Gestión del cambio para la Sostenibilidad Socioeconómica de las Naciones

Urrea, A. Almanza, A. y Rocha, G. (2025). Viabilidad de sistemas fotovoltaicos en algunos municipios colombianos: un enfoque basado en ciencia de datos. En Chirinos, Y., Rojas, D y Barbera, R. (2025). (Eds.), *Gestión del cambio para la sostenibilidad socioeconómica de las Naciones*. Fondo Editorial Servando Garcés. DOI: https://doi.org/10.47212/gestiondelcambiosostenibilidad2025

Capítulo XXII

VIABILIDAD DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ALGUNOS MUNICIPIOS COLOMBIANOS: UN ENFOQUE BASADO EN CIENCIA DE DATOS

VIABILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN SOME COLOMBIAN MUNICIPALITIES: A DATA-BASED APPROACH

Alejandro Urrea Ospina

Magister en Educación, UNIMINUTO, Ingeniería de Sistemas, Grupo De Investigación en Ingeniería Uniminuto Virtual / Semillero Colaboración de Ciencia de Datos, Correo: alejandro.urrea.o@uniminuto.edu. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0648- 6473

Andrés Camilo Almanza Castiblanco

Estudiante del Programa de Ingeniería de Sistemas, UNIMINUTO / Semillero Colaboración de Ciencia de Datos. Correo: aalmanzacas@uniminuto.edu.co

Gener Arturo Rocha Jaramillo

Estudiante del Programa de Ingeniería de Sistemas, UNIMINUTO / Semillero Colaboración de Ciencia de Datos. Correo: jaramillogener.rocha@uniminuto.edu.co

Objetivo de la investigación

Potenciar la adopción e energía solar en Colombia mediante el uso de la ciencia de datos.

Descripción del contexto

Colombia cuenta con una de las matrices más limpias del mundo, solo aprovecha el 1,5 % de su potencial solar. En este sentido, la demanda eléctrica crece cerca del 3 % anual, y la alta dependencia hidroeléctrica aumenta la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática. La irradiación promedio nacional es de 4,5 kWh/m²/día, superior al promedio mundial (3,9) y al de Alemania (3,0), país líder en energía solar (Castaño et al., 2022).

Es innegable la dependencia de la hidroelectricidad sujeta al régimen de lluvias, lo que genera vulnerabilidad estructural, esto hace indispensable avanzar en fuentes no convencionales. Sin embargo, la transición energética enfrenta limitaciones derivadas de modelos económicos, políticos rígidos y de la falta

de información precisa. Por lo tanto, es prioritario identificar áreas con debilidades en el suministro energético y en la adopción de tecnologías solares, considerando factores geográficos, socioeconómicos y de accesibilidad. La Ley 1715 de 2014 marcó un hito normativo al promover energías renovables en Colombia. Esto ha llevado a reforzar la responsabilidad ambiental impulsando energías que no agraven el cambio climático ni degraden ecosistemas, lo que exige la alineación de los sectores público y privado con los objetivos de sostenibilidad y mitigación.

La adopción de sistemas fotovoltaicos contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: ODS 7 (energía asequible y no contaminante), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura), ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y ODS 13 (acción por el clima), claves para la viabilidad de estos sistemas en los municipios priorizados (Naciones Unidas, 2025). La energía es motor del desarrollo económico y del bienestar humano, en el contexto del cambio climático, compromisos como los de la COP21 y COP26 buscan reducir en un 45 % las emisiones de CO□ al 2030 para limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C, impulsando a los sectores económicos a adoptar prácticas más sostenibles (Patiño, 2024). En consecuencia, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible determinar la viabilidad del uso de sistemas fotovoltaicos en algunos municipios colombianos mediante el uso de ciencia de datos?

Colombia cuenta con un marco legal sólido para los sistemas fotovoltaicos. Las Leyes 142 y 143 de 1994 establecieron la regulación del sector eléctrico, permitiendo la autogeneración privada y la participación de inversionistas. La Ley 1715 de 2014 complementó este marco al promover fuentes no convencionales de energía, reforzada por la Ley 1955 de 2019 con incentivos tributarios y trámites simplificados. Posteriormente, la Ley 2099 de 2021 y la Ley 2294 de 2023 fortalecieron la transición energética, regularon la generación distribuida y fomentaron comunidades energéticas. Decretos como el 1073 de 2015 y el 829 de 2020. consolidaron regulaciones y redujeron trámites, mientras resoluciones de la CREG facilitaron la integración y la medición bidireccional. Además, decisiones judiciales han respaldado estas iniciativas al reconocer la importancia de la energía renovable, promover la electrificación rural y corregir procedimientos, como la anulación de la primera subasta de renovables por fallas legales.

Revisión de la literatura

La revisión consistió en un proceso sistemático de identificación, selección y evaluación crítica de artículos científicos, publicaciones académicas y contenido especializado de sitios web con reconocido rigor

técnico y credibilidad en proyectos fotovoltaicos y análisis de datos. Los estudios de Castaño y García (2020), Riaño et al., (2022), Benavides et al., (2022); Castaño et al., (2022) sobre energía solar en municipios de Antioquia muestra el creciente protagonismo de esta fuente renovable frente a los combustibles fósiles, impulsado por la necesidad de enfrentar el cambio climático y diversificar la matriz energética. Se resalta el uso de Machine Learning, análisis espacial, IoT y sistemas SCADA para optimizar el diseño, monitoreo y gestión fotovoltaica. Asimismo, se abordan aspectos técnicos, económicos y operativos, considerando variables climáticas como irradiación, temperatura y nubosidad, junto con estrategias para mitigar su impacto en la generación.

El análisis de estos estudios Enel Colombia, (2021); Muñoz , et al., (2019); Duarte, (2025) confirman que Santander posee un entorno técnico, regulatorio y territorial propicio para proyectos solares. La articulación entre innovación, planificación y normativa ofrece la oportunidad de posicionar al departamento como referente en energías limpias en Colombia.

Santander, Bucaramanga

Determinación de la zona con mayor potencial para instalación de una granja de energía solar fotovoltaica en el departamento de Santander, Colombia	Se determinan zonas aptas para granjas solares con criterios de radiación mínima (5.0 KW/m² mensual), cobertura vegetal y área (4-20 ha). Se usaron datos de radiación IDEAM, coberturas, red vial, hídrica y relieve (Enel Colombia, 2021)	Rural
Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia.	El estudio evaluó la ubicación ideal de sistemas fotovoltaicos y el rendimiento de herramientas gratuitas mediante una evaluación nodal, comparando datos de NASA RetScreen, Mapa IDEAM y Meteonorm (Muñoz , et al., 2019)	Urbano o Rural
Sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para la estimación de la radiación solar global.	El artículo plantea un modelo de inteligencia artificial para estimar con precisión la radiación solar en zonas sin mediciones directas o completas (Bastos et al., 2021)	Urbano o Rural
Diseño y apoyo en la evaluación de un sistema de generación fotovoltaica para la alcaldía de Bucaramanga	El proyecto estudia la implementación de un sistema fotovoltaico en la Alcaldía de Bucaramanga, determinando demanda energética y potencial solar con datos NASA, y diseñando el sistema según la normativa colombiana (Ley 1715, RETIE, CREG 030, NTC 2050) (Duarte, 2025)	Urbano

Fuente: elaboración propia (2025).

Bogotá, Chía, Mosquera, Facatativá, Cundinamarca

Recurso	Factor del Artículo	Sector
Estimación del potencial fotovoltaico mediante minería de datos en cuatro ciudades de Colombia	Se aplicaron técnicas avanzadas de minería de datos — clustering y análisis de componentes principales (PCA)— para procesar datos meteorológicos y estimar el potencial fotovoltaico en Bogotá, Cúcuta, Manizales y Pasto. (Ramírez-Murillo, et al., 2019)	Urbano
Diseño de un instrumento para el análisis de pre-factibilidad de proyectos de energía solar fotovoltaica	Guía práctica para evaluar la prefactibilidad de proyectos SFV en Colombia, considerando aspectos técnicos, económicos y regulatorios, con aplicación de la Ley 1715 y del proceso de certificación (Ramírez, 2018)	Urbano o Rural
Proyecto de energía solar para entidades públicas	En 2022, la Secretaría de Ambiente de Bogotá y C40-CFF iniciaron un proyecto para instalar sistemas fotovoltaicos y optimizar la eficiencia energética en 78 edificaciones públicas hacia 2030, con el fin de reducir emisiones y modernizar la infraestructura. (Alcaldía de Bogota, 2025).	Urbano
Adjudicación a Enel-Codensa para sistemas fotovoltaicos en empresas colombianas	En 2021, Enel-Codensa (Enel X) fue adjudicada para instalar 13 sistemas fotovoltaicos en ocho empresas de Colombia, con 82 700 paneles (37,3 MWp) que abastecerán a más de 40 700 hogares. Se estima evitar 18 600 toneladas de CO_2 anuales y reducir hasta un 20 % el consumo en red, con un ahorro del 15 %. (Enel Colombia, 2021).	Urbano
Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca	Se evaluó la viabilidad técnica y económica de sistemas fotovoltaicos residenciales en Chía (estrato 6), con coberturas del 100 %, 70 % y 40 % de la demanda energética. Según la Ley 1715 de 2014, la inversión se recupera en 7,5 años con cobertura total. Entre las barreras figuran el alto costo inicial y la regulación, lo que resalta la necesidad de incentivar a constructores y operadores para aprovechar la alta radiación solar del país. La viabilidad depende del área disponible y de los incentivos vigentes..	Urbano
Sabana de Bogotá	En la sabana de Bogotá no existen proyectos fotovoltaicos por el alto costo del suelo y su destinación inmobiliaria. En Nariño (Cundinamarca) se proyecta una planta solar de 288,69 hectáreas que aportará 4 272,77 MW a la matriz energética nacional.	Rural

Tunja Boyacá

Recurso	Factor del Artículo	Sector
Estudio técnico económico para la implementación de un sistema fotovoltaico en Tanque Centro y la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la empresa Veolia Tunja.	El artículo expone un estudio técnico-económico para implementar un sistema fotovoltaico en el tanque centro y la planta de tratamiento de Veolia Tunja, mediante el análisis del consumo energético y el uso del diagrama de Pareto para identificar los principales centros de consumo. (Gómez, 2022)	Urbano

Análisis Multiespacial de radiación solar incidente en las provincias de Boyacá, para la implementación de proyectos de energía fotovoltaica	El proyecto analiza el potencial de radiación solar en Boyacá para identificar áreas con mayor viabilidad de proyectos fotovoltaicos, usando SIG y ArcGIS. (Infante y Bonilla, 2021)	Urbano
Nuestra planta solar en Viva Tunja, la primera sobre un centro comercial en Boyacá. GreenYellow Colombia.	Hace dos años entró en operación la primera planta solar en la cubierta de Viva Tunja, primer centro comercial de Boyacá con energía fotovoltaica. El clima local, con alta irradiación y temperaturas moderadas, favorece su rendimiento. La planta tiene una capacidad instalada de 420 kWp y produce 583 MWh anuales (GreenYellow. (s.f.)., 2025)	Urbano
Santoto Tunja, única universidad de la región con paneles solares para autoconsumo	La Universidad Santo Tomás en Tunja implementó un sistema fotovoltaico de autoconsumo con 180 paneles solares en el edificio Santo Domingo de Guzmán, operando desde diciembre de 2024 (Santotostereo, 2025).	Urbano

Fuente: elaboración propia (2025).

Tras analizar diversos factores de la región de Tunja, se puede deducir que la viabilidad para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos es altamente favorable. Este municipio ya cuenta con experiencias previas en la implementación de sistemas solares, los cuales han demostrado ser exitosos tanto en términos de rendimiento como de sostenibilidad.

Armenia Quindío

Recurso	Factor del Artículo	Sector
Desarrollo de un sistema que permita medir temperatura y humedad relativa para la implementación de un mapa solar en la cancha de futbol en la Universidad del Quindío	La tesis desarrolló un mapa solar para dimensionar sistemas fotovoltaicos, especialmente para la Universidad del Quindío, midiendo humedad relativa y temperatura con el sensor HSM20G. (Rojas, 2015)	Urbano

Fuente: elaboración propia (2025).

Metodología

El estudio describe el potencial fotovoltaico y las condiciones territoriales, calculando la generación y viabilidad de sistemas solares con datos climáticos, geográficos, socioeconómicos y regulatorios. Se enmarca en un enfoque cuantitativo, apoyado en ciencia de datos, de tipo descriptivo-predictivo y no experimental. La población objetivo son municipios colombianos con potencial para la adopción fotovoltaica. La muestra incluye diez municipios vinculados al origen de los integrantes del semillero: Medellín, Caldas (Antioquia), Cimitarra (Santander), Chía, Mosquera y Facatativá (Cundinamarca), Tunja (Boyacá), Armenia (Quindío),

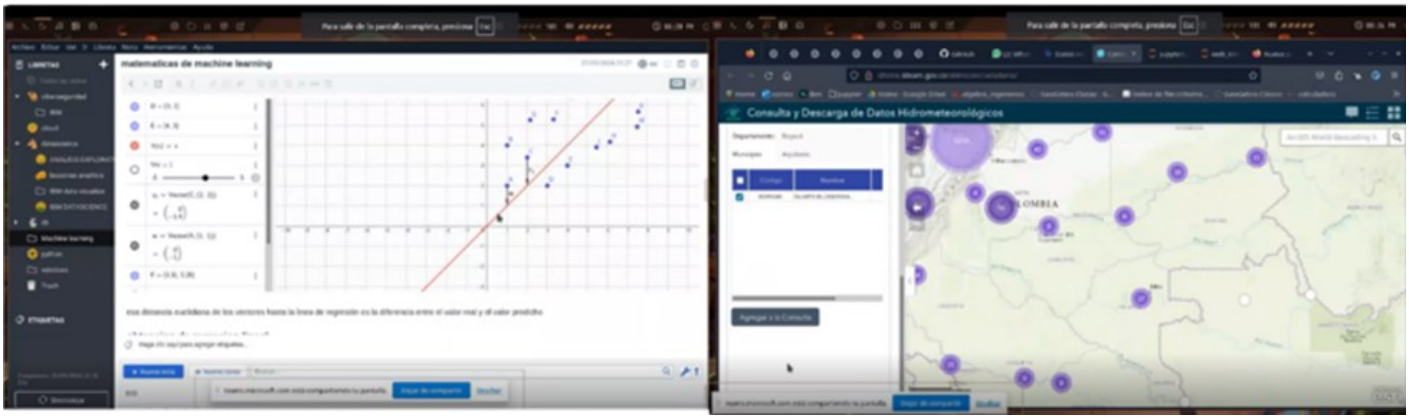
Pereira (Risaralda) y Riosucio (Caldas). El proyecto empleó hardware y software en la nube para el análisis de datos, con apoyo del Semillero de Investigación Ciencia de Datos, lo que favoreció el trabajo colaborativo. Además, se realizó un brainstorming para identificar tópicos diferenciadores y brechas en proyectos fotovoltaicos en Colombia. Se adopta un diseño no experimental estructurado usando herramientas de Ciencia de Datos teniendo en cuenta lo siguiente:

- **Planeación y criterios**

Se definieron variables, indicadores de viabilidad y criterios de inclusión y exclusión de zonas. Además, se inició el diseño de un modelo con servidores y se programaron sensores para la captura de datos ambientales, integrados con las API del IDEAM, DANE y Global Atlas, relativas a información geográfica, climática y sociodemográfica. Después de la reunión con el empresario con más de doce años de experiencia empezamos a realizar un avance del Prototipo en la recolección de datos de brillo solar usando técnicas de web scraping.

Figura1

Planeación y Criterio



Fuente: elaboración propia (2025).

- **Adquisición de datos (ETL)**

Para la recolección de información se emplearon fuentes secundarias mediante el uso de APIs y portales web oficiales, entre ellos el IDEAM, el Global Solar Atlas, el DANE y diversas bases de datos climáticas y regulatorias nacionales. De manera complementaria, se recurrió a fuentes primarias a través de herramientas como Sensor Logger para la captura de datos georreferenciados y de luminosidad, así como a técnicas de web

scraping para obtener información sobre brillo solar cuando fue necesario. Las mediciones con Sensor Logger se efectuaron en intervalos definidos, principalmente durante las jornadas de mañana y tarde, con el propósito de garantizar la representatividad de las condiciones de radiación.

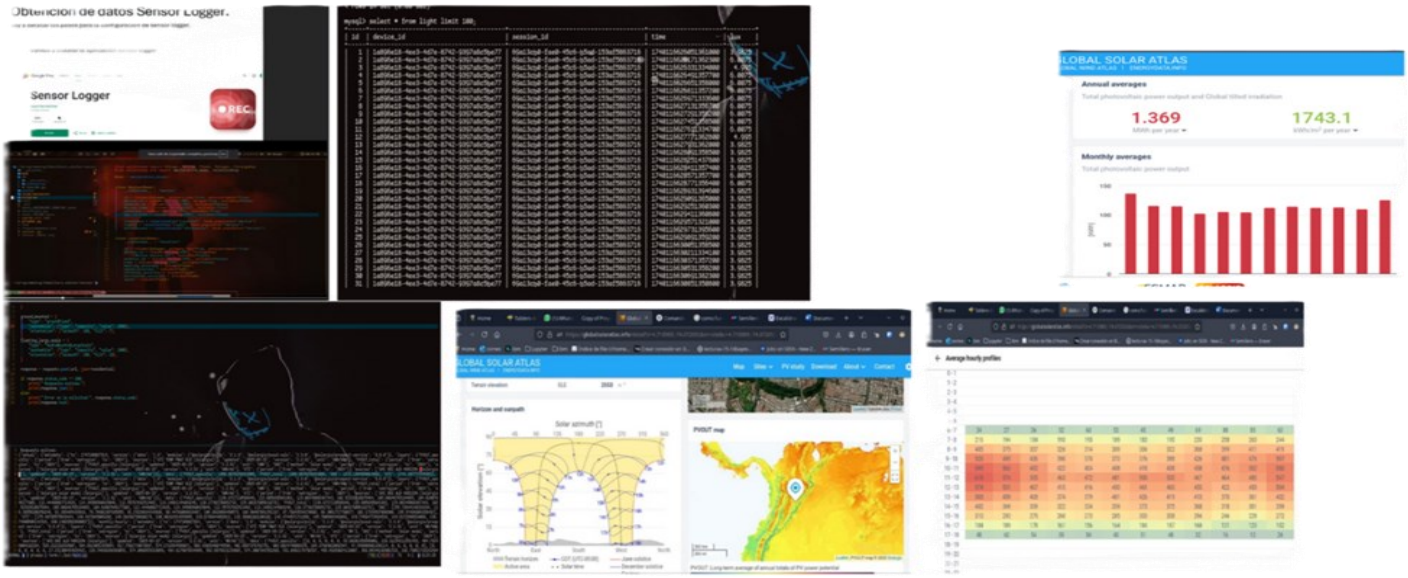
- **Análisis descriptivo y geoespacial**

Se efectuó un análisis descriptivo y geoespacial mediante estadística descriptiva y mapas temáticos de variables como irradiación solar, pendiente, uso del suelo y accesibilidad. Posteriormente, se seleccionaron los municipios vinculados al origen de los integrantes del semillero, iniciando el alistamiento para la toma de datos y pruebas del sistema de información.

Para la información primaria, se capacitó al semillero en el uso de la aplicación Sensor Logger para registrar datos georreferenciados, niveles de luminosidad y otros parámetros relevantes, los cuales fueron almacenados y enviados al servidor del proyecto mediante la plataforma: https://ethical-quail-allowing.ngrok-free.app/data.

Figura 2

Análisis descriptivo y geoespacial

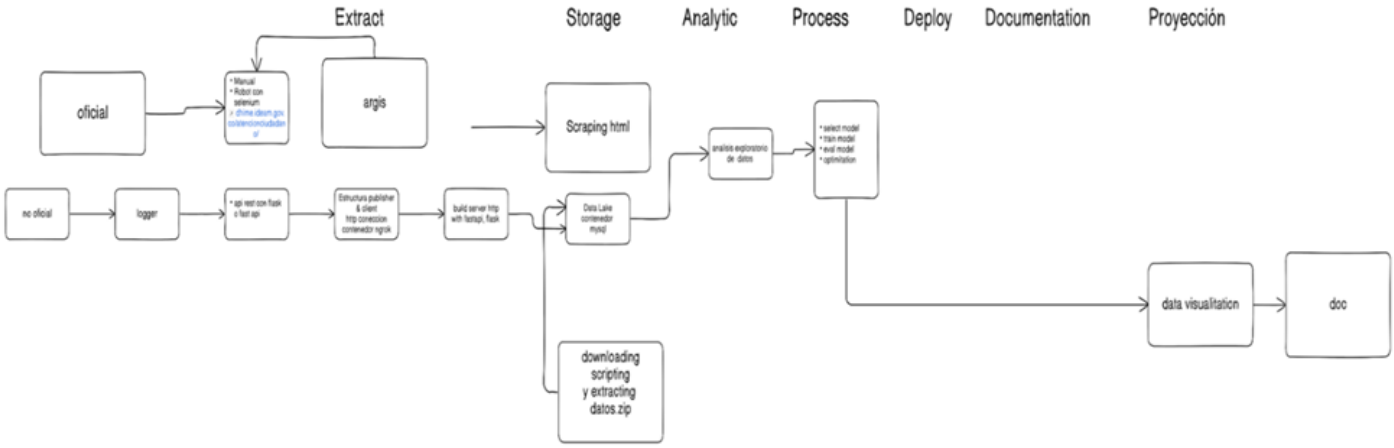


Fuente: elaboración propia (2025).

La propuesta utiliza series de tiempo de datos meteorológicos para construir modelos predictivos de radiación solar, y luego mediante técnicas de análisis de datos se busca optimizar la implementación de soluciones solares donde el impacto sea más significativo a nivel local. Lo anterior conllevó a desarrollar la siguiente arquitectura:

Figura 3.

Arquitectura de soluciones solares



Fuente: elaboración propia (2025).

Se usaron lenguajes de programación como Python, especialmente las librerías Pandas y NumPy, para el tratamiento, limpieza y análisis de grandes volúmenes de datos meteorológicos y de rendimiento energético. Herramientas de visualización de datos como Grafana, que permitió facilitar la toma de decisiones.

Hallazgos

Colombia cuenta con altos niveles de radiación solar en la mayor parte de su territorio, lo que la posiciona como un actor estratégico en la transición energética. Tanto las zonas urbanas (a través del aprovechamiento de techos de empresas y edificios públicos— como las rurales — mediante terrenos agrícolas o potreros) ofrecen condiciones favorables para la implementación de sistemas fotovoltaicos, potenciadas por la diversidad climática y topográfica del país.

En el desarrollo del proyecto se identificaron algunos desafíos relevantes: Conectividad limitada: la falta de infraestructura para la transmisión de datos dificulta el monitoreo y la gestión de los sistemas solares. Vulnerabilidad socioeconómica: las comunidades de bajos ingresos enfrentan barreras para asumir la alta inversión inicial requerida. Infraestructura de red insuficiente: las limitaciones de la red eléctrica restringen la integración de energía solar a gran escala. Trámites burocráticos: los procesos lentos y complejos obstaculizan la aprobación de proyectos renovables. Falta de divulgación: persiste un conocimiento insuficiente sobre casos exitosos y beneficios de la energía solar.

Conclusiones

En conclusión, la adopción de sistemas fotovoltaicos en los diez municipios priorizados resulta factible gracias a su alta irradiación solar, condiciones técnicas favorables y un marco normativo que respalda la transición energética. El uso de ciencia de datos permitió integrar variables climáticas, geográficas y socioeconómicas, facilitando el desarrollo de modelos predictivos y herramientas analíticas para la toma de decisiones en políticas públicas y estrategias empresariales.

La implementación de estas tecnologías, junto con incentivos financieros y campañas de divulgación, impulsará la adopción de energía solar, generando beneficios económicos por reducción de costos, impactos ambientales positivos por disminución de emisiones y aportes sociales mediante un acceso más equitativo a energía limpia.

Fuentes Bibliográficas

Alcaldía de Bogotá. (20 de Marzo de 2025). *Bogotá presenta proyecto de energía solar para entidades públicas.* https://t.ly/hdtbM

Bastos, D. Illera, B. y Sepúlveda, S. (2021). Sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para la estimación de la radiación solar global. *Investigación E Innovación En Ingenierías, 9*(1), 34–49.

Benavides, D. Arévalo-Cordero, P. González, L. Hernández-Callejo, L. Jurado, F. y Aguado, J. (2022). Method of monitoring and detection of failures in PV system based on machine learning. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (102), 26–43. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200694

Castaño-Serna, J. Bolaños-Ibáñez, V. Garnica-Zuñiga, L. De La Ossa-Villadiego, L. Agudelo-Flórez, S. y Chica-Arrieta, E. (2022). Diseño de un árbol solar para la seccional del Bajo Cauca de la Universidad de Antioquia. *Revista UIS Ingenierías,* 21(2). https://www.redalyc.org/journal/5537/553772634007/html/

Castaño-Gómez, M., y García-Rendón, J. J. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en colombia. *Lecturas de Economía, 93*(93), 23-64. https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/3239

Duarte, I. A. (2025). *Diseño y apoyo en la evaluación de un sistema de generación fotovoltaica para la alcaldía de Bucaramanga.* [Tesis pregrado. UNAB. Colombia] http://hdl.handle.net/20.500.12749/18917

Enel Colombia. (12 de agosto de 2021). *Adjudicado a Enel-Codensa Proyecto solar a gran escala en ocho empresas colombianas*. https://www.enel.com.co/es/prensa/news/8-adjudicadoproyectoenergia-solar.html

Gómez, M. (2022). *Estudio técnico económico para la implementación de un sistema fotovoltaico en Tanque Centro y la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la empresa Veolia Tunja.* [Tesis pregrado. Uniiversidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia] https://repositorio.uptc.edu.co/entities/