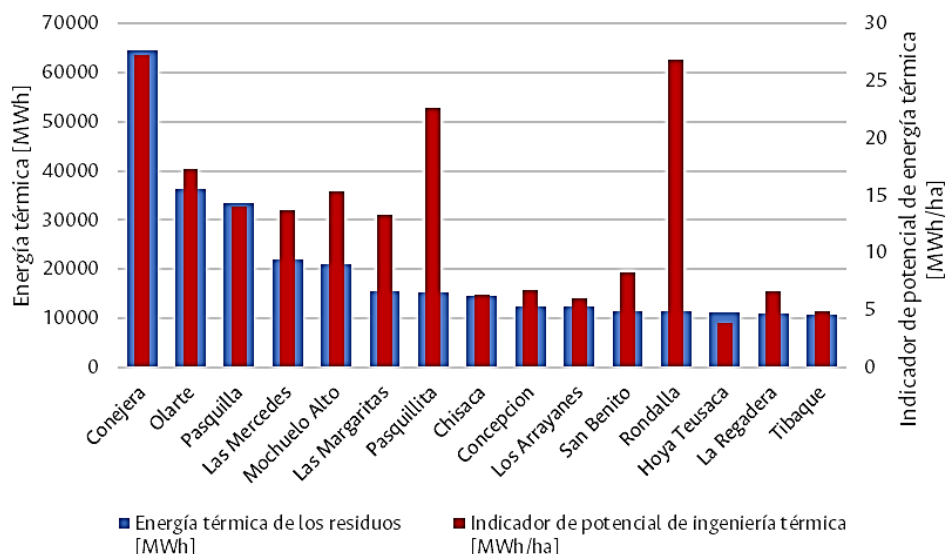


Figura 41. Comportamiento de la energía térmica de la biomasa para las 15 veredas con mayor potencial energético.

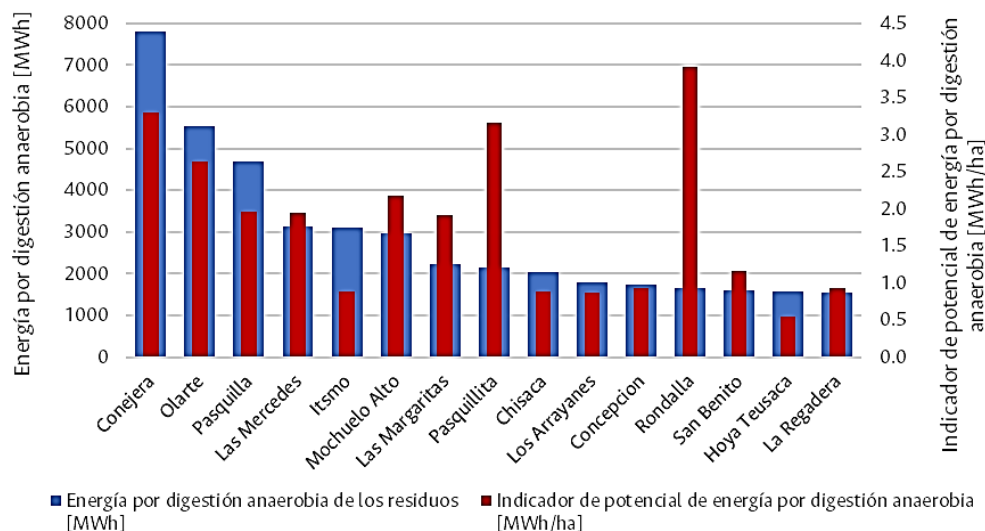


Figura 42. Comportamiento de la energía por digestión anaerobia de la biomasa para las 15 veredas con mayor potencial energético.

El reporte completo de los indicadores de potencial energético asociado a la biomasa residual se puede consultar en la sección 4. y 5. *Resultados del potencial energético de la biomasa residual de la ruralidad de Bogotá del Producto 3. Descripción de los indicadores de potencial de aprovechamiento de energía renovable, análisis de los indicadores calculados y definición del potencial energético de la biomasa en el territorio rural.*

4. MÓDULOS PARA LA VISUALIZACIÓN DE INDICADORES DE POTENCIAL ENERGÉTICO

Otro de los objetivos del proyecto consistió en consignar los indicadores de potencial de energías renovables calculados, dentro de un atlas digital que facilitara la consulta de esta información. De esta manera, se definió, junto con el equipo técnico de la SDP, que el atlas digital debería alojarse dentro de la plataforma Bogotá Rural de dicha entidad.

En el marco de este alcance, las tareas comenzaron identificando las historias de usuario asociadas al nuevo módulo y de los requerimientos necesarios para desarrollar una solución compatible tecnológicamente con la plataforma Bogotá Rural.

Se diseñaron, desarrollaron y desplegaron dos módulos diferentes:

- Módulo 1: Atlas de energías renovables de la ruralidad bogotana.
- Módulo 2: Visualización de información de las estaciones meteorológicas.

4.1. Módulo 1: Atlas de energías renovables de la ruralidad de Bogotá

El objetivo y las funcionalidades de este módulo se enfocan en la visualización de los indicadores de potencial de energía renovable calculados en el contexto del presente proyecto y descritos en la sección 3 del presente documento.

Como se mencionó previamente, este módulo fue desarrollado para que estuviera alojado dentro de la plataforma Bogotá Rural. El acceso al módulo se puede hacer, dentro del entorno de la plataforma Bogotá Rural, a través del botón mostrado en la Figura 43, o accediendo directamente a través de la URL <https://bogotarural.sdp.gov.co/#/energias-alternativas>.



Figura 43. Botón de acceso al Módulo 1: Atlas de energías renovables.

En la Figura 44 se muestra una vista general de la interfaz desarrollada para el módulo 1. Este ambiente ofrece diferentes opciones de visualización para los diferentes tipos de indicadores de energía renovable a consultar: eólico, solar, hidráulica y de biomasa. En todos los casos, los promedios multianuales calculados corresponden a una ventana de tiempo de 20 años (1998-2018) y los mapas raster fueron contruidos con una resolución de 100 m x 100 m.

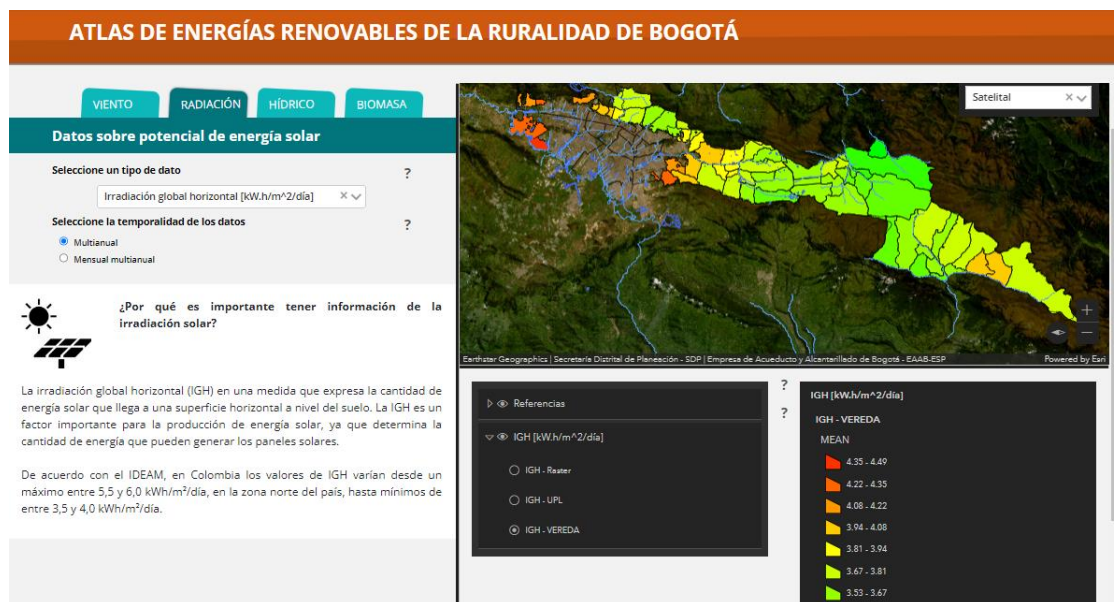


Figura 44. Vista general de la interfaz de usuario desarrollada para el módulo 1.

Indicadores de potencial de energía eólica

Como se ilustra en la Figura 45, en esta sección de la herramienta desarrollada, el usuario puede realizar la consulta de tres variables: velocidad de viento, densidad de potencia de viento y dirección de viento.

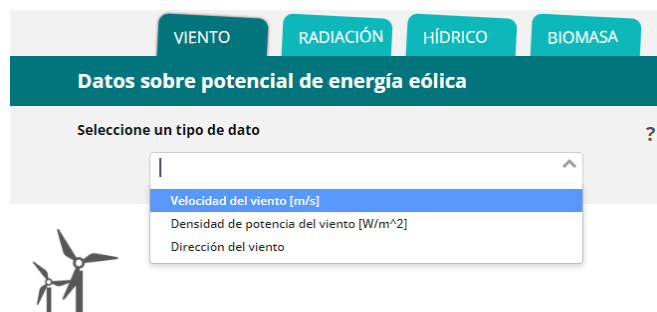
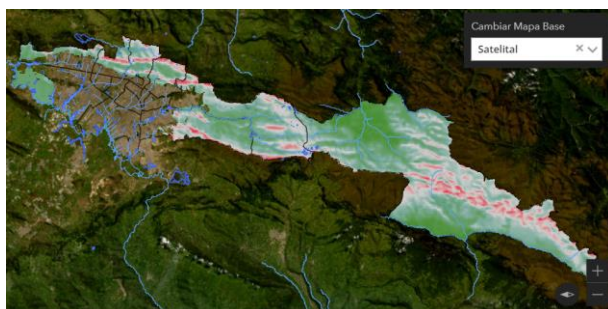


Figura 45. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía eólica.

Para el caso de la velocidad de viento y de la densidad de potencia de viento, el usuario puede seleccionar entre visualizar el promedio anual multianual de la variable o el promedio multianual para cada uno de los meses del año. Desde el punto de vista espacial, la herramienta ofrece la opción para visualizar el mapa *raster* sobre la ruralidad, o el análisis sectorizado de la variable por vereda o por unidad de planeación local, como se ilustra en la Figura 46. Para el caso de la dirección de viento, la información se dispone en promedio anual y únicamente para su análisis por veredas.

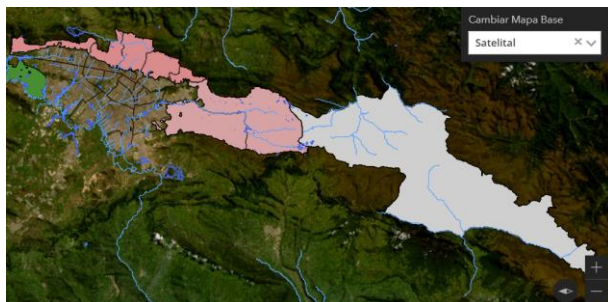
En la Tabla 18 se listan las diferentes capas disponibles dentro del módulo 1 para analizar el potencial de energía eólica en la ruralidad bogotana. Como se observa, el usuario de la plataforma podrá explorar dentro de un total de 235 capas de información para analizar el potencial energético de una región particular dentro de la ruralidad.



a)



b)



c)

Figura 46. Ejemplo de las opciones de visualización por sectores disponibles en el módulo 1: a) mapa raster de la variable, b) análisis por vereda y c) análisis por UPL.

VARIABLE	TEMPORALIDAD	TIPO DE CAPA		
		RASTER	VECTORIAL	
			POLIGONO	
			VEREDA	UPL
Velocidad de viento a 10 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Velocidad de viento a 50 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Velocidad de viento a 100 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Densidad de potencia de viento a 10 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Densidad de potencia de viento a 50 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Densidad de potencia de viento a 100 m	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Dirección de viento	Promedio anual	-	1	-
Número total de capas		78	79	78
		235		

Tabla 18. Capas de información disponibles para la energía eólica.

Indicadores de potencial de energía solar

Como se ilustra en la Figura 47, en esta sección de la herramienta desarrollada, el usuario puede realizar la consulta de dos variables: irradiación global horizontal y brillo solar.

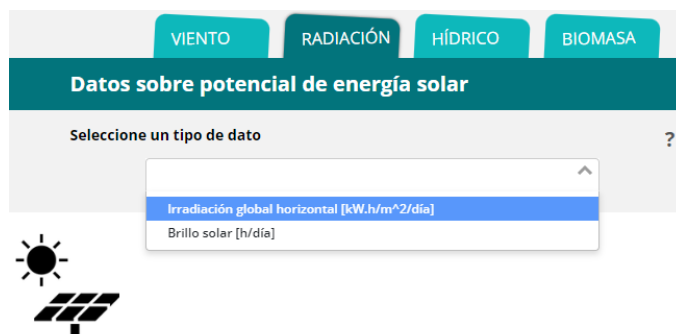


Figura 47. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía solar.

Al igual que en el caso de las variables de energía eólica, los indicadores de potencial solar se pueden consultar en promedios anuales multianuales y en promedios mensuales multianuales. Así mismo, en el sentido espacial, las variables pueden ser visualizadas empleando un mapa tipo *raster*, o mapas vectoriales con la información de la variable promediada para cada vereda o para cada UPL de la ruralidad. En la Tabla 19 se resumen las capas con información de indicadores de energía solar disponibles. En total el usuario del módulo podrá escoger entre 78 diferentes capas para analizar el potencial de energía solar de una región determinada de la ruralidad.

VARIABLE	TEMPORALIDAD	TIPO DE CAPA		
		RASTER	VECTORIAL	
			POLIGONO	
			VEREDA	UPL
Irradiación global horizontal	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Brillo solar	Promedio anual	1	1	1
	Promedio mensual	12	12	12
Número total de capas		26	26	26
		78		

Tabla 19. Capas de información disponibles para la energía solar.

Indicadores de potencial de energía hidráulica

Como se ilustra en la Figura 48, en esta sección de la herramienta desarrollada, el usuario puede realizar la consulta de tres variables: precipitación, indicador de energía hidrocinética e indicador de energía gravitacional.

La variable precipitación puede ser consultada usando un promedio anual multianual o los promedios mensuales multianuales para cada mes del año. Así mismo, la variable se puede visualizar como un mapa *raster* general para la ruralidad, o por medio de mapas vectoriales que reportan el promedio de la variable por cada vereda o por cada UPL de la ruralidad.

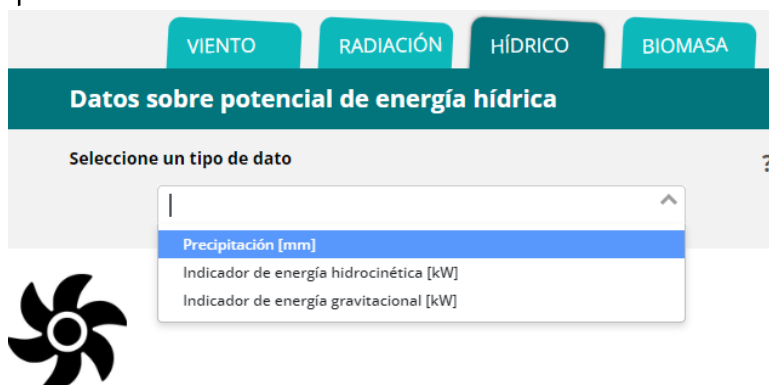


Figura 48. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía hidráulica.

Por otro lado, los indicadores de energía hidrocinética y gravitacional son reportados en promedios multianuales y se grafican usando polilíneas que representan el trazado de los cauces analizados. El análisis de estos indicadores por zonas permite que la herramienta reporte valores medios de la variable para cada una de las veredas o UPLs de la ruralidad.

En la Tabla 20 se resumen las capas relacionadas con el potencial de energía hidráulica. En total el usuario del módulo podrá escoger entre 45 diferentes capas para analizar el potencial de energía hidráulica de una región determinada de la ruralidad.

VARIABLE	TEMPORALIDAD	TIPO DE CAPA			
		RASTER	VECTORIAL		
			LINEA	POLIGONO	
				VEREDA	UPL
Precipitación	Promedio anual	1	-	1	1
	Promedio mensual	12	-	12	12
Indicador de energía hidrocínética	Promedio anual	-	1	1	1
Indicador de energía gravitacional	Promedio anual	-	1	1	1
Número total de capas		13	2	15	15
45					

Tabla 20. Capas de información disponibles para la energía hidráulica.

Indicadores de potencial de energía por biomasa

La cuarta opción de energía renovable se puede consultar en la pestaña de biomasa, la cual se muestra en la Figura 49. Para el potencial energético asociado a la biomasa, se pueden consultar dos indicadores diferentes (potencial de energía térmica y potencial energético por digestión anaerobia) para cada una de las veredas de la ruralidad. Así mismo, cada uno de estos indicadores puede ser analizado discriminando el tipo de actividad agropecuaria que produce la biomasa (residuos animales o residuos de cultivos de: flores, hortalizas, tubérculos y frutas). En total, como se lista en la Tabla 21, el usuario puede escoger entre 14 diferentes capas de información geográfica para analizar el potencial energético por biomasa en las veredas de la ruralidad bogotana.

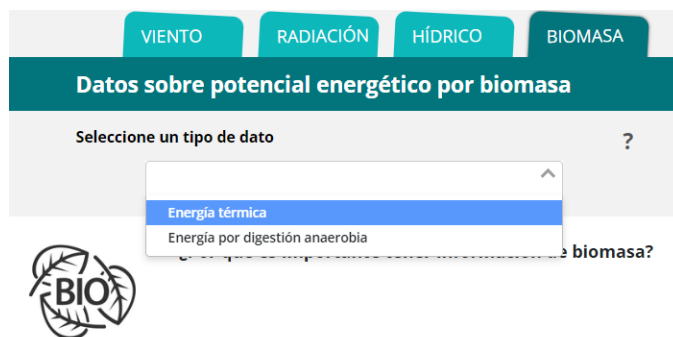


Figura 49. Indicadores disponibles para la medición del potencial de energía de biomasa.

VARIABLE	TEMPORALIDAD	VEREDA
Potencial de energía térmica	Promedio anual	7
potencial energético por digestión anaerobia	Promedio anual	7
Número total de capas		14

Tabla 21. Capas de información disponibles para la energía por biomasa.

Más detalles del funcionamiento y las herramientas disponibles en este módulo se pueden consultar en la sección 2. **MÓDULO 1: ATLAS DE ENERGÍAS RENOVABLES DE LA RURALIDAD DE BOGOTÁ** del *Producto 4. Manual de usuario de la plataforma* del presente proyecto.

4.2. Módulo 2: Visualización de la información de las estaciones meteorológicas

Adicional al desarrollo del atlas digital del potencial de energías renovables, como parte del proyecto se desarrolló un aplicativo en ambiente web para la visualización de la información reportada por las tres estaciones climáticas instaladas en los colegios rurales, así como del sensor de nivel dispuesto. Al igual que el primer módulo, este desarrollo se realizó para que estuviera alojado y fuera compatible con la plataforma Bogotá Rural de la SDP.

El acceso al módulo se puede hacer, dentro del entorno de la plataforma Bogotá Rural, a través del botón mostrado en la Figura 50, o accediendo directamente a través de la URL <https://bogotarural.sdp.gov.co/#/estaciones-meteorologicas>.

Este módulo está conformado por:

- Un *backend* que contiene una base de datos para el almacenamiento de la información reportadas por los instrumentos de medición y los algoritmos para realizar las consultas respectivas a la base de datos.
- Un *frontend* con las herramientas para la visualización de las series de tiempo asociadas a cada variable reportada en cada punto de medición.



Figura 50. Botón de acceso al Módulo 2: Visualización de la información de las estaciones meteorológicas.

Más detalles del funcionamiento de este módulo se pueden consultar en la sección 3. *MÓDULO 2: VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS del Producto 4. Manual de usuario de la plataforma* del presente proyecto.

5. CONCLUSIONES

En el marco del contrato interadministrativo 841 de 2022, suscrito entre la SDP y la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, se desarrolló el proyecto *“Desarrollo de un estudio para la identificación del potencial energético de la ruralidad bogotana, en el marco de la implementación del sistema de información para la planeación y seguimiento del desarrollo rural”*. El objetivo del proyecto consistió en la definición de los indicadores de potencial de energía renovable (eólica, solar, hidráulica y de biomasa) en la ruralidad bogotana y su incorporación dentro de un atlas digital.

Como parte del trabajo desarrollado se realizó una consulta y levantamiento de información climática, hídrica y de producción agropecuaria para la zona rural de Bogotá. Esta información fue verificada, procesada y georeferenciada para ser usada como insumo para el cálculo de los indicadores de potencial energético. La construcción de esta base de información consiste en un avance importante para la caracterización del potencial energético rural, considerando la brecha existente en este aspecto con relación a la porción urbana del distrito capital.

A continuación, se mencionan las principales conclusiones derivadas del trabajo desarrollado.

5.1. Conclusiones sobre el potencial eólico y solar

En lo referente al potencial energético eólico y solar se calcularon cuatro tipos de indicador energético: velocidad de viento (a 10, 50 y 100 m de altura), la densidad de potencia de viento (a 10, 50 y 100 m de altura), la irradiación global horizontal y el brillo solar. En la línea de tiempo, estos indicadores se calcularon considerando un promedio anual multianual y promedios mensuales multianuales, dentro de una ventana de tiempo de 20 años (1998-2008).

Toda la información fue procesada empleando ArcGIS como herramienta de información geográfica y se produjeron 235 capas de información para el potencial eólico y 78 capas con información del potencial solar. Todos los mapas construidos se integraron dentro de un atlas digital, desarrollado en entorno web y alojado dentro de la plataforma Bogotá Rural de la SDP.

De forma paralela al levantamiento de información secundaria, se realizó un análisis de posibles ubicaciones para el despliegue de una red piloto de estaciones climáticas. Se desarrolló una metodología, conformada por una serie de criterios y sus ponderaciones, para la identificación de los puntos de instalación de los instrumentos de medición meteorológica. Producto de esta metodología se identificaron tres puntos de interés en el área rural y se realizó la instalación de las estaciones climáticas en tres colegios de la ruralidad. Es de mencionar que la metodología desarrollada podría ser adaptada para la identificación de otras ubicaciones para la realización de pruebas piloto de generación de energía eólica y solar.

Las estaciones instaladas permitieron la toma de datos climáticos durante una ventana de cinco meses. Esta información, junto con los mapas de potencial construidos, será importante en el escenario de una siguiente fase, consistente en la implementación de proyectos piloto que lleven a la identificación de soluciones tecnológicas apropiadas, la instalación de equipos y la generación de energía eólica y solar en los tres puntos caracterizados a través de las estaciones climáticas.

No obstante el trabajo adelantado en el marco de este proyecto, buscando un objetivo final enfocado en la suficiencia energética de la zona rural del distrito capital, se sugiere avanzar en:

- El desarrollo de herramientas que apoyen la concepción, el diseño y la implementación de proyectos de generación de energía renovable.
- El fortalecimiento y actualización permanente de la información climática en la zona rural de Bogotá.

Desarrollo de herramientas para la implementación de proyectos de generación de energía renovables en la ruralidad bogotana

Por un lado, finalizado el presente proyecto, se considera natural una siguiente etapa que involucre el desarrollo de herramientas específicas que permitan apoyar la selección de ubicaciones óptimas para el desarrollo de proyectos de generación eólica y/o solar. Este tipo de metodologías, parcialmente empleadas en el presente proyecto para la identificación de los puntos de instalación de las estaciones climáticas, son ampliamente usadas y permiten generar datos que ayudan en la toma de decisiones. El objetivo particular de esta actividad consistiría en construir una metodología específica adaptada a las condiciones de la ruralidad bogotana.

Así mismo, se plantea la implementación de una guía metodológica para el desarrollo de proyectos de generación de energía renovable. Esta guía metodológica deberá definir un protocolo detallado tanto en los aspectos técnicos como regulatorios, de tal manera que oriente el desarrollo de los proyectos de generación de energía en la ruralidad, desde su concepción hasta la implementación. Algunos de los aspectos a considerar en este protocolo son:

- Selección de tecnologías y análisis de impacto: Identificado el potencial en la zona específica, se debe realizar una selección y dimensionamiento de los equipos que permitan tener un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Dentro del campo de generación de energía eólica y solar se cuenta con múltiples tecnologías y desarrollos que atienden diferentes niveles de potencial, de modo que resulta importante la correcta selección de la solución tecnológica. En este proceso de selección, se debe tener en cuenta, además de la eficiencia de los equipos, la tierra a utilizar, el impacto sobre la vida silvestre, la afectación al hábitat seleccionado (incluyendo la comunidad del lugar), el uso de agua y el nivel de contaminación acústica producida. Este aspecto hace parte de una revisión que debe evaluar el impacto ambiental de la instalación en sus fases de construcción, instalación, operación y final de vida de los equipos.

- **Conexión al sistema eléctrico:** Otro aspecto a considerar en el diseño del sistema de generación, son las condiciones de transporte de energía eléctrica o de consumo local. Esto permite dimensionar correctamente los equipos eléctricos requeridos y entrega una realimentación importante para la selección y costeo de los mismos. Es importante recordar que no siempre donde hay mayor potencial es más factible instalar.
- **Accesibilidad:** Un factor importante en el diseño de un sistema de generación es la accesibilidad a la ubicación seleccionada para la instalación. En este sentido, se debe tener en cuenta la forma en que se haría el transporte de los materiales y equipos para el montaje y mantenimiento de estos, las distancias a vías principales, pendiente de la(s) vía(s), la seguridad de equipos en tiempo presente y futuro, y el acceso a redes comunicación (redes de telefonía y/o internet para el monitoreo y/o control de los equipos).
- **Licencias y permisos:** En muchos casos la implementación de este tipo de proyectos de generación implica el trámite de licencias y permisos ante diferentes autoridades. Resulta importante identificar las entidades involucradas en cada caso, los trámites requeridos, la duración de estos y los requisitos para realizar las solicitudes.

Fortalecimiento y actualización de la información climática en la ruralidad bogotana

En este aspecto se debe continuar trabajando en el fortalecimiento de la información climática dentro de la ruralidad bogotana. En ese sentido se sugiere dedicar esfuerzos en la expansión, dentro de toda la ruralidad bogotana, de una red de monitoreo ambiental y meteorológico que permita consolidar series de tiempo representativas y consistentes para cada una de las variables útiles en el cálculo de los indicadores de potencial de energía renovable. Esto permitirá tener información actualizada y confiable que apoye a futuro la toma de decisiones en cuestiones de desarrollo de proyectos de generación energética.

5.2. Conclusiones sobre el potencial de energía hidráulica

Como parte del trabajo desarrollado, se presenta una metodología para el cálculo del potencial teórico de aprovechamiento hidráulico, tanto convencional como hidrocínético en el área de la ruralidad de Bogotá. Esta metodología está basada en información disponible del IDEAM (ENA 2022) y del modelo de elevación digital Alos Palsar, dado que no se conoce la velocidad ni el caudal de muchas de las corrientes hídricas de la ruralidad bogotana. Esta carencia de información se debe a la falta de estaciones de monitoreo que brinden una cobertura suficiente y a estudios detallados de la hidrodinámica de los ríos para extraer dicha información.

De esta forma, se calcularon dos tipos de indicador de potencial energético para los principales afluentes que cruzan el territorio rural de la capital: un indicador de potencial hidráulico gravitacional y un indicador de potencial hidrocínético. El cálculo de los indicadores se realizó empleando diversas herramientas del software de información geográfica ArcGIS, el cual también se empleó para calcular los promedios sectorizados por veredas y UPLs. En total se construyeron 45 capas con información referente al potencial de energía hidráulica.

Es importante tener en cuenta que las variables de entrada de los dos métodos presentados son calculadas a partir de aproximaciones teóricas y por tanto los resultados de potencial obtenidos sirven para analizar de forma general el comportamiento espacial del potencial teórico hidráulico de los ríos. En caso de requerir información más detallada se deben refinar las entradas, por ejemplo, a partir de levantamientos topo batimétricos, modelos digitales de elevación de alta resolución e información hidrológica proveniente de una medición in situ de las velocidades y caudales de los ríos o provenientes de resultados de modelos hidrodinámicos e hidrológicos calibrados y validados.

A pesar de las limitaciones implícitas en el cálculo de los indicadores, se considera que es un punto de partida válido para identificar los tramos o zonas (veredas o UPLs) con mayor potencial de aprovechamiento, de los cuales debería realizarse un análisis más detallado que incluya factores como el rendimiento de las turbinas.

Luego de la ejecución de la metodología, se recomienda el uso de generadores convencionales (a filo de agua) para las zonas altas de las cuencas y de generadores hidrocineéticos para zonas bajas de las mismas.

A partir de este ejercicio se identificó que la región de Sumapaz es la UPL que tiene mayor potencial de generación de energía hidráulica. Aunque los valores máximos de potencia teórica hidráulica se calcularon para los tramos de ríos de mayor caudal, se identifica que en diversos tramos de la UPL Sumapaz las magnitudes se encuentran en la categoría desde 200 hasta 1000 kW (método 1, a filo de agua). Lo cual sugiere que en estos tramos deberían realizarse estudios con mayor detalle que permitan identificar puntos óptimos para la instalación de sistemas de aprovechamiento.

Dadas las complejidades legales, implícitas en los procesos de instalación de sistemas de medición de caudal o aprovechamiento energético en ríos, se debe considerar estas condiciones al momento de plantear nuevas instancias que involucren pruebas piloto de generación o cualquier tipo de intervención en cauces. Estos trámites y procedimientos pueden ser un fuerte cuello de botella en la ejecución de un proyecto de generación de energía hidráulica. Este ítem debe ser especialmente considerado dentro de la guía metodológica descrita en la sección anterior.

5.3. Conclusiones sobre el potencial de energía por biomasa

Con respecto al potencial de energía por biomasa, se emplearon los resultados del Censo Nacional Agropecuario del 2014 para identificar los principales productos agrícolas y pecuarios de las 66 veredas de la ruralidad. Se realizó una extensa revisión bibliográfica para construir los balances de masa que permitieran calcular la cantidad de biomasa residual derivada de cada actividad agrícola y pecuaria. Este estudio se contrastó con las observaciones en campo, obtenidas por medio de visitas y entrevistas efectuadas a varios actores del sector. Finalmente, sobre la base de la cantidad de biomasa residual estimada para cada proceso, se calculó el potencial energético total de esta biomasa.

De esta forma, se generaron dos tipos de indicador, el primero estima el potencial de energía térmica de la biomasa residual, el cual supone el uso de procesos como la combustión o la pirólisis de la biomasa.

Por otro lado, también se estimó el potencial energético haciendo el aprovechamiento de la biomasa a través de biodigestores (proceso de respiración anaerobia).

Estos dos indicadores se calcularon para cada una de las veredas, usando cinco diferentes grupos de productos: residuos de animales y residuos de cultivos de flores, tubérculos, hortalizas y frutas. Toda la información fue procesada empleando ArcGIS como herramienta de información geográfica y se produjeron 14 capas de información. Todos los mapas construidos se integraron dentro del atlas digital desarrollado y alojado en el portal Bogotá Rural de la SDP.

Sobre la base del cálculo de los indicadores de potencial energético y de las entrevistas realizadas a los actores del gremio floricultor, el grupo de trabajo detectó una importante oportunidad para el desarrollo de proyectos de generación de energía a partir de los residuos generados en este tipo de cultivos. Se encontró que en este sector convergen adecuadamente varios factores como: la existencia de considerables cantidades de biomasa residual, la necesidad de disponer adecuadamente estos desechos, la necesidad de generación de energía que apoye ciertas actividades en los cultivos y el fuerte interés de los actores en implementar proyectos de generación de energía a partir de la biomasa residual. Esta situación hace que, la industria floricultora presente en la ruralidad del norte de Bogotá, sea un sector adecuado para la implementación de proyectos piloto para el aprovechamiento de biomasa residual en la generación de energía.

Las vistas realizadas permitieron constatar el importante potencial energético existente en los residuos de diferentes tipos de cultivos. No obstante, considerando que estos residuos se producen en múltiples cultivos a lo largo de cada vereda, el desarrollo de planes de aprovechamiento de esta biomasa requiere el diseño de estrategias óptimas para el acopio, almacenamiento y disposición de este material. Esta situación se presenta para todos los grupos de productos, con excepción de los residuos de cultivos de flores, en los cuales se cuenta con una gran cantidad de biomasa acumulada en zonas específicas y de forma concentrada, por lo que no se requiere considerar procesos de transporte para su aprovechamiento.

Como se mencionó, el cálculo de los indicadores de potencial energético se realizó empleando el último Censo Nacional Agropecuario oficial, el cual data del año 2014. Resulta importante gestionar acciones que permitan actualizar esta información a nivel de la ruralidad, con el fin de renovar adecuadamente los indicadores planteados y que los mismos reflejen la realidad en términos de producción de biomasa residual en la ruralidad del distrito capital.

5.4. Otras conclusiones

El desarrollo del presente proyecto ha requerido que, además de la entidad ejecutora, como lo es la Universidad Nacional de Colombia, se cuente con el apoyo de diferentes entidades del distrito, tales como la Secretaría de Planeación, la Secretaría de Educación, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el Instituto Distrital para la Gestión de Riesgos y el Cambio Climático (IDIGER), entre otras. En ese sentido es importante destacar que la ejecución de este tipo de iniciativas requiere el compromiso y trabajo del distrito en su conjunto. Aspectos como el trámite de autorizaciones y convenios, así como el activo intercambio de información

son asuntos que permiten la ejecución ágil y óptima de los recursos (financieros, humanos, tecnológicos, etc).

De esta manera, se resalta la necesidad buscar mecanismos que vinculen activamente a las diferentes entidades del distrito, para que estas puedan participar, cooperar y hacer uso de los productos generados en los proyectos desarrollados. Logrando, a través de esta sinergia, una ejecución más ágil y eficiente, así como un mayor impacto de los logros alcanzados.

6. REFERENCIAS

- [1] Anselin, L. Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, Vol. 27, No. 2, 1995, p.p. 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>.
- [2] ArcGIS. Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I). <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-moran-s.htm>.
- [3] Azad, A., Rasul, M., Alam, M., Ameer, S., Kumar, S. Mondal analysis of wind energy conversion system using Weibull distribution. *Procedia Engineering*. Vol. 90, 2014, p.p. 725-732. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.803>.
- [4] Box, G., Cox, D. R. An analysis of transformations. *J. R. Statist. Soc. B*, Vol. 26, 1964, p.p. 211-252.
- [5] Draperi, N. R., Cox, D. R. On Distributions and their transformation to normality. *Journal of the Royal Statistical Society*. Vol. 31, No. 3, 1969, pp. 472-476.
- [6] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Tercer censo nacional agropecuario. Bogotá, 2014.
- [7] Shi, H., Dong, Z., Xiao, N., Huang, Q. Wind Speed Distributions Used in Wind Energy Assessment: A Review. *Front. Energy Res. Sec. Wind Energy*. Vol. 9, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.769920>.
- [8] Shu, Z., Jesson, M. Estimation of Weibull parameters for wind energy analysis across the UK. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vo. 13, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0038001>.