

**Estudio de las tecnologías óptimas para el mantenimiento de paneles solares en la  
sabana norte de Bogotá y su impacto en la vida útil**

Elaborado por:

Carlos David Barreto Farfán

José Miguel Cárdenas Orjuela

Darién Sebastián Hurtado Rodríguez

Universidad EAN

Gerencia de Proyectos

Seminario de Investigación de Pregrado

Bogotá

02/06/2025

## **Resumen**

En este documento se realiza un estudio para identificar las mejoras alternativas de limpieza y mantenimiento de paneles solares en la Saba Norte de Bogotá. En la actualidad, predominan métodos manuales y mecánicos de limpieza. El problema surge de la necesidad de evaluar métodos avanzados en la zona que permitan un mejoramiento en la eficiencia del lavado de paneles en cuanto a recurso humano y costos de operación, visualizando una optimización a nivel de sostenibilidad, resultando así en un aumento y/o conservación de la vida útil de los sistemas. Las teorías revisadas indican los principales impactos de la suciedad en los paneles solares y su afectación en la producción de la energía eléctrica, evaluando diferentes escenarios en zonas iguales o similares a la de estudio. Sumado a lo anterior, se muestran diferentes alternativas, tanto mecánicas, eléctricas y avanzadas, para lograr una limpieza eficiente sin sacrificar la calidad.

## Tabla de contenido

Problema de Investigación .....	5
Objetivos .....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
Justificación.....	8
Marco Teórico .....	10
Diseño de sistemas SSFV.....	11
Diseño para un sistema aislado .....	11
Diseño de sistema fotovoltaico híbrido .....	12
Metodología .....	17
Enfoque.....	17
Alcance .....	17
Diseño de la investigación.....	17
Definición de variables .....	18
Población y muestra .....	19
Selección de métodos o instrumentos para recolección de información .....	20
Investigación documental.....	20
Observación Directa .....	21
Entrevistas semiestructuradas .....	21
Técnicas de análisis de datos .....	22
Análisis de contenido temático.....	23
Matrices de síntesis.....	23

	4
Análisis contextual.....	24
Análisis y discusión de los resultados .....	24
Investigar las tecnologías más utilizadas para la limpieza y mantenimiento de paneles solares .....	24
Analizar las condiciones ambientales de la Sabana Norte de Bogotá y su impacto en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos. ....	29
Nivel de precipitación .....	29
Temperatura ambiente.....	30
Contaminación industrial.....	31
Comparar la eficiencia, costos y sostenibilidad de distintas soluciones de limpieza disponibles en el mercado.....	33
Proponer la tecnología más viable para la sabana norte de Bogotá, considerando factores técnicos, económicos y ambientales. ....	35
Conclusiones.....	36
Lista de referencias.....	38

## Problema de Investigación

Desde los inicios de la implementación de paneles solares en empresas y conjuntos residenciales hace unos años, se derivaron distintos retos en cuanto al funcionamiento y mantenimiento de estos. Específicamente, las partículas de polvo y suciedad disminuyen exponencialmente la eficiencia energética, siendo este uno de los factores críticos para el buen desempeño de los sistemas, tal y como expresa Maghami (2016) sobre la acumulación de material sobre los paneles:

[...] El rendimiento de un módulo fotovoltaico disminuye con la suciedad de la superficie, y la pérdida de potencia fotovoltaica aumenta con un aumento en la cantidad de tierra en el módulo fotovoltaico. Por lo tanto, la acumulación de tierra en el módulo fotovoltaico puede conducir a una disminución significativa de la energía producida por el módulo fotovoltaico. (p.6,3)

A nivel técnico, Tahir et al. (2025) menciona en su artículo lo siguiente sobre el proceso eléctrico que se genera en el panel y que da como resultado la afectación en su eficiencia.

[...] La disminución del número de fotones y el aumento de las pérdidas resistivas debido a la suciedad reducen la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, lo que en consecuencia reduce la conversión fotoeléctrica y la cantidad total de energía fotogenerada. El efecto de sombreado causado por la suciedad y los residuos en la superficie del panel disminuye la cantidad de luz solar que llega a las células fotovoltaicas, lo que resulta en una disminución del voltaje y la corriente. (p.15)

En la actualidad las empresas prestadoras de servicios de limpieza y mantenimiento de paneles solares se centran solamente en una limpieza profunda con distintos métodos, desde uso de agua a presión con hidro lavadoras hasta la utilización de robots por medio de control remoto para la limpieza en paneles instalados en zonas de tejados. Sin embargo, estudios recientes muestran que existen métodos óptimos para la limpieza de estos, muchos de ellos se implementan desde su instalación, reduciendo así los costos de manutención, como lo son el

ángulo de inclinación y orientación, que, junto con la altura del panel, aportan positivamente a que los mismos se puedan limpiar con la lluvia o el viento, o bien, que se reduzca la acumulación de polvo. (Tahir et al., 2025)

Con base en lo anterior, es de resaltar que el impacto que generan los problemas de polvo impacta directamente en la vida útil de los paneles, generándole a las empresas sobrecostos con altas frecuencias en la contratación de empresas prestadoras de servicios de limpieza. Así mismo, los brazos robóticos utilizados para limpieza en zonas difíciles tienden a rayar las superficies y disminuir la eficiencia de estos. (Hooshyar et al., 2024).

Por último, se puede ver que las empresas presentes en la Sabana Norte de Bogotá las cuales prestan servicios de limpieza y mantenimiento, solo contemplan lavados por medio de los métodos nombrados anteriormente, sin embargo, es importante resaltar que a la fecha, los proveedores no han realizado evaluaciones o pruebas de métodos diferentes que implementen nuevas tecnologías, y que así mismo, se evalúa un menor desperdicio de agua, menores tiempos de intervención, una mayor eficiencia energética y un aumento en la vida útil de los sistemas fotovoltaicos.

## Objetivos

### Objetivo general

Realizar un estudio para identificar las tecnologías más adecuadas para el mantenimiento de paneles solares en la Sabana Norte de Bogotá, evaluando su impacto en la eficiencia y vida útil de los sistemas fotovoltaicos.

### Objetivos específicos

- Investigar las tecnologías más utilizadas para la limpieza y mantenimiento de paneles solares.
- Analizar las condiciones ambientales de la Sabana Norte de Bogotá y su impacto en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos.
- Comparar la eficiencia, costos y sostenibilidad de distintas soluciones de limpieza disponibles en el mercado.
- Proponer la tecnología más viable para la sabana norte de Bogotá, considerando factores técnicos, económicos y ambientales.

## Justificación

Esta investigación sobre las tecnologías óptimas para el mantenimiento de paneles solares en la sabana norte de Bogotá es fundamental debido a los diversos factores que impactan directamente en la eficiencia, vida útil y sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos.

Uno de los principales factores que reducen significativamente la eficiencia energética es la acumulación de polvo y suciedad en los paneles solares. En el contexto específico de Bogotá se ha demostrado que con una frecuencia de mantenimiento y limpieza adecuados en los paneles solares puede aumentar su productividad energética entre un 3,87% y un 7,23% dependiendo el tipo de panel (León et al., 2021).

A razón de que se espera que la capacidad instalada de energía solar en Colombia tenga un crecimiento de 1,48 gigavatios en 2024 a 12,85 gigavatios para 2029, a una tasa compuesta anual del 54,06% durante el período previsto (2024-2029). (Mordor Intelligence, 2023).

Los sistemas solares fotovoltaicos son altamente escalables y pueden llevarse a cabo en diferentes tamaños, desde instalaciones residenciales hasta granjas solares de gran escala. Esta flexibilidad permite que la instalación de los paneles solares se realice a través de diversas aplicaciones, así como satisfacer diversas demandas energéticas (Mordor Intelligence, 2023). Motivo por el cual se fundamenta la investigación sobre las tecnologías óptimas para el mantenimiento de paneles solares.

Desde un punto de vista teórico, esta investigación aporta conocimiento sobre las mejores tecnologías para el mantenimiento de estos sistemas, lo cual es un factor importante para maximizar su eficiencia. La acumulación de polvo y suciedad en la cara del panel reduce el rendimiento de las celdas fotovoltaicas. Para contrarrestar este impacto se han desarrollado en el mundo múltiples tecnologías para el mantenimiento de los equipos y así mejorar la eficiencia, reducir los costos de mantenimiento y mejorar su vida útil. Este estudio no solo profundizara en dichas soluciones, sino que se adaptara a las condiciones climáticas de la

sabana norte de Bogotá, brindando herramientas teóricas que pueden replicarse en otras zonas con características similares.

El resultado de la investigación es identificar y evaluar las mejores tecnologías de mantenimiento adaptadas a las condiciones específicas, las cuales son cruciales para maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en la región. Esto no solo contribuye a una mayor producción de energía limpia, sino que también mejora la rentabilidad de las inversiones en energía solar, al reducir los costos operativos y extender la vida útil de los equipos.

En el marco de la especialización de gerencia de proyectos se encuentra una relación en la creación de una empresa dedicada a la prestación de servicios de mantenimiento para paneles solares. Ya que en este documento se lleva a cabo la prefactibilidad para la creación del proyecto, encontrando las mejores tecnologías en la sabana norte de Bogotá.

## Marco Teórico

En los últimos años, el crecimiento en la instalación de sistemas fotovoltaicos ha aumentado rápidamente a nivel global. Esto se debe a la gran demanda de fuentes de energía renovables que permiten mitigar el impacto ambiental generado por la gran dependencia de los combustibles fósiles para generar energía (Song et al., 2025). A diferencia de estos últimos la energía solar es un recurso accesible e inagotable, lo que convierte la instalación de los sistemas fotovoltaicos en modelos de generación de energía sostenible y eficiente.

Muchos estudios demuestran que la energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías con más proyección a nivel mundial. Según la agencia internacional de Energía renovable (IRENA) en Renewable Capacity Statistics 2025. La capacidad instalada de energía solar en el mundo es de 1.500 Gigavatios y tiene una proyección para 2050 de 5.500 GW. Este aumento en la capacidad instalada obedece a la reducción de costos en la producción de paneles solares y el incentivo gubernamental que apoya la instalación de energías renovables (IRENA,2025).

Los paneles se encuentran conformados por celdas solares, las cuales absorben la energía presente de los fotones que derivan de la luz solar, eso dependiendo de los materiales que las componen y las barreras potenciales que separen las cargas de la zona en la que se generan. (Barbosa,2010)

El mantenimiento de paneles solares es un factor crítico para garantizar la eficiencia y vida útil de los sistemas fotovoltaicos. La acumulación de polvo y suciedad puede reducir significativamente la generación de energía, lo que ha llevado a la investigación y desarrollo de diversas tecnologías de limpieza en el mundo. Este marco teórico explora los fundamentos de los paneles solares, su infraestructura y montaje, las estrategias de mantenimiento y las regulaciones aplicables en la Sabana Norte de Bogotá.

## **Diseño de sistemas SSFV**

El diseño óptimo de los sistemas fotovoltaicos (SSFV) es un factor fundamental para llevar a cabo las instalaciones de estos. Un diseño adecuado no solo garantiza el rendimiento idóneo del sistema, sino que también contribuye a su eficiencia y rentabilidad. Este diseño óptimo, en muchas ocasiones depende en gran medida de la variable de radiación solar, a razón de que la cantidad y calidad de la radiación que recibe el sistema afecta directamente la generación de energía. Por ende, identificar las condiciones de radiación solar en una ubicación determinada es crucial para dimensionar correctamente los paneles solares y otros componentes, garantizando que el sistema opere de manera eficiente y cumpla con las expectativas de producción energética. (Salamanca, 2017).

Existen diversas metodologías reportadas en la literatura para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, entre las cuales se incluyen el diseño intuitivo, analítico y el basado en métodos numéricos. El diseño mediante métodos numéricos es considerado el más efectivo y recomendado, ya que parte de un diseño intuitivo y, a través de cálculos, determina la configuración óptima del sistema. (Muhsen et al., 2016). Uno de los aspectos relevantes en la selección del sistema fotovoltaico es el económico, ya que es fundamental elegir la configuración más rentable que cubra de manera eficiente la demanda de energía que se pretende suplir con el sistema SSFV. (Fouda et al., 2016). Gracias al avance de la computación y la tecnología, el diseño de sistemas fotovoltaicos ha progresado a gran escala, especialmente con el uso de métodos numéricos. Estos métodos permiten explorar diversas opciones posibles, lo que facilita encontrar la solución más adecuada para cada caso. (Cao et al., 2016).

## **Diseño para un sistema aislado**

El laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica (UPA) está conectado a la red eléctrica centralizada, pero esta presenta altos costos y frecuentes interrupciones en el servicio. Esto hace que sea importante explorar alternativas de generación de energía, especialmente mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos cerca de la carga, donde se necesita garantizar un suministro confiable, de calidad y a bajo costo. El objetivo es diseñar un sistema fotovoltaico autónomo que pueda abastecer de energía eléctrica al laboratorio, maximizando la integración de fuentes renovables de energía (FRE). (Mejía, 2019)

En cuanto al diseño de los sistemas fotovoltaicos Mejía E. (2019) menciona en su artículo los diferentes aspectos relevantes que se deben tener presentes.

A través de los materiales y métodos se determina el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo, para ello se debe tener en cuenta las actividades que se llevan a cabo en el lugar donde se plantea realizar el sistema fotovoltaico.

Otros factores relevantes son la valoración e identificación del recurso solar, a razón de que a partir de la información que se obtiene se puede establecer el/los ángulo(s) óptimo(s) para lograr el beneficio máximo de la radiación, así como facilitar su autolimpieza y prevenir que elementos como hojas y polvo, entre otros, incidan en el funcionamiento del panel fotovoltaico. (Mejía, 2019)

### **Diseño de sistema fotovoltaico híbrido**

A partir de la evaluación de diferentes métodos aplicados en MPPT, como INC (Incremental Conductance) y P&O (Perturb and Observe), se diseñó un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) para moderar la salida del panel fotovoltaico y enriquecer la estabilidad del suministro. Al elegir una batería de iones de litio con determinada capacidad en (kW), se integra eficazmente con el sistema fotovoltaico. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo dinámico SSFV/Batería opera de manera eficiente,

respondiendo adecuadamente a los cambios ambientales y técnicos, y asegurando una entrega estable de energía. Además, el sistema muestra un buen rendimiento incluso bajo condiciones variables de irradiación solar y demanda de carga. (Alvarez et al., 2017)

Desde los inicios de los sistemas fotovoltaicos, han surgido necesidades concretas sobre lo que puede afectar el funcionamiento de los mismos. Una de las más importante es la presencia de suciedad y partículas en el aire que empiezan a formar una capa en el panel, bloqueando parte de la luz del sol y reduciendo así su eficiencia. Sumado a otros factores que también puede representar un impacto en el rendimiento, como las altas temperaturas, el espectro solar y la orientación e inclinación del panel. (Myyas et al., 2022)

El reto principal proviene de la reducción progresiva de la eficiencia en el sistema, y el riesgo de que, si no limpian a tiempo o con una frecuencia determinada, se puede llegar a presentar un daño crítico o grave en el panel dejándolo fuera de servicio en operación.

Esta problemática está presente en la sabana de Bogotá, según un informe emitido por la autoridad ambiental CAR en Septiembre del año 2024, se declara un nivel de prevención por contaminación atmosférica en el área rural de Bogotá, la cual, se emite con base en la medición y obtención de resultados correspondientes a una baja calidad del aire y un alto contenido de material particulado PM10 (polvo, cenizas, hollín, y demás que miden 10 micrómetros o menos) en municipios como Cota, Sopo, Tocancipá y Zipaquirá. (CAR, 2024)

Aunque estos datos se emitieron hace ya 6 meses y la alerta se declaró debido también a unas condiciones anormales en otras zonas del país, se evidencia que las zonas aledañas a Bogotá son un foco del material particulado que proviene mayormente de industrias en la ciudad.

Sumado a lo anterior, se debe tener en cuenta que la problemática tiene como consecuencia un aumento progresivo de la suciedad en los sistemas de paneles solares ya instalados gracias al material particulado, este aumento conlleva a una disminución constante de la capacidad productiva de cada uno, afectando el sistema en su totalidad.

Así mismo, los factores climáticos de las zonas en donde se tienen plantas solares instaladas tienen una gran importancia en el comportamiento de las partículas, su forma de adherirse a los paneles y su impacto en la transmitancia de energía, tal y como lo expresa Ghazi (2014) en su artículo y experimentos en una zona del Reino Unido con un ambiente similar a la zona de estudio.

[...] Los resultados de los experimentos al aire libre muestran que el tamaño de las partículas depositadas en las unidades de vidrio oscila entre 1 y 50 micras, las cuales pueden adherirse fácilmente a las superficies planas cuando no llueve. Esta condición se agrava durante el calor del verano si la humedad relativa alta crea un efecto cementante en las superficies. Incluso una pequeña cantidad de estas partículas finas puede reducir la transmitancia hasta en un 11 %, según los resultados de los experimentos en interiores. (p.8)

Se puede observar, que el autor muestra una relación importante entre la cantidad de material particulado y la lluvia, siendo esto un factor a tener en cuenta para verificar el estado de los paneles solares que se encuentren en la zona de estudio. También, dependiendo de las micras de material particulado así mismo es su afectación en la capacidad de generación energética, por tanto, la alta suciedad y el riesgo de afectación de los equipos permite garantizar el estado óptimo de los mismos, esto por medio de una limpieza y mantenimiento cuya frecuencia generalmente es definida por el fabricante dependiendo de las condiciones climáticas de las zonas instaladas.

Los métodos de limpieza y mantenimiento se usan con el fin de garantizar o extender la vida útil de los paneles solares, de los cuales existen diferentes métodos, manuales, mecánicos y avanzados.

En cuanto a los métodos manuales, se hace un lavado y limpieza con agua y elementos como trapos o cepillos, el mismo se realiza por personal capacitado dependiente de la ubicación de los paneles, si en piso o en tejados. Este método es eficiente, pero se requiere de

una cantidad importante de mano de obra calificada y recurso hídrico, por lo tanto, se hace costoso y difícil de mantener con el tiempo para la industria.

Con respecto a los métodos de limpieza mecánicos existe una gran variedad de alternativas para las industrias, desde hidro lavadoras con accesorios especiales para un lavado óptimo, hasta robots con fibras de paño y rodillos incluidos a sus extremos que, por medio de control remoto, logran una limpieza más rápida y segura que cualquiera de los métodos manuales. También existe un método de limpieza que utiliza una carga electrostática planteado por (Altıntaş, 2021) en donde, a través de dos variables de suma importancia como lo son el voltaje y frecuencia, en donde el autor comenta como conclusión a la implementación.

[...] La limpieza electrostática de paneles fotovoltaicos presenta numerosas ventajas, aunque también algunas desventajas. La mayor ventaja reside en que la limpieza electrostática está integrada en el panel fotovoltaico para que sea autolimpiable. La desventaja radica en el coste de reemplazar las técnicas de limpieza existentes y de adaptar los paneles de limpieza electrostática a los paneles fotovoltaicos existentes o de reemplazarlos. (p.15)

El método anterior, aunque eficiente, representa un reto para las industrias e instaladores ya que se requiere una adecuación eléctrica adicional a la ya instalada, esto tomando en cuenta que el consumo de energía de las industrias aumentaría por cada sesión de limpieza.

Otro método de limpieza mecánico conocido en varias industrias, es la instalación de tuberías con aspersores en las partes altas de las unidades fotovoltaicas, las cuales, están conectadas a una línea hidráulica de alta presión sea bien de una bomba centrifuga o un compresor. Este método tiene una gran ventaja y es que no requiere de personal especializado para su funcionamiento, ya que muchos en piso cuentan con un tablero eléctrico y conjunto de válvulas que se deben operar de tal forma que se garantice el flujo hídrico en todo el sistema. Estos modelos sugieren un nuevo método para prevenir la disminución de la eficiencia de los

paneles fotovoltaicos y la frecuencia de limpieza óptima por medio de una conexión IoT. Myyas (2022b)

Por último, se encuentran los métodos avanzados, los cuales buscan una reducción tanto en la mano de obra requerida para la limpieza como en el consumo de agua y energía necesaria para la misma. Dentro de estos se encuentran métodos de autolimpieza con superficies que facilitan el trabajo, en donde, se tienen retos importantes ya que dichas superficies pueden resultar en una afectación de la transparencia de la superficie la cual permite que la luz se aproveche en la unidad fotovoltaica. (Nomeir, 2023) Sumado a lo anterior, y teniendo en cuenta la zona de alcance, se deben tener en cuenta las condiciones más desfavorables del aire debido a la cantidad y tamaño del material particulado.

El gobierno colombiano ha implementado un marco legal amplio para promover el uso de las energías renovables con el fin de fomentar el desarrollo sostenible, a continuación, se presenta la normativa más relevante del país:

La Ley 1715 de 2014 cumple un papel importante en el impulso de las energías renovables en el país. Se creó con el fin de promover el uso de energía solar, eólica, biomasa, para ser más sostenible el país en cuanto a energía. El mayor propósito es reducir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir a un futuro más verde. (DIAN, 2015).

## **Metodología**

### **Enfoque**

La investigación adopta un enfoque mixto cuantitativo y cualitativo, ya que busca comprender las prácticas actuales de mantenimiento de paneles solares en la Sabana Norte de Bogotá, así como identificar la mejor tecnología para la limpieza que tenga un impacto positivo en la vida útil a partir de análisis estadísticos e investigaciones. Con base en lo anterior, se busca tener flexibilidad para la identificación de datos que sirvan para el desarrollo del estudio.

### **Alcance**

El alcance es descriptivo y exploratorio. Esto ya que describe las tecnologías actuales y emergentes utilizadas en la limpieza de paneles solares dentro del alcance geográfico definido. Así mismo, se busca encontrar las mejores alternativas con base en la investigación y tecnologías actuales, que puedan tener un impacto en la toma de decisiones por parte de las empresas en cuanto a la instalación y/o mantenimiento de paneles solares.

### **Diseño de la investigación**

En la investigación se opta por un diseño no experimental y transversal, esto gracias a que no se realiza manipulación deliberada de variables. De igual forma, se va a recolectar información en un único momento en el tiempo, esto por medio de varios métodos de recolección, como lo son investigación, observación directa y entrevista con uno o varios proveedores que tengan una muestra significativa de clientes en la sabana norte de Bogotá.

## Definición de variables

**Tabla 1**

### *Definición de variables con definiciones y dimensiones*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Tecnologías de limpieza de paneles solares	Métodos, técnicas o dispositivos usados para remover suciedad acumulada en los módulos fotovoltaicos con el fin de conservar su rendimiento.	Se identifican a través de revisión documental técnica, observación en campo y entrevistas con encargados de mantenimiento.	Tipo de tecnología (manual, automática, robótica), mecanismo de acción (cepillos, aire, agua), necesidad de supervisión humana.
Condiciones climáticas y ambientales	Factores del entorno natural (clima, geografía, contaminación) que inciden en la suciedad y eficiencia de los paneles solares.	Se describen mediante fuentes secundarias (IDEAM, estudios técnicos) y observación contextual en los sitios evaluados.	Nivel de precipitaciones, cantidad de polvo o partículas en suspensión, proximidad a zonas agrícolas o industriales.
Estrategias de mantenimiento	Conjunto de decisiones operativas y financieras que determinan la periodicidad y los recursos invertidos en la limpieza y mantenimiento del sistema fotovoltaico.	Se analizan mediante entrevistas a técnicos, revisión de reportes de mantenimiento y observación en campo.	Frecuencia de limpieza, costos directos e indirectos, asignación de personal e insumos.
Accesibilidad física al sistema fotovoltaico	Grado de dificultad para realizar tareas de limpieza, según la ubicación, altura o disposición del sistema.	Se observan directamente en visitas a campo y se documenta mediante registros fotográficos y notas técnicas.	Ubicación del sistema (techo, suelo), necesidad de equipos especiales, nivel de riesgo o dificultad.
Durabilidad de los paneles solares	Vida útil estimada de los paneles en función de sus condiciones de mantenimiento y operación.	Se define según especificaciones técnicas, literatura científica y entrevistas con fabricantes o técnicos.	Años de vida útil estimada, fallas comunes, efecto de la limpieza frecuente o deficiente sobre el desempeño.

*Nota:* Elaboración propia con base en Duffie y Beckman (2013), Green (2015), IDEAM (2024), y observación directa.

## **Población y muestra**

La población objeto de este estudio se conforma por empresas que cuentan con sistemas fotovoltaicos instalados en la región de la sabana norte de Bogotá. Para que estas compañías puedan ser consideradas, los paneles solares deben tener un tiempo de instalación mínimo de tres meses, lo cual permite observar condiciones reales de operación, mantenimiento y suciedad acumulada.

Dado el enfoque de la investigación, centrado en las tecnologías y estrategias de limpieza de los sistemas fotovoltaicos, el acceso a la población se realizó a través de proveedores de instalación, mantenimiento y limpieza que operan en la sabana norte. En consecuencia, el tipo de muestreo empleado fue por conveniencia, ya que las empresas seleccionadas son aquellas a las que se pueda acceder directamente a través de los proveedores y que cumplan los criterios previamente establecidos.

El tamaño de la muestra se ha estimado en aproximadamente 80 empresas de una población total de 120 empresas esto bajo un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 6,35%. Sumado a lo anterior, se respalda la validez de los resultados y se considera suficientemente representativa teniendo en cuenta la aplicación de criterios de diversidad geográfica, tecnológica y sectorial.

### **Selección de métodos o instrumentos para recolección de información**

Con base en el alcance descriptivo y exploratorio sumado al diseño de la investigación, se emplea la investigación documental enfocada en la obtención de información sobre la limpieza de paneles solares, la observación directa con base en las condiciones geográficas industriales en donde se encuentra un parque solar seleccionado con acceso permitido y las entrevistas estructuradas, las cuales se realizaron a uno o varios proveedores de servicios de limpieza y mantenimiento de paneles solares.

### **Investigación documental**

La investigación documental es el inicio para recolectar datos técnicos, esto facilita la comprensión de la limpieza de paneles solares y sus aplicaciones en diferentes contextos y condiciones ambientales que afectan la eficiencia de la generación de energía. Este método se centra en la recopilación y análisis de documentos técnicos, artículos científicos, manuales de operación y publicaciones académicas. Lo cual tiene como fin comprender las tecnologías de limpieza y mantenimiento disponibles, así como los factores que afectan el desempeño de los sistemas fotovoltaicos.

Para organizar y sintetizar esta investigación, se ha optado por el uso de cuadros comparativos que permiten contrastar las diversas tecnologías, mecanismos de acción, costos operativos, requerimientos técnicos, ventajas y limitaciones. Los cuadros comparativos facilitan la visualización rápida de las semejanzas y diferencias entre las

tecnologías existentes, lo que resulta clave para analizar la aplicabilidad de la investigación en la sabana norte de Bogotá.

La investigación documental brinda no solo el contexto técnico y ambiental, sino que también es el referente inicial para el diseño de los siguientes métodos, para asegurar que las preguntas planteadas y los aspectos evaluados tengan un respaldo teórico y conceptual.

### **Observación Directa**

La observación directa es un instrumento en el cual el equipo de investigación puede obtener información detallada sobre las condiciones reales a las cuales un sistema fotovoltaico instalado en Tocancipá se ve afectado en limpieza y mantenimiento, por las condiciones ambientales e industriales de acuerdo con su operación. El sistema instalado cuenta con 600 paneles y una potencia total de 200 kWp, instalado en los tejados de la planta industrial, aportando entre un 25 y 30% de ahorro energético. Así mismo, la observación puede arrojar algunas sugerencias de intervención en métodos de seguridad industrial que permitan una óptima y eficiente labor.

Durante las visitas al sistema fotovoltaico, se utilizaron herramientas como los registros de campo, notas técnicas y material fotográfico que apoyen el levantamiento y consolidación de aspectos clave como ubicación de los paneles, equipos utilizados para lavado y el estado general de todos los paneles.

La idea del instrumento es que sirva como un apoyo a la investigación documental, ya que, con la observación activa teniendo en cuenta la localización, se pueden comparar los resultados obtenidos con los estudios realizados en zonas con un comportamiento climático similar.

### **Entrevistas semiestructuradas**

Las entrevistas semiestructuradas dirigidas a proveedores de servicios de limpieza y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos, así como a personal capacitado de entidades que poseen sistemas fotovoltaicos en operación, es el último instrumento que se realiza en la investigación. La entrevista se lleva a cabo por medio de un guion que contempla preguntas referentes a los temas de investigación (limpieza y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos) que permiten explorar, a detalle, los métodos utilizados, periodicidad, los desafíos operativos y toma de decisiones claves en torno al mantenimiento.

Este tipo de entrevista permite recopilar datos concretos, así como comprender la experiencia subjetiva del personal capacitado en las entidades con sistemas fotovoltaicos involucrados en la operación de limpieza y mantenimiento, revelando sus percepciones, preocupaciones y lecciones aprendidas.

### **Técnicas de análisis de datos**

Las técnicas de análisis de datos se centran en garantizar que, mediante los tres instrumentos anteriormente nombrados, se tenga una confiabilidad sobre los datos obtenidos

y la obtención de resultados. A continuación, se presentan las técnicas propuestas para el desarrollo de la investigación.

### **Análisis de contenido temático**

Esta técnica de análisis se utiliza para los instrumentos de investigación documental, entrevistas y observación directa, ya que deben ser sometidas a un análisis de contenido temático que puede arrojar, a partir de información recurrente, patrones o categorías que se compartan o se asimilan entre los diferentes documentos a investigar, o bien, diferentes momentos de observación con diferentes variables de afectación.

Para el caso de las entrevistas, se propone un proceso de codificación manual que permita agrupar las diferentes fuentes de información en categorías enlazadas a las variables de estudio. Esta etapa también permite, de acuerdo con el ejercicio, que surjan algunas subcategorías que no se tenían contempladas y se deben contemplar.

De forma adicional, las observaciones visuales son verificadas por medio de registros fotográficos en diferentes momentos, teniendo en cuenta las condiciones climáticas e industriales, para encontrar algún patrón que muestre una afectación en el comportamiento de los paneles, causal de lo anterior.

### **Matrices de síntesis**

Todos los datos recopilados por las herramientas de recolección de datos se deben organizar en matrices de síntesis que permiten realizar la comparación de diversas tecnologías de limpieza en términos de costo, efectividad, requisitos técnicos y adecuación ambiental. Estas matrices comparativas o cuadros son esenciales para comparar los hallazgos de la investigación y los resultados de las entrevistas con la observación directa.

Del mismo modo, se utilizan matrices de triangulación para comparar los resultados de los métodos de recolección de datos, con el fin de obtener un resultado sólido basado en

una variedad de fuentes. Esta comparación permite la validación de la consistencia de los datos y la identificación de cualquier posible desviación.

### **Análisis contextual**

Las variables del entorno suman importancia en la observación directa y las entrevistas semiestructuradas; por lo tanto, se realiza un análisis conceptual que considere valores como condiciones geográficas, tipo de industria cercana y ubicación exacta. Todo esto bajo el alcance de la Sabana Norte de Bogotá.

El análisis se realiza por medio de herramientas de apoyo como lo son los reportes técnicos del IDEAM y publicaciones ambientales de entes locales que permiten conocer la forma en la que las variables externas afectan e influyen directamente en el funcionamiento, mantenibilidad y vida útil de los sistemas fotovoltaicos.

## **Análisis y discusión de los resultados**

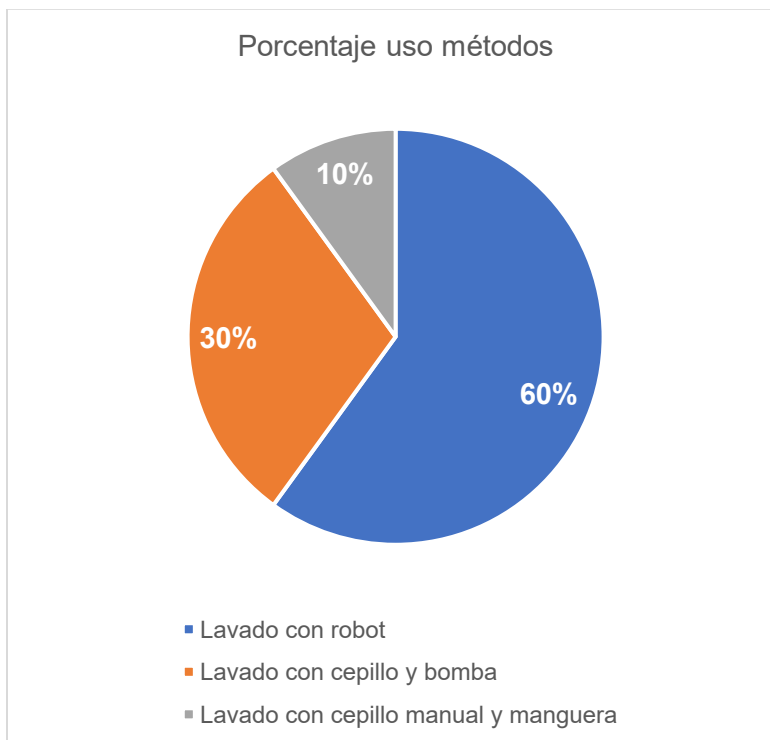
### **Investigar las tecnologías más utilizadas para la limpieza y mantenimiento de paneles solares**

Con base en la entrevista semiestructurada, en la cual se obtuvieron datos concretos sobre el uso de sistemas de limpieza en paneles solares fotovoltaicos en 80 empresas clientes del contratista entrevistado, se muestran los porcentajes de uso de cada método de limpieza

utilizado en la Figura 1 a continuación, esto teniendo en cuenta que, los métodos son lavado con robot, lavado con cepillo y bomba y, por último, lavado con cepillo manual y manguera.

**Figura 1.**

*Distribución de % de uso métodos de lavado para 80 empresas.*



*Nota:* Elaboración propia con base en datos proporcionado en entrevista semiestructurada (Anexo 01)

Sumado a lo anterior, y a través de la investigación documental realizada, se logró identificar los principales métodos tradicionales, mecánicos y avanzados empleados en la actualidad para la limpieza y el mantenimiento de paneles solares. Entre los cuales se destacan los relacionados a continuación:

Limpieza manual, el cual es llevado a cabo aplicando agua sobre los paneles solares y secando con paños suaves. Lo recomendable es ejecutar esta limpieza en horas de baja irradiancia evitando de esta forma que los paneles sufran cambios bruscos de temperatura. (León-Vargas et al., 2021)

Este método de limpieza exige a los operarios a estar cerca de los paneles solares lo cual dependiendo de la ubicación de estos puede llegar a generar una situación de exposición al peligro como lo puede ser un trabajo en alturas en caso de que se encuentren instalados en techos o cubiertas y de ser así se debe garantizar el uso adecuado de Elementos de Protección Personal (EPP's) por parte de los operarios, así como constatar los certificados vigentes de trabajo en alturas junto con la adecuación correspondiente a líneas de vida o medidas a las que haya lugar.

Otro punto para tener en cuenta en este método es que se requiere de una cantidad importante de mano de obra calificada y recurso hídrico, por lo tanto, se hace costoso y difícil de mantener con el tiempo para la industria como se mencionó en el marco teórico de la presente investigación.

Limpieza pasiva por medio de película cristalina hidrofóbica, la cual consiste en adherir a la superficie del panel solar una película de dióxido de titanio. Al momento que el material se encuentra expuesto a los rayos ultravioleta, permite una mayor capacidad de permeabilidad del agua originado por el efecto de pasar a ser altamente hidrofílico, con la expectativa de que el aire intervenga como medio de dispersión para desprender el polvo de la superficie mitigando el riesgo de rayones en el panel. Sin embargo, este método requiere de mano de obra para remover la suciedad y puede llegar a reducir la eficiencia del panel hasta en un 18% a causa del índice de refracción del material. (Sinisterra & Solano, 2023)

Limpieza activa por medio de película transparente electrodinámica, la cual consiste en la alternancia del voltaje en los electrodos, las partículas de polvo alojadas sobre el material dieléctrico consiguen carga eléctrica. El aire procede como el electrodo opuesto dentro del sistema, los átomos en la superficie de la película adquieren una carga negativa, mientras que las partículas de polvo se cargan positivamente, esta oposición de cargas genera una fuerza dielectroforética que impulsa las partículas hacia arriba. Una vez en movimiento, estas partículas son arrastradas por las corrientes de aire que fluyen sobre la

superficie de la película. Este método resulta cómodo, al no requerir de mano de obra para remover la suciedad, y puede ser alimentado directamente por el propio panel. Además, puede llegar a remover hasta el 90% del polvo acumulado en menos de dos minutos, utilizando menos del 0,1% de la energía generada. (Sinisterra & Solano, 2023)

Sistema de limpieza por cavitación ultrasónica, el cual consiste en posicionar dos componentes cerámicos piezoeléctricos a cada lado del sistema, estos componentes estimulan vibraciones transversales en las placas de las celdas del panel generando una presión acústica entre las placas. Se vierte un poco de agua sobre la superficie del panel para que actúe como medio transmisor de las ondas acústicas. La presión ejercida sobre el agua provoca un fenómeno de cavitación, en el cual se forman burbujas microscópicas que, al momento de colapsar, desprenden el polvo adherido a el panel y lo trasladan hacia el exterior, facilitando su eliminación. (Sinisterra & Solano, 2023)

Limpieza con robot de rodillos, realiza la limpieza del panel de forma longitudinal y por secciones, desplazándose por medio de correas de alta fricción que le permiten adherirse firmemente a la superficie. Está equipado con dos correas cerradas de poliuretano, independientes entre sí, las cuales direccionan el movimiento. Su desplazamiento principal es lineal, pero al activar solo una de las correas, el robot puede cambiar de zona, ya sea ascendiendo o descendiendo. En cada extremo cuenta con un cepillo, aunque solo se pone en funcionamiento aquel que corresponde a la dirección en la que se desee llevar a cabo la limpieza con el fin de evitar rayar la superficie del panel más allá de los límites tolerables. Una desventaja de este método es que las imperfecciones que se pueden ocasionar si se superan los límites podrían reducir la eficiencia del panel. Además, el robot no depende de un sistema de coordenadas (x, y) para moverse, lo que le permite desplazarse libremente en cualquier dirección, en ese orden de ideas este no se clasifica como cartesiano. (Sinisterra & Solano, 2023)

Robot de limpieza cartesiano, el cual realiza la limpieza mediante desplazamiento limitado a coordenadas en los ejes horizontal (x) y vertical (y). El movimiento vertical se logra mediante un tornillo de potencia, que permite al mecanismo ascender o descender, mientras que el desplazamiento horizontal se ejecuta a través de un motor paso a paso que acciona un conjunto de poleas y una correa. El cepillo, montado sobre esta correa, se desliza en línea recta sobre la superficie del panel al activarse las poleas.

El principio de funcionamiento se basa en realizar barridos horizontales: una vez que el cepillo ha recorrido toda la distancia en línea recta a lo largo del panel, el tornillo de potencia entra en acción para mover el sistema hacia una nueva franja, justo debajo o encima de la anterior, permitiendo continuar con la limpieza en niveles sucesivos.

Sin embargo, este diseño presenta ciertos inconvenientes para su aplicación en superficies de gran tamaño. A causa de que la estructura vertical central contiene el tornillo de potencia, este puede llegar a obstaculizar el paso de la luz en algunas zonas del panel.

Además, el sistema depende del uso de agua para realizar una limpieza efectiva, lo que implica contemplar inyectores y mangueras conectadas al cepillo. Por estas razones, podría considerarse la incorporación de un método complementario de limpieza que reduzca la cantidad de componentes requeridos. (Sinisterra & Solano, 2023)

El análisis permite evidenciar que no existe un método único idóneo para la limpieza y mantenimiento de los paneles, sino que la elección se encuentra sujeta a el contexto operativo: tamaño del sistema fotovoltaico, ubicación geográfica, frecuencia de ensuciamiento, disponibilidad de recursos hídricos y económicos.

En zonas urbanas y residenciales, los métodos manuales siguen siendo los más destacados, aunque pueden complementarse con el uso de agua ionizada o sistemas semiautomatizados para mayor eficacia.

En instalaciones industriales o granjas solares, los robots y revestimientos auto limpiantes brindan una solución sostenible a largo plazo, aunque requieren de una inversión inicial significativa.

En zonas desérticas o con restricciones hídricas, los métodos secos o la automatización se vuelven fundamentales para asegurar la continuidad operativa sin dañar el medio ambiente.

### **Analizar las condiciones ambientales de la Sabana Norte de Bogotá y su impacto en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos.**

Para analizar como influyen las condiciones climáticas y ambientales en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, se realizó un estudio basado en observación directa de sistemas fotovoltaicos instalados en la sabana norte de Bogotá, una región que se caracteriza por una alta participación de la actividad industrial, un clima templado y una altitud significativa. Además de revisión documental de fuentes secundarias para lo que se realizó una triangulación de las dos fuentes descritas.

#### ***Nivel de precipitación***

Uno de los principales factores del análisis es el promedio de lluvias anuales en la zona. Según los datos obtenidos por observación directa, el sistema fotovoltaico evaluado presento los siguientes niveles de precipitación acumulada.

#### **Figura 2.**

*Grafica acumulado de lluvias año 2022 a 2024*



*Nota:* el grafico representa la acumulación de lluvias desde el año 2022 hasta el año 2024, datos tomados de la base de datos de la compañía donde se encuentran instalados los paneles solares en la sabana norte de Bogotá.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores mostrados en la gráfica anterior muestran una disminución de las precipitaciones durante los últimos tres años, lo cual indica una menor limpieza natural de los paneles por el efecto de la lluvia. Con esta situación se aumenta la capa de polvo y material particulado sobre los paneles solares, lo que reduce su eficiencia y se traduce en mayor frecuencia de lavado de paneles solares.

Estos datos coinciden con los reportes climáticos del IDEAM (2023) donde muestra una tendencia general en la disminución de precipitaciones en la región atribuido al fenómeno del niño.

### ***Temperatura ambiente.***

En los mismos periodos de tiempo entre el año 2022 y 2024 la temperatura diaria registrada en la sabana norte de Bogotá fue de 15,38 °C, con temperaturas mínimas promedio de 8,3 °C y alcanzando un máximo promedio de 21 °C. Estos datos obtenidos mediante observación directa se encuentran dentro de los rangos característicos de la zona analizada,

aunque no son extremos influyen levemente en la producción de energía solar, especialmente cuando en las horas pico de irradiación los paneles pueden alcanzar una temperatura máxima de 45 °C.

Aunque la temperatura no afecte en gran escala la eficiencia de los paneles solares si incide en la evaporación de la humedad disminuyendo la adhesión de partículas cuando las condiciones del viento lo favorecen.

### ***Contaminación industrial.***

La contaminación industrial es uno de los hallazgos más relevantes que se obtuvo mediante observación directa. Se documentaron diferencias notables en la acumulación de suciedad entre paneles solares ubicados en áreas cercanas a una caldera de carbón en operación (Termozipa) y otros instalados en zonas sin cercanía a fuentes industriales, a continuación, se presentan dos imágenes comparativas que ilustran las dos situaciones.

### **Figura 3**

*Panel solar expuesto a emisiones de una caldera de carbón, con acumulación visible de residuos.*



*Nota:* Fuente, elaboración propia.

**Figura 4.**

*Panel solar alejado de fuentes industriales, con superficie relativamente limpia.*



*Nota:* Fuente, elaboración propia a partir de observación directa

De acuerdo con las figuras 3 y 4 se evidencia como la proximidad a fuentes contaminantes, en este caso una caldera de carbón la cual emite material particulado por su operación normal aumenta significativamente la suciedad adherida a los paneles solares, esto impacta directamente en la frecuencia de lavados del sistema fotovoltaico y la disminución en la eficiencia del sistema.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, se encontró que las condiciones meteorológicas, ambientales y de contaminación afectan directamente la producción de energía

en los sistemas fotovoltaicos. Particularmente la reducción de las lluvias y la proximidad a fuentes industriales, esto impacta directamente en la frecuencia de lavado ya que debe ser determinada no solo por intervalos de tiempo fijos sino por el seguimiento y control de las condiciones climáticas, nivel de suciedad y disminución de la eficiencia del sistema.

### **Comparar la eficiencia, costos y sostenibilidad de distintas soluciones de limpieza disponibles en el mercado.**

La comparación de la eficiencia, los costos y el impacto en sostenibilidad de las diferentes soluciones disponibles en el mercado se llevó a cabo bajo varios frentes de trabajo, utilizando los métodos de recolección de información de observación directa y entrevistas semiestructurados, alineado también a las técnicas análisis de contenido temático y matrices de síntesis, todo lo anterior con base en las variables planteadas en la Tabla 1 que impactan en el objetivo planteado.

Para el caso de la comparación en eficiencia y costos, se hace una matriz de síntesis que se muestra en la siguiente tabla a continuación, en donde, por medio del cálculo de una eficiencia que tiene en cuenta las variables de área limpiada por panel (m<sup>2</sup>) y el costo total por cada panel lavado (COP), basado en la fórmula general que define la métrica a partir de lo que se obtiene del proceso (en este caso el lavado) y los recursos usados para obtener ese resultado (para nuestro caso, costos energético, de consumo de agua y horas hombre), aplicando así la siguiente fórmula (1).

$$Eficiencia = \frac{\text{Área de panel lavado (m}^2\text{)}}{\text{Total recursos usados (COP)}} \quad (1)$$

Donde:

- Área del panel lavado = Área total que se lava por cada panel expresada en m<sup>2</sup>
- Total, recursos usados = La suma de los recursos usados en energía, agua y horas hombre

A partir de la fórmula (1) presentada y teniendo en cuenta que cada panel instalado en la zona en donde se realizó la observación tiene un área de 0.96 m<sup>2</sup>, se realizaron los cálculos correspondientes, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 2, allí, se pueden observar los valores obtenidos en la observación directa, realizada el miércoles 21 de Mayo, en donde para el caso

**Tabla 2**

*Tabla de consumos y horas hombre para métodos de limpieza.*

Método de Limpieza	Consumo Energético por Panel (kWh)	Consumo de Agua (L/h)	Tiempo de lavado por panel (seg)	Tiempo total para 600 paneles (min)	Mano de Obra Requerida (personas)	Observaciones
Lavado con robot	0,001	2345	30	300	3	El robot permite un lavado óptimo en un tiempo competitivo frente a otros métodos de lavado. El cepillo doble permite un lavado óptimo, sin embargo, al ser manual representa un mayor tiempo de lavado con la misma mano de obra.
Lavado con cepillo y bomba	0,0062	5600	60	480	4	
Manual con cepillo y manguera	0	15000	120	600	6	

Nota: Elaboración propia con base en resultados obtenidos de observación directa y entrevista semiestructurada.

**Tabla 3**

*Eficiencia económica y desglose de costos de tres métodos de limpieza de paneles solares.*

Método de Limpieza	Eficiencia (m <sup>2</sup> /100000 COP)	Costo energético lavado paneles (COP)	Costo consumo de agua (COP)	Costo mano de obra (COP)
Lavado con robot	2,22	420	8.587,39	36.117,00
Lavado con cepillo y bomba	1,40	2.604,00	20.507,20	48.156,00
Manual con cepillo y manguera	0,79	0	54.930,00	72.234,00

Nota: Cálculo de eficiencia económica con base en área de 0.96 m<sup>2</sup> limpiada. Elaboración propia con datos simulados.

Referencias: Cooper et al. (2007); Farrell (1957); Singh et al. (2007).

Como resultado de la Tabla 3, se aprecia que el método de limpieza por robot tiene una mayor eficiencia con respecto a los otros dos, esto gracias al alto impacto que genera la mayor cantidad de mano de obra necesaria para la limpieza en los métodos de lavado con cepillo y manual con cepillo (datos de mano de obra tomados de la entrevista semiestructurada), sumado al bajo consumo energético, teniendo en cuenta que el robot funciona con baterías recargables y el bajo consumo de agua (medido por observación directa).

**Proponer la tecnología más viable para la sabana norte de Bogotá, considerando factores técnicos, económicos y ambientales.**

Con base en lo expresado anteriormente en donde se arrojan los resultados de los objetivos específicos correspondientes y buscando una respuesta a la propuesta de la mejor tecnología con respecto al alcance estimado para este trabajo, se realiza la siguiente matriz de decisión teniendo en cuenta los siguientes criterios de calificación.

Para las rúbricas se estimó una calificación de 1 a 5, donde 1 es no recomendable y 5 es muy recomendable. Para la estimación, tenemos en cuenta los métodos de recolección de información, la investigación documental y la experiencia adquirida en la observación directa sumado a lo que se conoce del mercado de energía solar en el alcance estimado.

**Tabla 4**

*Matriz de decisión con base en la eficiencia e investigación de los métodos de limpieza.*

Método	Facilidad del recurso	Facilidad de instalación	Capacitación del personal	Aplicación en la zona	Sostenibilidad	Promedio
Cepillo manual	5	5	4	3	3	3.8
Cepillo con bomba	4	4	5	4	4	4.2
Robot de limpieza	3	4	4	5	5	4.4

Película hidrofóbica cristalina	2	3	5	1	3	2.8
Película electrodinámica transparente	3	2	3	1	2	1.85

*Nota:* Elaboración propia.

Para la Tabla 4, se tomaron los siguientes pesos para cada uno de los ítems a evaluar, dando como resultado un impacto en los promedios calculados.

Facilidad del recurso = 20%

Facilidad de instalación = 25%

Capacitación del personal = 15%

Aplicación en la zona = 40%

Así mismo, se tomó como referencia una calificación de 1 a 5, en donde:

1. Es muy desfavorable.
2. Es desfavorable.
3. Es favorable.
4. Es muy favorable.
5. Es excelente.

### **Conclusiones**

El estudio realizado permite identificar las tecnologías más adecuadas para el mantenimiento de paneles solares en la Sabana Norte de Bogotá, concluyendo que la solución del robot de limpieza tiene la mejor viabilidad bajo el alcance planteado según la matriz de decisión de la Tabla 4. De igual forma, se evidencia que estas tecnologías mejoran la eficiencia y prolongan la vida útil de los sistemas fotovoltaicos al garantizar una limpieza periódica y efectiva, permitiendo adaptarse mejor a las condiciones climáticas y operativas.

Las tecnologías más empleadas en el mantenimiento de paneles solares comprenden métodos manuales, mecánicos y semiautomatizados (robots) con uso de recurso hídrico. Igualmente, tecnologías pasivas como las películas hidrofóbicas y electrodinámicas fueron consideradas, aunque su uso sigue siendo limitado en la zona. Las tecnologías más comunes son aquellas que requieren menor inversión inicial y permiten su implementación sin necesidad de infraestructura especializada.

El estudio permitió evidenciar que las condiciones climáticas y ambientales de la sabana norte de Bogotá, como la contaminación, el polvo y la reducción de lluvias afectan directamente la eficiencia de los paneles solares. Los diferentes factores mencionados hacen que la frecuencia en la limpieza de los paneles solares no dependa de una periodicidad fija, sino que se debe ir ajustando de acuerdo con el comportamiento del clima, el nivel de suciedad y el rendimiento del sistema. Por esto se hace necesario que las tecnologías usadas para limpiar los sistemas fotovoltaicos se adapten al entorno local y permitan un mantenimiento más oportuno, eficiente y sostenible.

Al comparar diferentes tecnologías, se identificó que los métodos automatizados como los robots de limpieza ofrecen mayores ventajas en eficiencia y reducción del esfuerzo humano. Los sistemas como el cepillo con bomba representan una alternativa intermedia con buenos resultados en relación costo-beneficio. Las soluciones químicas y pasivas, como las películas, aún no presentan una relación costo-eficiencia favorable para esta zona, debido a su baja accesibilidad tecnológica y limitaciones de aplicación. En términos de sostenibilidad, los métodos que tienen un uso óptimo de agua y/o energía para su funcionamiento se consideran los más adecuados, lo anterior teniendo en cuenta los factores económicos del recurso utilizado y sus bajas afectaciones sociales para las poblaciones aledañas.

Con base en el análisis realizado en el documento en donde se estudia la viabilidad técnica, económica y sostenible, se recomienda optar por tecnologías que combinen accesibilidad del recurso, facilidad de implementación y sostenibilidad operativa.

### Lista de referencias

Alvarez, G., Moradi, H., Smith, M., & Zilouchian, A. (2017). *Modeling a Grid-Connected PV/Battery Microgrid System with MPPT Controller*. arXiv (Cornell University).

<https://doi.org/10.48550/arxiv.1710.00063>

Avance Jurídico Casa Editorial Ltda. (n.d.-b). *Compilación Jurídica de la DIAN - Ley 1715 de 2014*. © Avance Jurídico Casa Editorial Ltda., Dirección De Impuestos Y Aduanas Nacionales - DIAN. [https://normograma.dian.gov.co/dian/compilacion/docs/ley\\_1715\\_2014.htm](https://normograma.dian.gov.co/dian/compilacion/docs/ley_1715_2014.htm)

Altıntaş, M., & Arslan, S. (2021). *The study of dust removal using electrostatic cleaning system for solar panels*. *Sustainability*, 13(16), 9454. <https://doi.org/10.3390/su13169454>

Barbosa Urbano, J. (2010). *Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica*. *Revistas UCC*. Retrieved June 15, 2010, from

<https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/download/453/458/>

Cao, Y., Liu, C., Huang, Y., Wang, T., Sun, C., Yuan, Y., Zhang, X., & Wu, S. (2016). *Parallel algorithms for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems planning optimization problem: Material selection and quantity demand optimization*. *Computer Physics Communications*, 211, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.07.009>

CAR declaró nivel de prevención por contaminación del aire en zona rural de Bogotá. (2024, September 7). CAR. <https://www.car.gov.co/saladeprensa/car-declaro-nivel-de-prevencion-por-contaminacion-del-aire-en-zona-rural-de-bogota-1>

Clavijo, L. J. R. (2024, October 22). Este es el nuevo parque solar que inaugurará la empresa Corona en Cundinamarca. *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/energia/corona-inaugurara-nuevo-parque-solar-en-cundinamarca-615868>

Colombia Energía Solar Tamaño del Mercado | Mordor Intelligence. (n.d.). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/colombia-solar-energy-market>

Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software* (2nd ed.). Springer.

Cristaldi, L., Faifer, M., Rossi, M., Toscani, S., Catelani, M., Ciani, L., & Lazzaroni, M. (2014). Simplified method for evaluating the effects of dust and aging on photovoltaic panels. *Measurement*, 54, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.001>

Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2013). Frontmatter. In *Solar Engineering of Thermal Processes* (eds J.A. Duffie and W.A. Beckman). <https://doi.org/10.1002/9781118671603.fmatter>

Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 120(3), 253–290. <https://doi.org/10.2307/2343100>

Fouda, A., Nada, S., & Elattar, H. (2016). An integrated A/C and HDH water desalination system assisted by solar energy: Transient analysis and economical study. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1320–1335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.026>

Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A., Hoorsun, A., Parsay, A., Gholami, A., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Kazem, H. (2024). Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101629. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101629>

Ghazi, S., & Ip, K. (2014). The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK. *Renewable Energy*, 69, 50–59.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.018>

Green, M. A. (1982, January 1). *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*. <https://www.osti.gov/biblio/6051511>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Annenberg School for Communication, Baptista Lucio, P., Ma. de la Luz Casas Pérez, McGRAW-HILL, Pecina Hdez., J. C., & García G., Z. (1991). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. McGRAW-HILL.

[https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n\\_Sampieri.pdf](https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf)

Hooshyar, P., Moghadasi, H., Moosavi, S. A., Moosavi, A., & Borujerdi, A. N. (2024). Recent progress of soiling impact on solar panels and its mitigation strategies: A review. *Applied Energy*, 379, 124979. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124979>

IDEAM. (2024). *Estudios técnicos y climatológicos*. <https://www.ideam.gov.co/>

IRENA, Prime, J., Abdulkadir Ahmed, I., Akande, D., Elhassan, N., Melnikov, Y., & Whiteman, A. (2025). Renewable capacity statistics 2025. International Renewable Energy Agency. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA\\_DAT\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2025.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf)

León-Vargas, F., García-Jaramillo, M., Yara, G. M., & Parra, A. (2021). *Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá*.

<https://www.redalyc.org/journal/4988/498870299009/html/>

Lorduy, J. (2024, June 7). La compañía Alpina inauguró su primera granja solar en Sopó, Cundinamarca. *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/sostenibilidad/la-compania-alpina-inauguro-su-primera-granja-solar-en-sopo-cundinamarca-606316>

Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307–1316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>

Mejía, E. (2019). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica. <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/81/80>

Muhsen, D. H., Ghazali, A. B., Khatib, T., Abed, I. A., & Natsheh, E. M. (2016). Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using a multi-objective evolutionary algorithm. *Energy*, 109, 961–973. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.070>

Myyas, R. N., Al-Dabbasa, M., Tostado-Véliz, M., & Jurado, F. (2022). A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. *Solar Energy*, 237, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>

Nomeir, B., Lakhouil, S., Boukheir, S., Ali, M. A., & Naamane, S. (2023). Recent progress on transparent and self-cleaning surfaces by superhydrophobic coatings deposition to optimize the cleaning process of solar panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 257, 112347. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112347>

Ojeda Durán, E. (2018, May). Historia, Desarrollo y Actualidad de las Celdas Solares.

Salamanca-Avila, S. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*, 3(30), 263. <https://doi.org/10.14483/23448350.12213>

Ramirez, N. (2025). Así quedó el salario mínimo 2025 en Colombia: Incrementó 9,54% para este año. *Magneto Global*. <https://www.magneto365.com/es/blog/salario-minimo-vigente>

Shahzad, N., Hussain, N., Umar, S., Azam, M. F., Yousaf, T., & Waqas, A. (2025). Impacts of soiling on solar panel performance and state-of-the-art effective cleaning methods: A recent review. *Journal of Cleaner Production*, 145119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145119>

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2007). Development of composite sustainability performance index for steel industry. *Ecological Indicators*, 7(3), 565–588. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.06.003>

Sinisterra, D., & Solano, J. (2023). Desarrollo de un sistema de limpieza autónomo para paneles solares ubicados a gran altura. Pontificia Universidad Javeriana.

Song, Y., Huang, L., Wang, Y., Du, Y., Song, Z., Dong, Q., Zhao, X., Qi, J., Zhang, G., Li, W., & Shi, L. (2025). Energy performance and fire risk of solar PV panels under partial shading: an experimental study. *Renewable Energy*, 122910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122910>

Tahir, M. F., Tzes, A., El-Fouly, T. H., Moursi, M. S. E., & Larik, N. A. (2025). Evaluating soiling effects to optimize solar photovoltaic performance using machine learning algorithms. *Energy Conversion and Management X*, 100921. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100921>

Villegas, A. (2025). Salario Mínimo en Colombia 2025. *Politécnico De Suramérica*. <https://www.polisura.edu.co/salario-minimo-en-colombia>

Xiang, Q., Liu, H., Huang, M., & Zhang, Y. (2025). A superhydrophobic composite coating with transparency, long-term durability and self-healing properties for cleaning of photovoltaic systems. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 136666. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136666>