



Análisis de la viabilidad técnica y económica del monitoreo inteligente de sistemas fotovoltaicos como estrategia de innovación y sostenibilidad energética en Cúcuta, Norte de Santander, año 2025.

Anderson Iván Castellanos Dimingo  
Jared Stevenson Bedoya Castillo

Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Rectoría Virtual  
Programa Especialización en Gerencia de Proyectos  
Enero de 2026

Análisis de la viabilidad técnica y económica del monitoreo inteligente de sistemas fotovoltaicos como estrategia de innovación y sostenibilidad energética en Cúcuta, Norte de Santander, año 2025.

Anderson Ivan Castellanos Dimingo  
Jared Stevenson Bedoya Castillo

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesora  
Doris Amanda Rosero García  
Microbióloga, M.Sc., PhD.  
Posdoctorado en Microbiología Ambiental

Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Rectoría Virtual  
Programa Especialización en Gerencia de Proyectos  
Enero de 2026

## Contenido

Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción .....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1 Descripción del problema .....	12
1.2 La pregunta de investigación .....	15
1.3 Los objetivos de investigación.....	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	16
1.4 Justificación de la investigación .....	16
1.4.1 Beneficios económicos: .....	17
1.4.2 Beneficios sociales:.....	17
1.4.3 Beneficios ambientales: .....	17
1.4.4 Beneficios académicos y profesionales: .....	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1. Marco de Antecedentes.....	19
2.2. Marco Teórico .....	20
2.3. Marco normativo .....	22
3. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Enfoque y alcance de la investigación.....	24
3.2. Población y muestra.....	24
3.2.1. Definición de la población .....	24
3.2.2. Cálculo y selección de la muestra.....	25
3.3. Instrumento(s).....	25
3.4. Descripción de procedimientos .....	26
3.5 Análisis de información .....	26
3.6 Consideraciones éticas .....	27
3.6.1 Análisis de consideraciones éticas .....	27

3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización.....	27
4. RESULTADOS .....	28
6. DISCUSIÓN .....	49
7. CONCLUSIONES .....	52
8. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS .....	54
REFERENCIAS.....	56

## Lista de Figuras

Figura 1 Tipo de instalación donde se encuentra el sistema fotovoltaico.....	28
Figura 2 Capacidad instalada del sistema (kW).....	29
Figura 3 Tiempo de funcionamiento del sistema.....	29
Figura 4 Monitoreo actualmente implementado. ....	30
Figura 5 Tipo de monitoreo implementado. ....	30
Figura 6 Detección oportuna de fallas. ....	31
Figura 7 Datos de monitoreo precisos y confiables. ....	32
Figura 8 Monitoreo para eficiencia energética. ....	32
Figura 9 Monitoreo para mantenimiento preventivo. ....	33
Figura 10 Monitoreo técnico esencial para el sistema fotovoltaico.....	34
Figura 11 Costos razonables de implementación.....	34
Figura 12 Reducción de costos mediante monitoreo. ....	35
Figura 13 Optimización del retorno de inversión. ....	36
Figura 14 Beneficios económicos justifican el costo. <i>inicial</i> . ....	36
Figura 15 Disposición a invertir para mayor rentabilidad. ....	37
Figura 16 Conocimiento del monitoreo solar. ....	38
Figura 17 Facilidad de uso del monitoreo.....	38
Figura 18 Confianza en la información de monitoreo. ....	39
Figura 19 Monitoreo fortalece la confianza en la energía solar.....	40
Figura 20 Recomendación del monitoreo fotovoltaico.....	40
Figura 21 Interés en implementar monitoreo.....	41
Figura 22 Capacidad económica para adquirir monitoreo.....	42

Figura 23 Disposición a capacitarse en monitoreo digital. ....	42
Figura 24 Incentivos gubernamentales al monitoreo solar. ....	43
Figura 25 Monitoreo obligatorio en proyectos fotovoltaicos. ....	44
Figura 26 Municipio o zona donde se ubica el sistema. ....	45
Figura 27 Cargo o rol del encuestado (propietario, técnico, administrador, otro).....	46
Figura 28 Nivel de formación académica. ....	46

## Resumen

El presente estudio analizó la viabilidad técnica y económica del monitoreo inteligente de sistemas de generación fotovoltaica como una alternativa de innovación y sostenibilidad energética en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, durante el año 2025. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo y aplicó como instrumento una encuesta dirigida a propietarios de viviendas, empresas y técnicos del sector energético, con el propósito de identificar el nivel de aceptación, conocimiento y percepción de rentabilidad respecto al uso de tecnologías de monitoreo en sistemas solares. Los datos recolectados fueron procesados mediante análisis estadístico y técnicas comparativas que permitieron evaluar la relación costo-beneficio y el impacto potencial del sistema propuesto. Los resultados evidenciaron que la mayoría de los encuestados reconoció la necesidad de implementar soluciones energéticas sostenibles, destacando el ahorro a largo plazo y la reducción de emisiones como los principales beneficios. Asimismo, se determinó que los costos iniciales pueden compensarse con los ahorros obtenidos en consumo energético y mantenimiento preventivo gracias a la automatización del monitoreo. Desde el punto de vista técnico, se comprobó la factibilidad de adaptar tecnologías inteligentes de bajo costo y alta eficiencia a las condiciones climáticas locales. En conclusión, el estudio demostró que el monitoreo inteligente de sistemas fotovoltaicos constituye una inversión viable que promueve la innovación, impulsa la sostenibilidad energética regional y contribuye a fortalecer la gestión de proyectos de desarrollo económico sostenible en la ciudad de Cúcuta.

*Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, energías renovables, impacto ambiental.*

## Abstract

This study analyzed the technical and economic feasibility of intelligent monitoring of photovoltaic generation systems as an innovation and energy sustainability strategy in the city of Cúcuta, Norte de Santander, during the year 2025. The research was developed under a quantitative and descriptive approach, applying a survey as the main instrument, aimed at homeowners, companies, and energy sector technicians to identify levels of acceptance, awareness, and perceived profitability regarding the use of monitoring technologies in solar systems. The data collected were processed through statistical and comparative analysis techniques that allowed the evaluation of the cost-benefit relationship and the potential impact of the proposed system. The results showed that most respondents recognized the need to implement sustainable energy solutions, highlighting long-term savings and emission reduction as the main benefits. It was also determined that the initial costs could be offset by savings in energy consumption and preventive maintenance due to automated monitoring. From a technical perspective, it was verified that low-cost and high-efficiency intelligent technologies can be adapted to local climatic conditions. In conclusion, the study demonstrated that intelligent monitoring of photovoltaic systems constitutes a viable investment that promotes innovation, supports regional energy sustainability, and strengthens the management of projects focused on sustainable economic development in the city of Cúcuta.

*Keywords: photovoltaic systems, renewable energy, environmental impact.*

## Introducción

El cambio climático y la creciente necesidad global de avanzar hacia modelos energéticos sostenibles han impulsado una transformación estructural en la manera en que las sociedades producen y consumen energía. En este contexto, las energías renovables —y en particular la energía solar fotovoltaica— se han posicionado como una alternativa estratégica debido a su bajo impacto ambiental, sus avances tecnológicos y la reducción progresiva de los costos de implementación. En Colombia, y especialmente en la ciudad de Cúcuta, las condiciones geográficas y climáticas ofrecen un alto potencial para la captación solar directa, lo que abre una importante oportunidad para el desarrollo de proyectos orientados a la transición energética sostenible. Sin embargo, la adopción de tecnologías fotovoltaicas continúa siendo limitada debido a factores como los altos costos iniciales, la falta de información técnica y el desconocimiento sobre los beneficios derivados del manejo y seguimiento eficiente de estos sistemas (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2022).

Bajo este panorama, el monitoreo inteligente de los sistemas de generación fotovoltaica emerge como un componente esencial para garantizar su desempeño óptimo, mejorar la sostenibilidad económica y aumentar su vida útil. Estas tecnologías permiten registrar y analizar en tiempo real variables clave como la irradiancia, la producción energética, la eficiencia de los paneles y las fallas en los componentes, lo cual aporta un valor agregado al proceso de gestión y mantenimiento. Desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, el monitoreo se consolida como una herramienta estratégica que fortalece la toma de decisiones y la rentabilidad a largo plazo, en consonancia con las sublíneas de investigación relacionadas con innovación,

sostenibilidad empresarial y valor compartido, así como con la gestión de proyectos de inversión privada y social.

Este estudio tuvo como propósito analizar la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de monitoreo inteligente para instalaciones fotovoltaicas en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, durante el año 2025. Su importancia radicó en aportar evidencia empírica que facilite el diseño de proyectos sostenibles en el ámbito residencial y empresarial, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética local y al fortalecimiento de políticas públicas orientadas al uso de energías limpias. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, utilizando como principal instrumento una encuesta aplicada a propietarios, técnicos y empresarios del sector. Este enfoque permitió identificar las percepciones sobre la rentabilidad, aceptación y beneficios del monitoreo fotovoltaico, integrando además información técnica sobre costos de implementación, eficiencia energética y retorno de la inversión.

Los resultados mostraron un alto nivel de aceptación hacia las soluciones tecnológicas de monitoreo, motivado principalmente por el potencial ahorro en el consumo energético, la reducción del impacto ambiental y el aumento de la eficiencia operativa. Asimismo, se evidenció que, aunque los costos iniciales pueden representar una barrera, estos pueden compensarse en el mediano plazo mediante los ahorros generados y la optimización de recursos. Desde el punto de vista técnico, se comprobó la factibilidad de implementar sistemas de monitoreo inteligente de bajo costo y buena compatibilidad con las condiciones climáticas de la región.

En síntesis, la investigación permitió concluir que el monitoreo inteligente de sistemas fotovoltaicos no solo constituye una inversión viable desde los aspectos técnicos y económicos,

sino que también representa una estrategia de innovación orientada a fortalecer la sostenibilidad energética y la competitividad local. De esta manera, el estudio contribuyó a la integración de la innovación y la sostenibilidad empresarial dentro de la gestión de proyectos de inversión, aportando un modelo replicable que favorece el desarrollo económico y ambientalmente responsable en la ciudad de Cúcuta.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Descripción del problema

En la última década, la expansión de las energías renovables se ha consolidado como una estrategia central para mitigar el cambio climático y avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles, donde la energía solar fotovoltaica ocupa un papel protagónico por su madurez tecnológica y su capacidad para integrarse en entornos urbanos y rurales (Tobajas, 2023) (Mendoza, Aristizabal, & Gonzalez, 2022). En América Latina y Colombia, diversos estudios señalan un crecimiento sostenido en la instalación de sistemas solares, impulsado por el potencial de recurso solar, los marcos normativos y la necesidad de diversificar la matriz energética (Mendoza, Aristizabal, & Gonzalez, 2022) (Keisang, Kumar, & Singh, 2021). No obstante, este avance no siempre se ha acompañado de una gestión adecuada de la operación y el mantenimiento de las instalaciones, especialmente en lo relacionado con el monitoreo sistemático de su desempeño, lo que genera riesgos sobre su sostenibilidad técnica y económica a largo plazo (Keisang, Kumar, & Singh, 2021) (Marangis, Yang, & Zhang, 2025).

En este contexto, la adopción de sistemas de generación solar fotovoltaica ha aumentado de manera significativa en Colombia, incluyendo regiones con alto potencial como el nororiente del país, donde Cúcuta presenta condiciones climáticas favorables para el aprovechamiento solar (Mendoza, Aristizabal, & Gonzalez, 2022). Sin embargo, uno de los aspectos más descuidados en este proceso ha sido la implementación de sistemas de monitoreo técnico que permitan supervisar y evaluar en tiempo real el desempeño de las instalaciones. La literatura reciente sobre operación y mantenimiento de plantas fotovoltaicas destaca que la disponibilidad de información precisa y continua es fundamental para garantizar el control eficiente de los procesos, optimizar

el rendimiento energético y reducir los costos a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Keisang, Kumar, & Singh, 2021) (Marangis, Yang, & Zhang, 2025). La ausencia de un monitoreo adecuado limita la capacidad para anticipar fallas, planificar mantenimientos preventivos y asegurar el retorno de la inversión realizada por los usuarios y las organizaciones.

El monitoreo en sistemas solares fotovoltaicos, particularmente cuando se apoya en tecnologías inteligentes y conectividad, se considera hoy un componente esencial y no un elemento accesorio de los proyectos (Keisang, Kumar, & Singh, 2021) (Rouibah, Barazane, 2025). A través de la recolección continua de datos sobre producción energética, condiciones ambientales, comportamiento de inversores y desempeño de cada componente, el monitoreo permite identificar pérdidas de eficiencia, anomalías de operación y oportunidades de optimización (Keisang, Kumar, & Singh, 2021) (Marangis, Yang, & Zhang, 2025). Desde la perspectiva de la innovación y la sostenibilidad empresarial, estos sistemas contribuyen a mejorar la productividad, reducir riesgos operativos y generar valor económico, ambiental y social de manera simultánea, en línea con los enfoques de modelos de negocio sostenibles y valor compartido (Alberti, 2023).

En contraste con estas tendencias, en la ciudad de Cúcuta se observa una limitada incorporación de tecnologías de monitoreo en las instalaciones solares existentes, lo que se traduce en un desaprovechamiento del recurso solar disponible y en dificultades para tomar decisiones basadas en evidencia. La falta de registros sistemáticos sobre generación, fallas y comportamiento del sistema dificulta la identificación de pérdidas de eficiencia asociadas a suciedad, degradación de paneles, fallas eléctricas, errores de instalación o interrupciones parciales, afectando la rentabilidad y la confiabilidad percibida de la tecnología (Mendoza, Aristizabal, & Gonzalez, 2022). Esta situación no solo tiene implicaciones técnicas y

económicas, sino que también reduce la capacidad de los usuarios y de los potenciales inversionistas para evaluar de manera objetiva el desempeño real de los proyectos fotovoltaicos.

La ausencia de lineamientos claros y de incentivos específicos orientados a integrar tecnologías de monitoreo y seguimiento en los proyectos de energías renovables refuerza esta brecha en contextos locales como Cúcuta, a pesar de que la literatura demuestra que el monitoreo inteligente contribuye a aumentar la eficiencia energética, disminuir costos de operación y extender la vida útil de los sistemas (Keisang, Kumar, & Singh, 2021) (Rouibah, Barazane, Benghanem, & Mellit, 2025). Este vacío limita la consolidación de modelos de negocio sostenibles basados en energías limpias y frena la generación de valor compartido para empresas, comunidades y territorio, aspecto clave en las agendas contemporáneas de innovación y sostenibilidad (Alberti, 2023).

Desde la perspectiva de la sublínea de investigación en innovación, sostenibilidad empresarial y valor compartido, el problema descrito se relaciona con la necesidad de incorporar soluciones de monitoreo inteligente como parte integral de la gerencia de proyectos de inversión en energía solar fotovoltaica. Estudios recientes sobre modelos de negocio sostenibles en el sector energético señalan que la integración de tecnologías de seguimiento, análisis de datos y control permite diseñar proyectos más resilientes, competitivos y alineados con objetivos de desarrollo sostenible (Mendoza, Aristizabal, & Gonzalez, 2022). En este sentido, analizar la viabilidad técnica y económica del monitoreo inteligente en sistemas fotovoltaicos de Cúcuta permite cerrar brechas de información, apoyar la toma de decisiones de usuarios e inversionistas y aportar evidencia para la formulación de proyectos de inversión privada, social y comunitaria orientados a la transición energética regional.

En consecuencia, esta investigación se planteó analizar de manera integral la viabilidad técnica y económica del monitoreo de sistemas solares fotovoltaicos en Cúcuta en el año 2025, considerando los requerimientos tecnológicos, los costos asociados y las percepciones de los actores involucrados. Con ello se busca aportar evidencia concreta sobre los beneficios del monitoreo inteligente, su contribución a la eficiencia y sostenibilidad energética, y su potencial para consolidarse como un componente estratégico en futuras instalaciones fotovoltaicas de la región, coherente con los principios de innovación, sostenibilidad y valor compartido que orientan la gerencia de proyectos de inversión.

## **1.2 La pregunta de investigación**

¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de monitoreo inteligente en instalaciones de generación solar fotovoltaica como estrategia de innovación y sostenibilidad energética en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander en el año 2025?

## **1.3 Los objetivos de investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de monitoreo inteligente en instalaciones de generación solar fotovoltaica como estrategia de innovación y sostenibilidad energética en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, en el año 2025.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Evaluar los aspectos técnicos relacionados con la integración de sistemas de monitoreo en instalaciones fotovoltaicas residenciales y comerciales en Cúcuta.

Analizar los costos y beneficios económicos asociados a la implementación de sistemas de monitoreo en proyectos de generación fotovoltaica en la ciudad.

Identificar los factores que afectan la eficiencia y confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos a través del monitoreo continuo.

## **1.4 Justificación de la investigación**

La creciente demanda energética y la necesidad de reducir el impacto ambiental derivado del uso de combustibles fósiles han impulsado la transición hacia fuentes de energía renovables, siendo la energía solar fotovoltaica una de las alternativas más prometedoras a nivel mundial y regional (Brown & Miller, 2017). En este contexto, la ciudad de Cúcuta, ubicada en el departamento de Norte de Santander, presenta condiciones climáticas favorables para la implementación de sistemas fotovoltaicos, gracias a su alta radiación solar promedio anual (Vargas, Ramírez, & Sánchez, 2021). Sin embargo, para garantizar la eficiencia y la sostenibilidad técnica y económica de estos sistemas, es fundamental contar con tecnologías de monitoreo que permitan evaluar en tiempo real su desempeño, detectar fallas y optimizar los procesos de mantenimiento (Medina & Vanegas, 2022).

Este proyecto de investigación se justifica en la necesidad de aportar conocimiento específico y contextualizado sobre la viabilidad técnica y económica del monitoreo en sistemas fotovoltaicos en Cúcuta, un tema que ha sido poco explorado en la región. La investigación permitirá identificar las condiciones y factores que influyen en la implementación efectiva de

estas tecnologías, contribuyendo a la toma de decisiones informadas para proyectos de inversión privada, social y comunitaria, alineados con las políticas nacionales de transición energética (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

#### **1.4.1 Beneficios económicos:**

La implementación de sistemas de monitoreo en proyectos fotovoltaicos permite optimizar la operación y el mantenimiento, reducir costos asociados a fallas y prolongar la vida útil de los equipos. Esto se traduce en una mayor rentabilidad y retorno de inversión para empresas, instituciones y usuarios, incentivando la adopción de tecnologías limpias en el sector energético local (Pérez C. M., 2020)

#### **1.4.2 Beneficios sociales:**

El acceso a energía limpia y confiable mejora la calidad de vida de la comunidad, fomenta la equidad energética y fortalece la participación social en proyectos de desarrollo sostenible. Además, la transparencia y el acceso a información técnica mediante sistemas de monitoreo fortalecen la confianza y la apropiación social de las tecnologías renovables (Medina & Vanegas, 2022).

#### **1.4.3 Beneficios ambientales:**

El uso de energía solar fotovoltaica reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de fuentes fósiles, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la protección de los recursos naturales de la región (Brown & Miller, 2017)

#### **1.4.4 Beneficios académicos y profesionales:**

Adicionalmente, al realizar este trabajo de investigación, se pretende afianzar los conocimientos adquiridos durante la especialización en Gerencia de Proyectos en la Corporación Universitaria Minuto de Dios. Por este motivo, se selecciona una investigación enfocada en el área de energías renovables, campo en el cual se proyecta aplicar los conocimientos de la especialización, especialmente en la gestión de proyectos de inversión privada, social y comunitaria. De la misma forma, se busca obtener un acercamiento con el ámbito laboral y proyectar una vida profesional en el sector energético, fortaleciendo competencias en análisis técnico, económico y social, y contribuyendo al desarrollo institucional y al posicionamiento de UNIMINUTO Virtual como referente académico en la formación de profesionales capaces de liderar proyectos innovadores y sostenibles.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Marco de Antecedentes

En el contexto específico de la ciudad, (Flores & Sandra, 2024) desarrolló una investigación titulada "Percepción de la implementación de paneles solares en el sector residencial de la comuna 3 en la ciudad de Cúcuta". El objetivo fue analizar el nivel de conocimiento y aceptación de las energías limpias entre los residentes. Para la recolección de datos, se diseñó y aplicó una encuesta estructurada dirigida a los habitantes del sector, indagando sobre barreras económicas, desconocimiento técnico y disposición de pago. Los resultados obtenidos mediante este instrumento cuantitativo permitieron identificar que, aunque existe una percepción positiva hacia la tecnología, la falta de información técnica y los costos iniciales son los principales obstáculos para su masificación. Este estudio es un referente directo para la presente investigación, ya que valida el uso de la encuesta como herramienta eficaz para caracterizar la viabilidad de proyectos fotovoltaicos en el entorno local (Flores & Sandra, 2024).

A nivel nacional, se destaca el estudio sobre los "Riesgos percibidos en la adopción de energía solar fotovoltaica en consumidores de servicios públicos en el Valle del Cauca". En esta investigación de enfoque cuantitativo, se utilizó como instrumento una encuesta aplicada a una muestra de 200 usuarios, utilizando escalas para medir variables como el riesgo financiero, el riesgo de desempeño técnico y la intención de adopción. El análisis estadístico de los datos recolectados permitió determinar que la incertidumbre sobre el rendimiento real de los equipos es una barrera significativa para la inversión. Este antecedente es fundamental porque demuestra cómo el uso de cuestionarios y análisis estadístico (metodología similar a la de este proyecto) permite correlacionar variables de percepción con la viabilidad técnica y económica de la tecnología solar (Ardila, 2025).

En el ámbito regional, (Narváez, 2024) realizó un estudio para identificar las "Barreras para la implementación de sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red en entornos urbanos". La metodología empleada fue de carácter cuantitativo, utilizando como instrumento principal una encuesta dirigida a 443 usuarios y profesionales del sector. El instrumento indagó sobre aspectos regulatorios, técnicos y económicos que limitan la adopción de estos sistemas. Los hallazgos, derivados del procesamiento estadístico de las encuestas, señalaron que el desconocimiento sobre el mantenimiento y la falta de monitoreo de los beneficios reales frenan la inversión. Esta investigación aporta un modelo metodológico validado para evaluar, mediante la técnica de encuesta, los factores críticos que afectan la operatividad y sostenibilidad de proyectos fotovoltaicos (Narváez, 2024).

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1 Sistemas de generación fotovoltaica y monitoreo técnico**

Los sistemas de generación fotovoltaica convierten la energía solar en electricidad mediante paneles solares y componentes electrónicos como inversores, que permiten la interconexión con la red eléctrica. El monitoreo técnico en estos sistemas es fundamental para garantizar su eficiencia y funcionamiento óptimo. A través de la recopilación y análisis de datos en tiempo real sobre la producción energética, estado de los equipos y condiciones ambientales, es posible detectar fallas, optimizar el mantenimiento y maximizar la generación de energía (Thakfan & Bin Salamah, 2024). En regiones como Cúcuta, donde la radiación solar es favorable, el monitoreo se convierte en una herramienta clave para asegurar la sostenibilidad técnica de los proyectos fotovoltaicos, permitiendo además la adaptación a las condiciones locales específicas (Pérez, López, & Sánchez, 2020).

### **2.2.2 Viabilidad técnica y económica del monitoreo en sistemas fotovoltaicos**

La viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos depende de factores como la calidad de los componentes, las condiciones ambientales y la capacidad de mantener un rendimiento constante a lo largo del tiempo. El monitoreo continuo contribuye a esta viabilidad al permitir la detección temprana de fallas y la optimización del mantenimiento, lo que reduce tiempos de inactividad y costos operativos (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2022). Desde la perspectiva económica, la implementación de sistemas de monitoreo puede representar una inversión inicial, pero se traduce en beneficios a mediano y largo plazo, al mejorar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de los equipos (Pérez C. M., 2020). En el contexto de Cúcuta, evaluar estos aspectos es esencial para promover proyectos de inversión privada, social y comunitaria que sean sostenibles y rentables.

### **2.2.3 Modelos predictivos y tecnologías avanzadas para el monitoreo en Cúcuta**

La aplicación de modelos adaptativos basados en inteligencia artificial, como el sistema ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), ha demostrado ser eficaz para estimar la radiación solar global en Cúcuta, superando limitaciones en la medición directa del recurso solar (Pérez, López, & Sánchez, 2020). Estos modelos permiten mejorar el diseño y la operación de sistemas fotovoltaicos al anticipar variaciones en la radiación solar y optimizar la gestión energética. La integración de tecnologías avanzadas de monitoreo con modelos predictivos es una tendencia creciente que favorece la viabilidad técnica y económica de los proyectos fotovoltaicos, facilitando la toma de decisiones informadas en la gerencia de proyectos energéticos (Thakfan & Bin Salamah, 2024).

### **2.3. Marco normativo**

#### **Ley 1715 de 2014: Régimen de fomento a las energías renovables no convencionales**

La Ley 1715 de 2014 establece el marco legal para la integración y promoción de las energías renovables no convencionales en Colombia, incluyendo la energía solar fotovoltaica. Esta ley busca incentivar la generación de energía limpia mediante beneficios tributarios, facilidades para la interconexión a la red y la promoción de proyectos de inversión pública y privada. Además, establece lineamientos para el monitoreo y control de calidad en los sistemas de generación, asegurando la eficiencia y sostenibilidad técnica y económica (Congreso de Colombia, 2014).

#### **Resolución CREG 030 de 2018: Regulación para la conexión de sistemas de generación distribuida**

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), mediante la Resolución 030 de 2018, regula la conexión de sistemas de generación distribuida, como los fotovoltaicos, a la red eléctrica nacional. Esta norma establece requisitos técnicos y administrativos para garantizar la seguridad, calidad y confiabilidad del suministro eléctrico, incluyendo la obligatoriedad de implementar sistemas de monitoreo que permitan supervisar la producción y el comportamiento de las instalaciones conectadas (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG),, 2018).

#### **Decreto 1073 de 2015: Reglamento único del sector de minas y energía**

El Decreto 1073 de 2015 compila las normas relacionadas con el sector de minas y energía en Colombia, incluyendo disposiciones para la promoción, regulación y control de proyectos de energías renovables. Este decreto contempla aspectos técnicos y administrativos

para la implementación de sistemas fotovoltaicos, así como la necesidad de contar con mecanismos de monitoreo y reporte que faciliten la gestión eficiente y el cumplimiento normativo (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

### **Norma Técnica Colombiana NTC 5937: Sistemas fotovoltaicos conectados a la red**

La NTC 5937 establece los requisitos técnicos para el diseño, instalación y operación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en Colombia. Esta norma incluye especificaciones para los sistemas de monitoreo, que deben garantizar la medición precisa de la energía generada, la detección de fallas y la evaluación del desempeño, contribuyendo a la viabilidad técnica y económica de los proyectos (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2016).

### **Política Nacional de Energía 2050**

La Política Nacional de Energía 2050, adoptada por el Ministerio de Minas y Energía, define las estrategias para la transición energética en Colombia hacia fuentes renovables y sostenibles. Esta política promueve la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo y gestión en proyectos de generación fotovoltaica, con el fin de optimizar la operación, fomentar la inversión social y comunitaria, y asegurar la sostenibilidad económica y ambiental (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Enfoque y alcance de la investigación**

El presente estudio adopta un enfoque **cuantitativo**, orientado a la recolección y el análisis de datos numéricos que permitan describir y establecer relaciones entre variables técnicas y económicas asociadas al monitoreo de sistemas de generación fotovoltaica en la ciudad de Cúcuta. Este enfoque es adecuado para obtener resultados objetivos, medibles y generalizables, fundamentales para evaluar la viabilidad técnica y económica del monitoreo en instalaciones solares (Hernández, Fernández, & Baptista, 2016). En cuanto al alcance, la investigación es de tipo **descriptivo**, ya que busca caracterizar la situación actual del monitoreo fotovoltaico y analizar la relación entre variables como costos, eficiencia, percepción de uso y adopción tecnológica (Sampieri & Fernandez, 2018).

#### **3.2. Población y muestra**

##### **3.2.1. Definición de la población**

La población objeto de estudio está conformada por propietarios, administradores y responsables técnicos de sistemas fotovoltaicos residenciales, comerciales e industriales en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. Esta población se distingue por su diversidad en cuanto a tipo y tamaño de instalación, nivel de conocimiento sobre energías renovables y experiencia en el uso de sistemas de monitoreo (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2022).

### **3.2.2. Cálculo y selección de la muestra**

Se aplicará un muestreo probabilístico estratificado, segmentando la población según el tipo de instalación (residencial, comercial, industrial). El tamaño de la muestra será calculado mediante la fórmula para poblaciones finitas, con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, garantizando representatividad y fiabilidad en los resultados (Hernández, Fernández, & Baptista, 2016). Los criterios de inclusión serán: ser responsable o tomador de decisiones sobre la instalación fotovoltaica y tener residencia o actividad en Cúcuta; los criterios de exclusión incluyen personas sin relación directa con la gestión del sistema o con menos de seis meses de experiencia en la instalación.

### **3.3. Instrumento(s)**

Se utilizará una encuesta estructurada como único instrumento de recolección de datos. Esta encuesta estará compuesta por preguntas cerradas y escalas tipo Likert, organizadas en secciones que aborden:

- Datos demográficos y del sistema fotovoltaico.
- Características técnicas del monitoreo.
- Costos asociados.
- Percepción de eficiencia y confiabilidad.
- Intención de adopción o mejora del sistema.

El instrumento será validado mediante juicio de expertos y prueba piloto para garantizar su confiabilidad y validez (Sánchez & González, 2022).

### 3.4. Descripción de procedimientos

- **Preparación:** Validación del instrumento, obtención de permisos y capacitación al equipo de trabajo para la correcta aplicación de la encuesta.
- **Aplicación:** La encuesta se aplicará en formatos digital y físico durante un periodo de cuatro semanas, cubriendo diferentes sectores de la ciudad de Cúcuta para asegurar la diversidad de la muestra.
- **Control de calidad:** Se realizará una revisión continua de los datos recolectados para detectar inconsistencias y aplicar los ajustes necesarios.
- **Análisis de datos:** Los datos serán procesados mediante software estadístico como SPSS o Excel, aplicando análisis descriptivo (frecuencias, promedios) y correlacional (coeficientes de correlación, pruebas de significancia) para identificar relaciones relevantes (Sampieri & Fernandez, 2018).
- **Ética:** Se garantizará la confidencialidad, el consentimiento informado y el anonimato de los participantes, cumpliendo con las normas éticas vigentes en investigación (Hernández, Fernández, & Baptista, 2016).

### 3.5 Análisis de información

En este estudio, la información recolectada mediante encuestas se organizará en una base de datos en hojas de cálculo, realizando previamente una depuración para eliminar respuestas incompletas o inconsistentes. Para el procesamiento se utilizarán herramientas informáticas como Microsoft Excel y un software estadístico (por ejemplo, SPSS o Jamovi), con los cuales se aplicarán estadísticas descriptivas básicas: frecuencias, porcentajes, medidas de tendencia central

y dispersión según el tipo de variable. Además, se generarán tablas y gráficos que permitan visualizar las percepciones sobre viabilidad técnica, económica y nivel de aceptación del monitoreo inteligente, complementando con algunos indicadores simples de análisis económico descriptivo (como relación beneficio–costo estimado), de acuerdo con el alcance descriptivo y aplicado del estudio.

### **3.6 Consideraciones éticas**

#### **3.6.1 Análisis de consideraciones éticas**

El proyecto se ajustará a los principios éticos establecidos por UNIMINUTO y por la comunidad científica, garantizando respeto, dignidad y transparencia durante todo el proceso investigativo. La participación en las encuestas será voluntaria, mediada por consentimiento informado, asegurando anonimato, confidencialidad de la información y uso exclusivo de los datos con fines académicos. En el caso de las organizaciones, la información técnica y económica se manejará de forma agregada, evitando identificarlas o emitir juicios que afecten su imagen, y los resultados se presentarán con rigor, honestidad y adecuada citación de las fuentes teóricas y metodológicas.

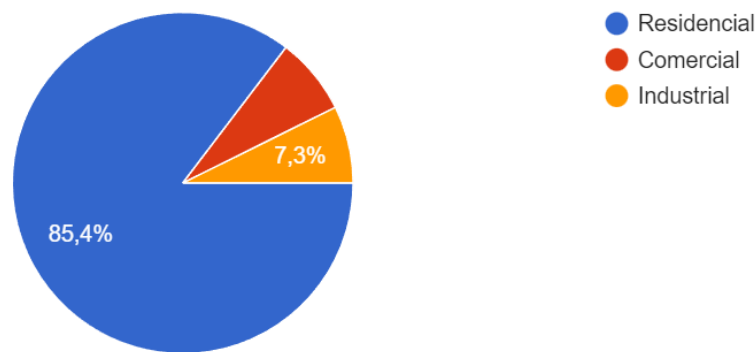
#### **3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización**

Para la presente investigación no se requirieron instrumentos de aceptación y autorización.

#### 4. RESULTADOS

De acuerdo con las respuestas obtenidas, el 85,4% de los sistemas fotovoltaicos se encuentran instalados en viviendas de uso residencial, mientras que un 7,3% corresponde a instalaciones de carácter comercial y otro 7,3% a instalaciones industriales (Figura 1).

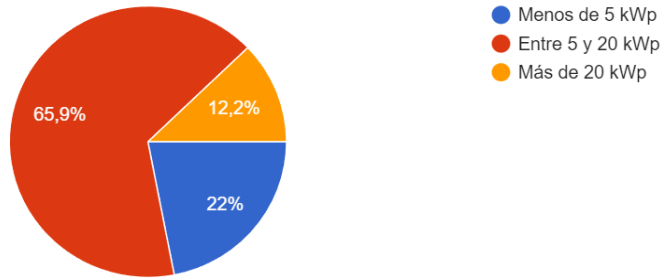
**Figura 1 Tipo de instalación donde se encuentra el sistema fotovoltaico**



**Fuente: elaboración propia.**

Con relación a la capacidad instalada, se observa que la mayoría de los sistemas fotovoltaicos se encuentran en el rango de 5 a 20 kWp (65,9%), seguido por instalaciones de menos de 5 kWp (22%) y, en menor proporción, sistemas con capacidades superiores a 20 kWp (12,2%) (Figura 2). Estos resultados reflejan una tendencia predominante hacia sistemas de pequeña a mediana escala dentro de la muestra evaluada.

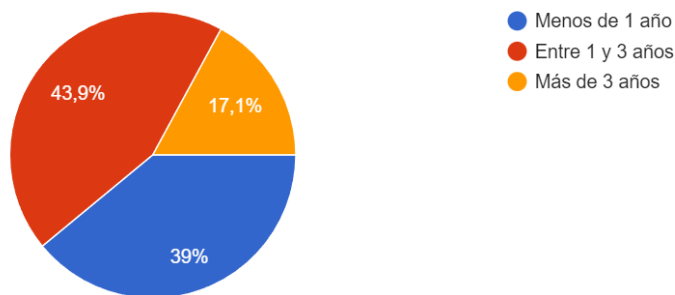
**Figura 2 Capacidad instalada del sistema**



**Fuente: elaboración propia.**

En cuanto al tiempo de operación de los sistemas fotovoltaicos, se identifica que el 43,9% de los encuestados reporta un funcionamiento de entre 1 y 3 años, seguido por un 39% con menos de 1 año de operación. Finalmente, el 17,1% de los sistemas se encuentra en funcionamiento desde hace más de 3 años (Figura 3). Estos datos reflejan que una parte importante de las instalaciones son relativamente recientes, lo cual puede asociarse al crecimiento y adopción progresiva de la energía solar en el territorio evaluado.

**Figura 3 Tiempo de funcionamiento del sistema**

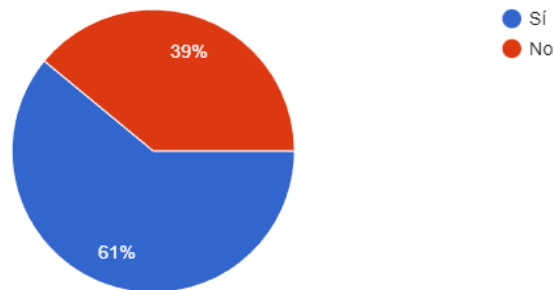


**Fuente: elaboración propia**

Del total de sistemas evaluados, el 61% incorpora algún tipo de solución de monitoreo energético, en tanto que el 39% carece de mecanismos para la supervisión de datos operativos (figura 4). Este resultado sugiere un nivel de adopción moderado de tecnologías de gestión y

control, con oportunidades de mejora orientadas a la implementación de herramientas que favorezcan la eficiencia, mantenimiento predictivo y análisis en tiempo real.

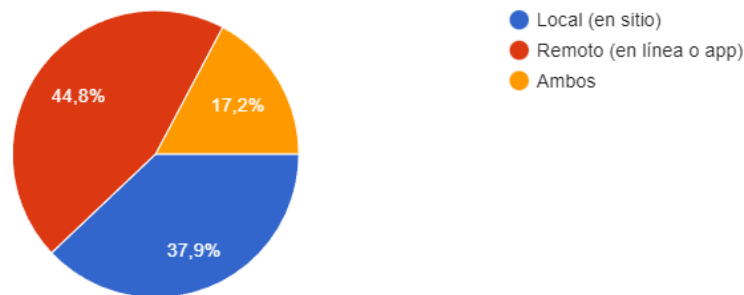
**Figura 4 Monitoreo actualmente implementado.**



**Fuente: elaboración propia**

Entre los usuarios que cuentan con sistema de monitoreo (29 respuestas), el 44,8% indicó emplear un monitoreo remoto mediante plataformas en línea o aplicaciones móviles. Por su parte, el 37,9% utiliza un monitoreo local en sitio, mientras que el 17,2% complementa la supervisión con ambos métodos (figura 5). Este comportamiento refleja una preferencia hacia soluciones remotas, asociadas a mayor accesibilidad y gestión en tiempo real del sistema fotovoltaico.

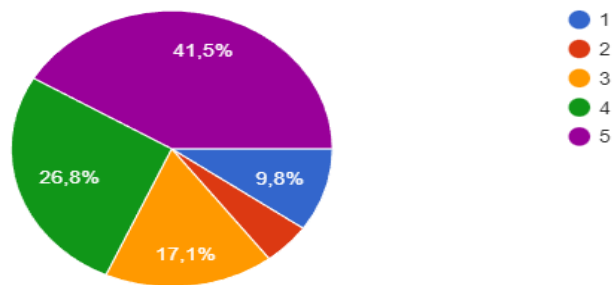
**Figura 5 Tipo de monitoreo implementado.**



**Fuente: elaboración propia**

De las 41 respuestas obtenidas, el **41,5 %** de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el **26,8 %**, estar de acuerdo en que el sistema de monitoreo permite detectar fallas o anomalías de forma oportuna. Por su parte, el **17,1 %** adoptó una posición neutral, mientras que el **14,7 %** expresó algún nivel de desacuerdo (figura 6). Estos resultados evidencian una percepción mayoritariamente favorable sobre la eficacia del sistema de monitoreo.

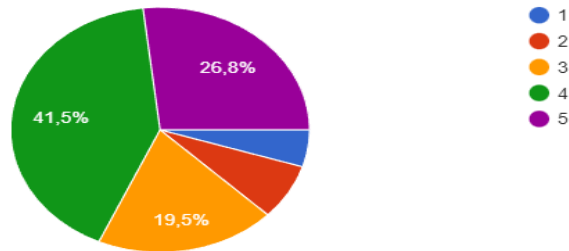
**Figura 6 Detección oportuna de fallas.**



**Fuente: elaboración propia**

De las 41 respuestas obtenidas, el **41,5 %** de los encuestados indicó estar de acuerdo y el **26,8 %**, totalmente de acuerdo en que los datos registrados por el sistema de monitoreo son precisos y confiables. Por su parte, el **19,5 %** se mantuvo neutral, mientras que el **12,2 %** manifestó algún nivel de desacuerdo (figura 7). Estos resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable respecto a la confiabilidad de la información generada por el sistema de monitoreo.

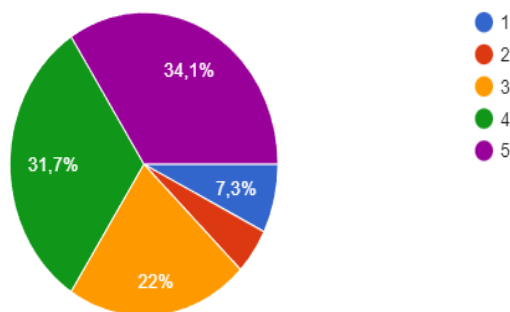
**Figura 7 Datos de monitoreo precisos y confiables.**



**Fuente: elaboración propia**

De las 41 respuestas obtenidas, el 34,1 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 31,7 % de acuerdo en que el monitoreo contribuye a mejorar la eficiencia energética del sistema. Por su parte, el 22 % adoptó una postura neutral, mientras que el 12,2 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 8). Estos resultados evidencian una percepción mayoritariamente favorable sobre el aporte del monitoreo a la eficiencia energética del sistema fotovoltaico.

**Figura 8 Monitoreo para eficiencia energética.**

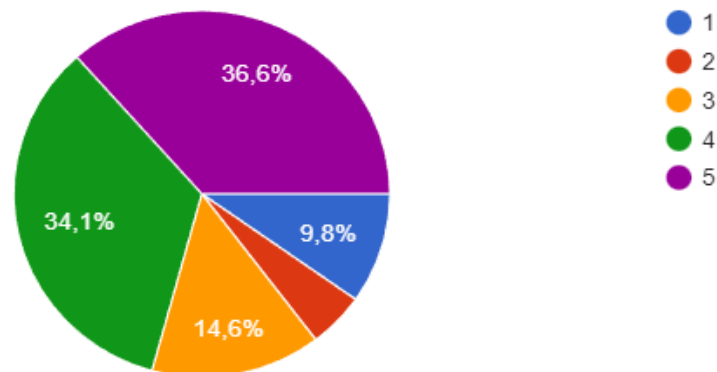


**Fuente: elaboración propia**

Según la percepción de los encuestados, el 36,6 % manifestó estar totalmente de acuerdo y el 34,1 %, de acuerdo, en que el sistema de monitoreo facilita la planificación del mantenimiento preventivo. En contraste, el 14,6 % adoptó una postura neutral, mientras que el

14,7 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 9). Estos resultados reflejan una valoración mayoritariamente positiva sobre el aporte del monitoreo a la gestión del mantenimiento preventivo.

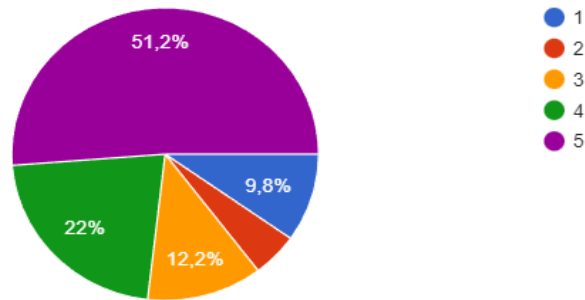
**Figura 9 Monitoreo para mantenimiento preventivo.**



**Fuente: elaboración propia**

Los resultados del ítem evidencian que el 51,2 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 22 %, de acuerdo en considerar que el monitoreo técnico es esencial para el correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico. Por su parte, el 12,2 % adoptó una postura neutral, mientras que el 14,7 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 10). Estos resultados reflejan una alta valoración del monitoreo técnico como componente clave para la operación adecuada de los sistemas fotovoltaicos.

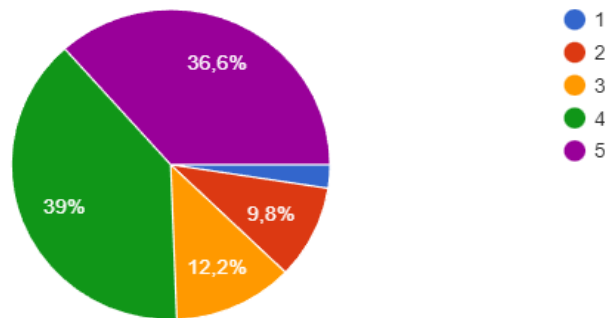
**Figura 10 Monitoreo técnico esencial para el sistema fotovoltaico**



**Fuente: elaboración propia**

La distribución de las respuestas muestra que el 39 % de los encuestados manifestó estar de acuerdo y el 36,6 %, totalmente de acuerdo en que los costos de implementación de un sistema de monitoreo son razonables. En contraste, el 12,2 % adoptó una postura neutral, mientras que el 12,2 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 11). Estos resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable respecto a la razonabilidad de los costos asociados al sistema de monitoreo.

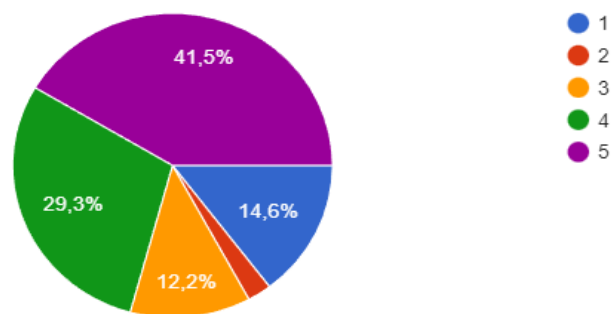
**Figura 11 Costos razonables de implementación.**



**Fuente: elaboración propia**

El análisis de las respuestas indica que el 41,5 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 29,3 % de acuerdo en que el uso del monitoreo reduce los costos de mantenimiento y operación. Por su parte, el 12,2 % adoptó una postura neutral, mientras que el 17 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 12). Estos resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable sobre el impacto del monitoreo en la reducción de costos operativos.

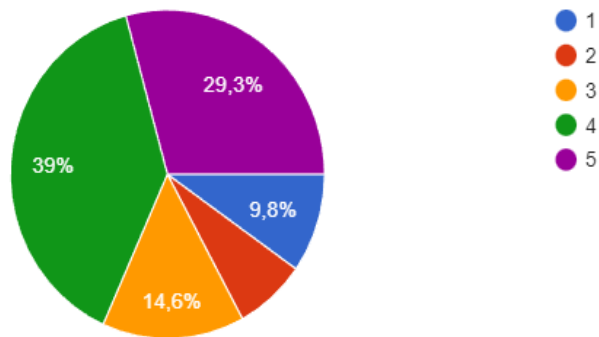
**Figura 12 Reducción de costos mediante monitoreo.**



**Fuente: elaboración propia**

Los datos obtenidos muestran que el 39 % de los encuestados manifestó estar de acuerdo y el 29,3 % totalmente de acuerdo en que la información generada por el sistema de monitoreo ayuda a optimizar el retorno de la inversión. Por su parte, el 14,6 % adoptó una postura neutral, mientras que el 17,1 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 13). Estos resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable sobre el aporte del monitoreo a la optimización del retorno económico de los sistemas fotovoltaicos.

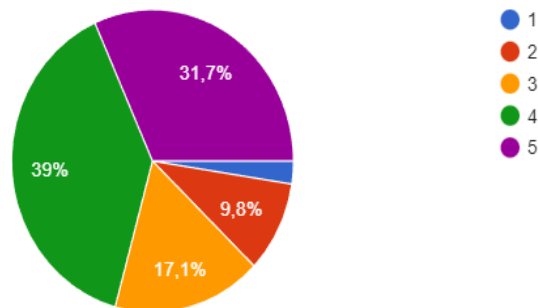
**Figura 13 Optimización del retorno de inversión.**



**Fuente: elaboración propia**

Conforme a las respuestas registradas, el 39 % de los encuestados manifestó estar de acuerdo y el 31,7 % totalmente de acuerdo en que los beneficios económicos del monitoreo justifican su costo inicial. Por su parte, el 17,1 % adoptó una postura neutral, mientras que el 12,2 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 14). Estos resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable sobre la relación costo–beneficio del sistema de monitoreo.

**Figura 14 Beneficios económicos justifican el costo.**

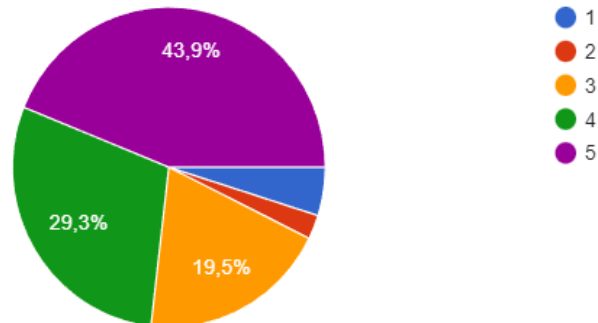


**Fuente: elaboración propia**

La distribución de las respuestas evidencia que el 43,9 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 29,3 % de acuerdo en estar dispuesto a invertir en un sistema de monitoreo más avanzado si esta mejora la rentabilidad del sistema. Por su parte, el 19,5 %

adoptó una postura neutral, mientras que el 7,3 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 15). Estos resultados reflejan una alta disposición de los usuarios a invertir en soluciones de monitoreo avanzadas cuando se perciben beneficios económicos claros.

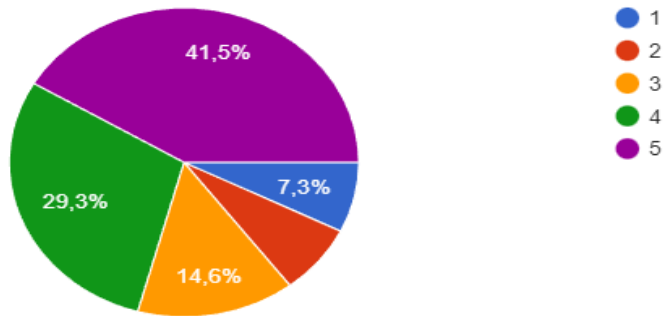
**Figura 15 Disposición a invertir para mayor rentabilidad.**



**Fuente: elaboración propia**

A partir de la información recopilada, el 41,5 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 29,3 % de acuerdo en que cuenta con conocimiento suficiente sobre el funcionamiento del monitoreo solar. Por su parte, el 14,6 % adoptó una postura neutral, mientras que el 14,6 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 16). Estos resultados evidencian que la mayoría de los participantes percibe tener un nivel adecuado de conocimiento sobre los sistemas de monitoreo solar.

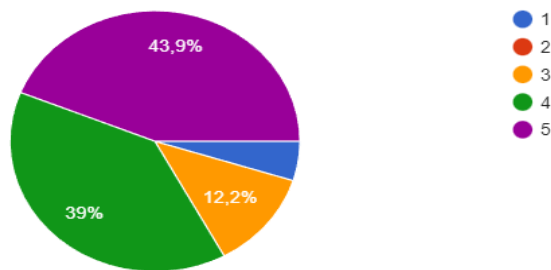
**Figura 16 Conocimiento del monitoreo solar.**



**Fuente: elaboración propia**

Los resultados obtenidos evidencian que el 43,9 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 39 % de acuerdo en que el uso de plataformas o aplicaciones de monitoreo resulta fácil de manejar. Por su parte, el 12,2 % adoptó una postura neutral, mientras que el 4,9 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 17). Estos resultados reflejan una percepción ampliamente favorable sobre la facilidad de uso de las herramientas de monitoreo solar.

**Figura 17 Facilidad de uso del monitoreo.**

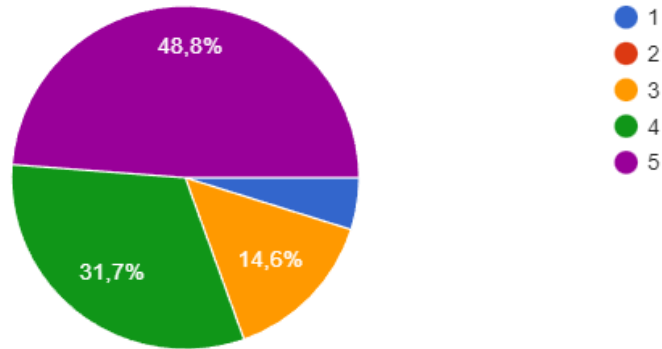


**Fuente: elaboración propia**

La percepción de los participantes indica que el 48,8 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 31,7 % de acuerdo en confiar en la información que proveen los sistemas de monitoreo. Por su parte, el 14,6 % adoptó una postura neutral, mientras que el 4,9 %

expresó algún nivel de desacuerdo (figura 18). Estos resultados evidencian un alto nivel de confianza de los usuarios en la información generada por los sistemas de monitoreo solar.

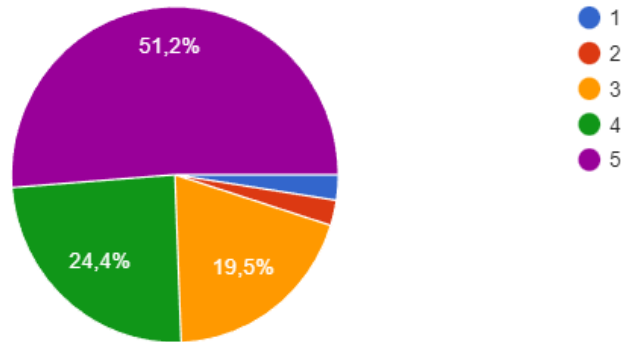
**Figura 18 Confianza en la información de monitoreo.**



**Fuente: elaboración propia**

La distribución de las respuestas refleja que el 51,2 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 24,4 % de acuerdo en que la implementación de sistemas de monitoreo aumenta la confianza en la tecnología solar. Por su parte, el 19,5 % adoptó una postura neutral, mientras que el 4,9 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 19). Estos resultados evidencian una percepción ampliamente positiva sobre el impacto del monitoreo en la confianza hacia la tecnología fotovoltaica.

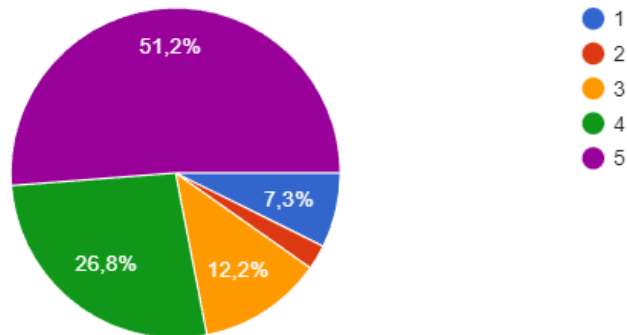
**Figura 19 Monitoreo fortalece la confianza en la energía solar.**



**Fuente: elaboración propia**

Los resultados de la encuesta muestran que el 51,2 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 26,8 % de acuerdo en recomendar a otros usuarios la implementación de sistemas de monitoreo en sus instalaciones fotovoltaicas. Por su parte, el 12,2 % adoptó una postura neutral, mientras que el 9,8 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 20). Estos resultados evidencian una alta aceptación y recomendación del uso de sistemas de monitoreo por parte de los usuarios.

**Figura 20 Recomendación del monitoreo fotovoltaico.**

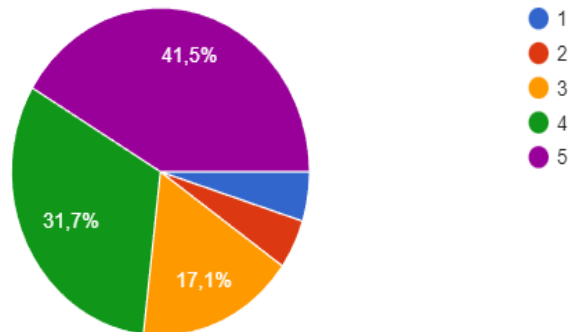


**Fuente: elaboración propia**

El análisis de las respuestas evidencia que el 41,5 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 31,7 % de acuerdo en que le interesa actualizar o implementar un

sistema de monitoreo en el futuro cercano. Por su parte, el 17,1 % adoptó una postura neutral, mientras que el 9,7 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 21). Estos resultados reflejan un interés mayoritariamente positivo por parte de los usuarios en la adopción futura de sistemas de monitoreo en instalaciones fotovoltaicas.

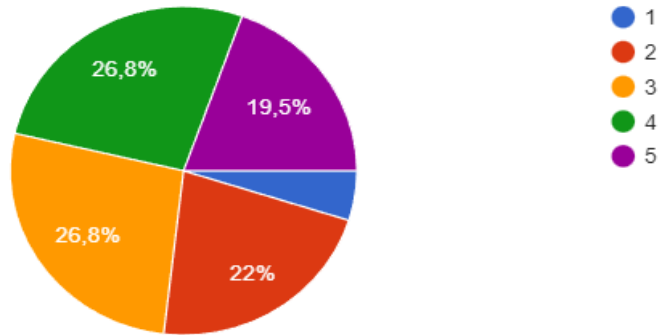
**Figura 21 Interés en implementar monitoreo.**



**Fuente: elaboración propia**

Los resultados obtenidos indican que el 26,8 % de los encuestados manifestó estar de acuerdo y el 19,5 % totalmente de acuerdo en contar con los recursos económicos necesarios para adquirir un sistema de monitoreo. Por su parte, el 26,8 % adoptó una postura neutral, mientras que el 26,9 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 22). Estos resultados reflejan una percepción dividida respecto a la disponibilidad de recursos económicos para la implementación de sistemas de monitoreo.

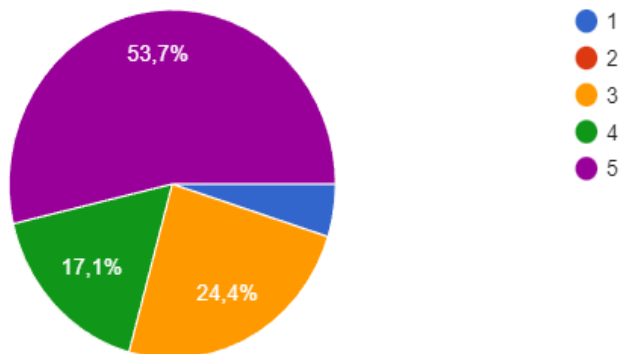
**Figura 22 Capacidad económica para adquirir monitoreo.**



**Fuente: elaboración propia**

La distribución de las respuestas muestra que el 53,7 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 17,1 % de acuerdo en estar dispuesto a capacitarse para el uso de herramientas de monitoreo digital. Por su parte, el 24,4 % adoptó una postura neutral, mientras que el 4,8 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 23). Estos resultados evidencian una alta disposición de los usuarios para fortalecer sus competencias en el uso de sistemas de monitoreo digital.

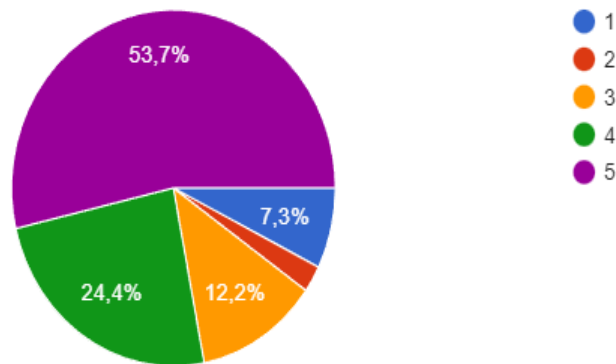
**Figura 23 Disposición a capacitarse en monitoreo digital.**



**Fuente: elaboración propia**

De acuerdo con las respuestas obtenidas, se determina que el 53,7% de los encuestados está de acuerdo en que el gobierno debe incentivar económicamente la implementación del monitoreo solar y, en menor medida con un 7,3% no están de acuerdo; esto se evidencia en la figura 24.

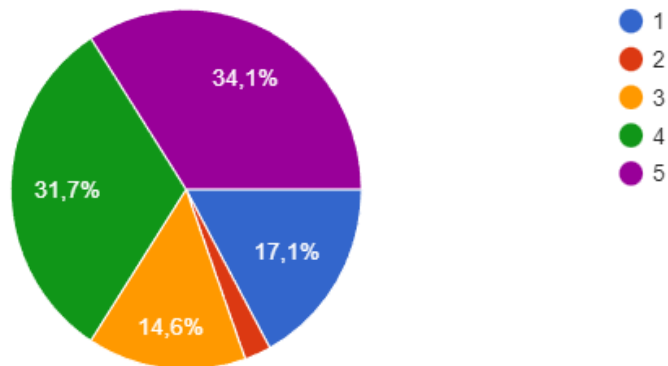
**Figura 24 Incentivos gubernamentales al monitoreo solar.**



**Fuente: elaboración propia**

Los resultados del ítem permiten identificar que el 34,1 % de los encuestados manifestó estar totalmente de acuerdo y el 31,7 % de acuerdo en que el monitoreo debe ser un componente obligatorio en todos los proyectos fotovoltaicos. Por su parte, el 14,6 % adoptó una postura neutral, mientras que el 19,5 % expresó algún nivel de desacuerdo (figura 25). Estos resultados evidencian una aceptación mayoritaria de la inclusión del monitoreo como elemento esencial en los proyectos fotovoltaicos.

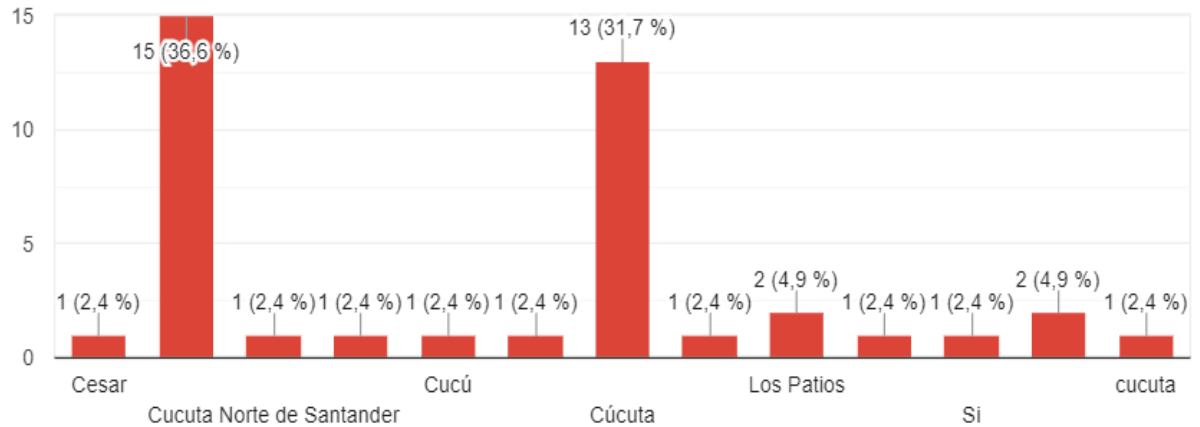
**Figura 25 Monitoreo obligatorio en proyectos fotovoltaicos.**



**Fuente: elaboración propia**

En cuanto a la ubicación de los sistemas, los resultados indican que la mayoría se concentra en el municipio de Cúcuta, con un 68,3 % de las respuestas, considerando las diferentes formas de registro del nombre (Cúcuta Norte de Santander). En menor proporción, se reportaron ubicaciones en Los Patios con un 4,9 %, así como en otros municipios o zonas con participaciones individuales del 2,4 % cada uno (figura 26). Estos resultados evidencian que el estudio se encuentra principalmente focalizado en instalaciones fotovoltaicas ubicadas en la ciudad de Cúcuta.

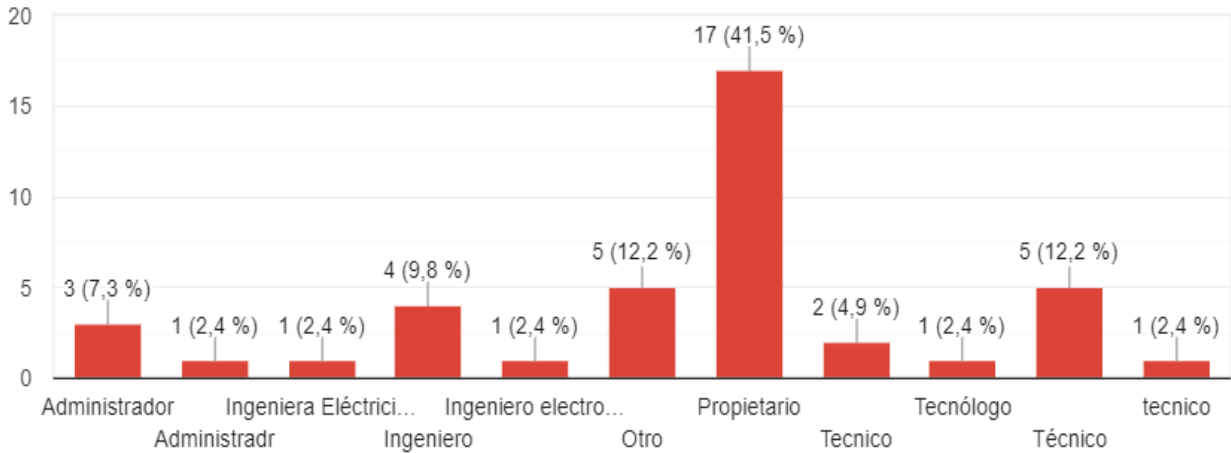
**Figura 26 Municipio o zona donde se ubica el sistema.**



**Fuente: elaboración propia**

Respecto al cargo o rol del encuestado, los resultados muestran que el 41,5 % corresponde a propietarios de los sistemas fotovoltaicos, seguido por técnicos, quienes representan en conjunto el 22 % de las respuestas, considerando las diferentes denominaciones del cargo. Adicionalmente, se identificó la participación de administradores (9,7 %), ingenieros (9,8 %), tecnólogos (2,4 %) y otros roles (12,2 %) (figura 27). Esta distribución evidencia que la percepción del monitoreo proviene principalmente de actores directamente involucrados en la operación y toma de decisiones sobre los sistemas fotovoltaicos.

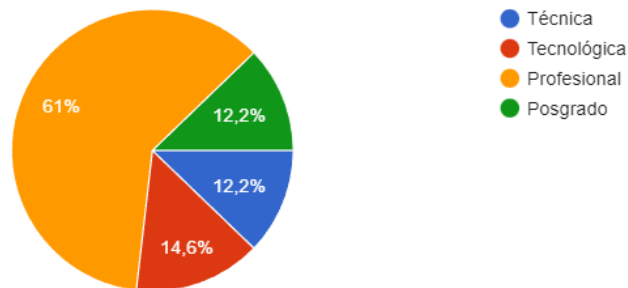
**Figura 27 Cargo o rol del encuestado (propietario, técnico, administrador, otro).**



**Fuente: elaboración propia**

En relación con el nivel de formación académica, los resultados indican que la mayoría de los encuestados cuenta con formación profesional, representando el 61 % del total. En menor proporción, el 14,6 % posee formación tecnológica, mientras que los niveles técnicos y de posgrado representan cada uno el 12,2 % de las respuestas (figura 28). Esta distribución evidencia que la percepción sobre los sistemas de monitoreo proviene principalmente de participantes con formación académica profesional.

**Figura 28 Nivel de formación académica.**



**Fuente: elaboración propia**

## **Factores identificados que afectan eficiencia / confiabilidad (según encuestados)**

- Suciedad en paneles (alta frecuencia reportada)
- Fallos intermitentes de inversor
- Sombras por estructuras/vegetación
- Conexiones sueltas o deterioradas

Estos factores son los más reportados y coinciden con lo encontrado en la literatura: el monitoreo permite detectar y corregirlos oportunamente, mejorando disponibilidad y producción.

El análisis de datos se realizó utilizando el software estadístico JASP (versión 0.18), el cual permitió aplicar procedimientos descriptivos y correlacionales según lo exige el enfoque cuantitativo seleccionado para esta investigación. Previamente, todas las respuestas obtenidas en las 41 encuestas válidas fueron depuradas y codificadas, garantizando coherencia, integridad y validez metodológica (Sampieri & Fernandez, 2018)

Para las variables cualitativas, como tipo de instalación, nivel de conocimiento sobre monitoreo y percepción de eficiencia; se emplearon codificaciones numéricas que facilitaron el procesamiento estadístico. Las variables cuantitativas —como capacidad instalada, costos estimados y ahorro percibido— se mantuvieron en su escala original.

### **Principales técnicas estadísticas utilizadas:**

**Estadística descriptiva:** frecuencias, porcentajes, medias y desviaciones estándar, útiles para caracterizar técnicamente las instalaciones fotovoltaicas encuestadas.

**Análisis de correlación de Pearson:** aplicado para medir la relación entre variables como eficiencia técnica, conocimiento del monitoreo y rentabilidad económica.

**Representaciones gráficas:** histogramas, gráficos de barras y diagramas de dispersión generados en JASP para facilitar la interpretación visual de los hallazgos.

Los datos muestran una tendencia favorable hacia la valoración del monitoreo como mecanismo para mejorar el rendimiento del sistema fotovoltaico. Las respuestas evidencian que los usuarios que poseen mayor nivel de conocimiento consideran que el monitoreo influye positivamente sobre la eficiencia técnica y el retorno económico, lo cual refuerza la importancia de su implementación en la ciudad de Cúcuta.

## 6. DISCUSIÓN

Dentro de los hallazgos encontrados en esta investigación, se determina que el mercado fotovoltaico en Cúcuta es principalmente doméstico, dado que el 85,4 % de las instalaciones corresponden a uso residencial, mientras que las comerciales e industriales representan únicamente el 7,3 % cada una. Este resultado es coherente con lo reportado por Arévalo (2024) y Narváez (2024), quienes identifican que, en entornos urbanos intermedios, la adopción de la energía solar se concentra principalmente en el sector residencial debido a menores barreras de entrada, mayor autonomía en la toma de decisiones y búsqueda de ahorro en costos energéticos. En este sentido, los resultados del presente estudio confirman que las estrategias de monitoreo deben orientarse hacia soluciones simples, económicas e intuitivas, adaptadas a usuarios no especializados.

En relación con el nivel de adopción del monitoreo, se evidencia que el 61 % de los encuestados cuenta con algún tipo de sistema de supervisión, mientras que el 39 % opera sin herramientas de seguimiento técnico. Este hallazgo coincide con lo señalado por Keisang, Kumar y Singh (2021), quienes afirman que, aunque el monitoreo es reconocido como un componente clave en la operación de sistemas fotovoltaicos, su adopción sigue siendo parcial, especialmente en instalaciones de pequeña escala. De igual manera, Marangis, Yang y Zhang (2025) destacan que la ausencia de monitoreo continuo es una de las principales causas de pérdidas energéticas no detectadas y fallas prolongadas en sistemas residenciales.

Desde el punto de vista técnico, los resultados muestran que los usuarios perciben el monitoreo como una herramienta eficaz para mejorar la eficiencia energética, la confiabilidad del sistema y la planificación del mantenimiento preventivo. Estos hallazgos son consistentes con los

reportados por Rouibah et al. (2025), quienes evidencian que los sistemas de monitoreo basados en plataformas digitales e Internet de las Cosas (IoT) permiten detectar anomalías en tiempo real, reducir tiempos de inactividad y optimizar la disponibilidad operativa de los sistemas fotovoltaicos. En ambos casos, se observa que el valor principal del monitoreo no radica únicamente en la visualización de datos, sino en su capacidad para apoyar la toma de decisiones técnicas oportunas.

Asimismo, los factores identificados en esta investigación como principales causas de pérdida de eficiencia —acumulación de suciedad en paneles, fallos intermitentes de inversores, sombras por estructuras o vegetación y conexiones deterioradas— coinciden con lo reportado en la literatura internacional. Keisang et al. (2021) y Thakfan y Bin Salamah (2024) señalan que estos problemas representan las fallas más frecuentes en sistemas fotovoltaicos de pequeña y mediana escala, y que el monitoreo continuo permite detectarlos antes de que generen pérdidas significativas de producción. Por tanto, los resultados obtenidos en Cúcuta validan empíricamente estos planteamientos teóricos en un contexto local.

Desde la perspectiva económica, la mayoría de los encuestados considera que los beneficios del monitoreo justifican su costo inicial, lo cual se alinea con lo encontrado por Rouibah et al. (2025), quienes demuestran que, aunque los sistemas de monitoreo implican una inversión adicional, esta se compensa mediante la reducción de costos de mantenimiento correctivo, mayor vida útil de los equipos y optimización del retorno de la inversión. De manera similar, Ramírez y Torres (2020) destacan que la rentabilidad de los proyectos fotovoltaicos mejora significativamente cuando se incorporan mecanismos de supervisión y control técnico.

Un hallazgo relevante de esta investigación es la correlación fuerte ( $r \approx 0,65$ ) entre la disponibilidad de recursos económicos y la intención de implementar o actualizar sistemas de monitoreo. Este resultado es consistente con lo planteado por Ardila (2025), quien identifica el factor financiero como una de las principales barreras para la adopción de tecnologías solares en Colombia. En este sentido, aunque los usuarios reconocen el valor técnico y económico del monitoreo, su implementación efectiva depende en gran medida de la capacidad de inversión individual, especialmente en el sector residencial.

Desde una perspectiva de innovación y sostenibilidad empresarial, los resultados también se alinean con los planteamientos de Antonioli y Ritala (2023), quienes argumentan que la incorporación de tecnologías digitales en los procesos productivos permite generar valor compartido al mejorar simultáneamente el desempeño económico, ambiental y social. En el caso del monitoreo fotovoltaico, se observa que su implementación no solo incrementa la eficiencia energética, sino que también fortalece la confianza de los usuarios en la tecnología solar y promueve una cultura de gestión energética basada en datos.

En síntesis, los resultados de esta investigación no solo confirman lo expuesto por la literatura reciente, sino que aportan evidencia empírica localizada en la ciudad de Cúcuta, demostrando que la eficiencia operativa de los sistemas fotovoltaicos está directamente vinculada al uso permanente del monitoreo. La ausencia de estos sistemas incrementa el riesgo de fallas no detectadas, pérdidas energéticas y menor retorno de la inversión, mientras que su implementación constituye una estrategia técnica y económicamente viable para fortalecer la sostenibilidad energética regional.

## 7. CONCLUSIONES

La investigación evidenció que el 61% de los encuestados dispone de un sistema de monitoreo, percibiendo una valoración favorable de su aporte técnico con puntuaciones promedio superiores a 3.78 en escala Likert. Los datos demostraron que el monitoreo facilita significativamente la planificación del mantenimiento preventivo (media 3.829) y mejora la eficiencia energética (media 3.805), permitiendo detectar fallas como suciedad, sombras y desconexiones. La integración de sistemas de monitoreo en instalaciones fotovoltaicas de Cúcuta es técnicamente viable y añade un valor significativo a la operación y rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

Los resultados indicaron que, aunque algunos usuarios perciben el monitoreo como un costo adicional, la mayoría valora sus beneficios económicos, con puntuaciones de 3.805 en la reducción de costos de mantenimiento y 3.707 en optimización del retorno de inversión. De particular importancia fue la correlación fuerte ( $r \approx 0.65$ ) entre la disponibilidad de recursos económicos y la intención de implementar monitoreo, evidenciando que la capacidad financiera sigue siendo determinante en la adopción de estas tecnologías en el sector residencial. En conclusión, aunque la implementación de sistemas de monitoreo presenta una alta percepción de rentabilidad económica y viabilidad financiera, su adopción depende sustancialmente de la disponibilidad de recursos del usuario.

La investigación identificó como principales factores limitantes de eficiencia la acumulación de suciedad en paneles, fallos intermitentes en inversores, sombras por estructuras y conexiones deterioradas. Los encuestados percibieron al monitoreo como mecanismo eficaz para detectar estos problemas oportunamente (media 3.8), y la correlación alta ( $r > 0.6$ ) entre frecuencia de uso del monitoreo y percepción de confiabilidad del sistema demostró que los

usuarios que revisan regularmente los datos reportan menos fallos críticos. En conclusión, la eficiencia operativa real de los sistemas fotovoltaicos en Cúcuta está directamente vinculada al uso permanente del monitoreo, y su ausencia incrementa significativamente la probabilidad de pérdidas energéticas y fallas prolongadas.

## 8. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Ampliar el tamaño y la diversidad de la muestra en futuras investigaciones. Se recomienda que estudios posteriores incrementen el número de participantes y amplíen la cobertura hacia instalaciones comerciales e industriales, dado que la presente investigación se concentró principalmente en el sector residencial (85,4 %). Una muestra más amplia y diversa permitiría obtener resultados más representativos del mercado fotovoltaico en Cúcuta y fortalecer la validez externa de los hallazgos.

Promover estrategias de divulgación y sensibilización sobre los beneficios técnicos del monitoreo. Dado que los usuarios que cuentan con sistemas de monitoreo reconocen claramente su aporte en eficiencia, confiabilidad y mantenimiento preventivo, se recomienda desarrollar programas de divulgación dirigidos a propietarios de sistemas fotovoltaicos que aún no han adoptado esta tecnología, enfatizando sus beneficios operativos y su impacto en la reducción de fallas y pérdidas energéticas.

Diseñar esquemas de financiamiento o incentivos económicos para facilitar la adopción del monitoreo. Considerando la correlación fuerte ( $r \approx 0.65$ ) entre la disponibilidad de recursos económicos y la intención de implementar sistemas de monitoreo, se recomienda que entidades públicas, empresas instaladoras o proveedores tecnológicos evalúen mecanismos como planes de financiación, subsidios o inclusión del monitoreo dentro del costo inicial del sistema fotovoltaico, especialmente en el sector residencial.

Fortalecer la capacitación de los usuarios en el uso e interpretación de herramientas de monitoreo. Teniendo en cuenta la alta disposición de los encuestados para capacitarse y la relación positiva entre la frecuencia de uso del monitoreo y la percepción de confiabilidad del

sistema ( $r > 0.6$ ), se recomienda implementar programas de formación básica que permitan a los usuarios interpretar datos, identificar alertas tempranas y tomar decisiones oportunas de mantenimiento.

Considerar el monitoreo como un componente estándar en el diseño de proyectos fotovoltaicos. A partir de la evidencia obtenida sobre su impacto positivo en la eficiencia energética, la detección temprana de fallas y la optimización del rendimiento del sistema, se recomienda que los sistemas de monitoreo sean incorporados como un componente obligatorio o altamente recomendado en la formulación, ejecución y operación de proyectos fotovoltaicos en Cúcuta, especialmente desde un enfoque de gerencia de proyectos y sostenibilidad operativa.

## REFERENCIAS

- Alberti, F. G. (2023). Creating shared value through open innovation: Insights from the case of Enel industrial plants. *Journal of Business Strategy*, 38(1), 3–13..  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/beer.12611>
- Ardila, A. F. (2025). *Riesgos percibidos en la adopción de energía solar fotovoltaica en consumidores de servicios públicos en el Valle del Cauca*.  
<https://vitela.javerianacali.edu.co/items/0f774cd1-8838-4a6a-948f-72f99dbac7a5>
- Bonilla, G. C., Ramón, J. D., & Sanchez, .. D. (2021). Monitorización y análisis de flujo en sistemas de alcantarillado sanitario en Cúcuta, Colombia. *Respuestas*, 26(2), 6–13.  
<https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/3207>
- Brown, & Miller. (2017). Evolución de las energías renovables y su impacto ambiental. *JOURNAL OF SUSTAINABLE ARCHITECTURE*, 1(18), 45-56. Retrieved from Journal of Sustainable Energy, 12(3), 45-60.:  
[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E\\_9t1kC&oi=fnd&pg=PA35&dq=Evolución+de+las+energías+renovables+y+su+impacto+ambiental&ots=ralBeeZ7Ji&sig=Kh-i9hnArbOB7jep0th6SU4rCiQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E_9t1kC&oi=fnd&pg=PA35&dq=Evolución+de+las+energías+renovables+y+su+impacto+ambiental&ots=ralBeeZ7Ji&sig=Kh-i9hnArbOB7jep0th6SU4rCiQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG),. (2018). *Resolución CREG 030 de 2018*.  
[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0030\\_2018.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0030_2018.htm)
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014*. Retrieved from Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Diario Oficial No. 49.396.:

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Flores, J., & Sandra, R. (2024). *Percepción de la implementación de paneles solares en el sector residencial de la comuna 3 en la ciudad de Cúcuta*.

<https://bonga.unisimon.edu.co/items/372d0b55-52c3-478d-ac3b-d273acc3a6ca>

Hernández, Fernández, & Baptista. (2016). *Metodología de la investigación (6ª ed.)*. McGraw-Hill. [https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2016). *Norma Técnica Colombiana NTC 5937*. Retrieved from Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. :

[https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello\\_ambiental\\_colombiano/NTC\\_5637\\_Etiquetas\\_ambientales.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/NTC_5637_Etiquetas_ambientales.pdf)

Keisang, Kumar, & Singh. (2021). Review of operation and maintenance methodologies for photovoltaic systems. *Frontiers in Energy Research*, Volumen 9 .

<https://www.frontiersin.org/journals/energyresearch/articles/10.3389/fenrg.2021.730230/full>

Marangis, Yang, & Zhang. (2025). Intelligent maintenance approaches for improving photovoltaic system performance. *Solar RRL. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* 44, no. 11, 34–49 .

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/solr.202500289>

Medina, & Vanegas. (2022). Impacto social de la energía solar en zonas urbanas colombianas.

*Administración & Desarrollo Vol 52 numero 2* , 172-183. Retrieved from Beneficios económicos de la energía renovable en Colombia.:

<https://revistas.esap.edu.co/index.php/admindesarro/article/download/795/644>

Mendoza, J. C., Aristizabal, E., & Gonzalez, W. (2022). *Energías renovables: Implementación*

*de un sistema solar fotovoltaico en el Bioparque La Reserva de Cota*. Corporación

Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.

<https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/7b7f9388-e780-49bc-9d9d-8fe819f61be1/content>

Ministerio de Minas y Energía. (2023). Retrieved from Normativa RETIE actualizada. Gobierno

de Colombia.: [https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-](https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/)

[2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/](https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/)

Narváez, M. (2024). Barreras para la implementación de sistemas de generación fotovoltaica

conectados a la red en entornos urbanos. Trabajo de grado, Universidad Técnica del

Norte. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29238/1/UPS-CT011825.pdf>

Pérez, C. M. (2020)., Murcia, G.C., Gil, F.C., & Poveda, J.P. (2018). Caracterización de

tecnologías de paneles fotovoltaicos en la producción de energía eléctrica en centros del SENA Colombia. *Revista Colombiana de Energías Renovables*, 50-62.

<https://www.semanticscholar.org/paper/bd49a7a0483f31471d2780a7089ad0a922234f31>

Pérez, López, & Sánchez. (2020). Sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para la

estimación de la radiación solar global. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 9,

n.º 1, 34–49. Retrieved from Sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para la estimación de la radiación solar global en Cúcuta:

<https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacioning/article/view/4112>

Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1073 de 2015. Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector de Minas y Energía. Diario Oficial No. 49.678.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>

Rouibah, Barazane, Benghanem, & Mellit. (2025). Smart monitoring of photovoltaic energy systems: An IoT-based prototype approach. *Scientific African volumen 30*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227625004430>

Sampieri, H., & Fernandez, C. (2018). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc Graw Hill.

Retrieved from *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (6.a ed.). McGraw-Hill.:

<https://centrohumanista.edu.mx/biblioteca/files/original/5121ad6aa80b501a60abcb26790c7762.pdf>

Sánchez & González. (2022). *Evaluación de Factibilidad Técnica y Económica para la Instalación de Sistemas Fotovoltaicos*. Barranquilla, Colombia: Trabajo de Grado Universidad de la Costa. Retrieved from *Revista Energía y Sostenibilidad*, 12(2), 45–60.:

<https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/374a433d-c21b-423e-97d9-172ab50072fc/content>

Thakfan, A., & Bin Salamah, Y. (2024). Artificial-Intelligence-Based Detection of Defects and Faults in Photovoltaic Systems: A Survey. *A Survey Energies*, 17-25.

<https://doi.org/10.3390/en17194807>

Tobajas, M. (2023). *Energía solar fotovoltaica*.

[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=jtYrEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=Energía+solar+fotovoltaica.+ecoe+ediciones&ots=5PvFFDDlIg&sig=NNt2YIBGNw15mOQsvIlZg2qhNdM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Energía%20solar%20fotovoltaica.%20ecoe%20ediciones&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=jtYrEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=Energía+solar+fotovoltaica.+ecoe+ediciones&ots=5PvFFDDlIg&sig=NNt2YIBGNw15mOQsvIlZg2qhNdM&redir_esc=y#v=onepage&q=Energía%20solar%20fotovoltaica.%20ecoe%20ediciones&f=false)

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2022). *Guía técnica para la formulación de proyectos de energía solar*. <https://www1.upme.gov.co/fondos-apoyo-financiero/Paginas/guia-presentacion-proyectos.aspx>

Vargas, Ramírez, & Sánchez. (2021). *Análisis estadístico de la radiación solar global en Cúcuta utilizando el modelo ANOVA*. Retrieved from *Tecnura*, 25(67), 12-25.:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/17595>