

Evaluación técnico-económica de un sistema de monitoreo meteorológico de bajo costo para el análisis de potencial solar y eólico

Technical-economic evaluation of a low-cost meteorological monitoring System for the analysis of solar and wind potential

Alfonso Gunsha-Morales*
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Quevedo - Ecuador
agunsham@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1485-1522>

Darwin Rene Mejía Candelejo
Universidad Politécnica Salesiana
Quevedo - Ecuador
dmejia5@est.ups.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-4604-7547>

Adrian Jefferson Paredes Cuyo
Profesional Independiente
La Maná - Ecuador
jeffeersoncuyo@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-0258-1019>

Miguel Ángel Orozco Campaz
Universidad Politécnica Salesiana
Quito - Ecuador
morozcoc2@est.ups.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-1313-1060>

*Correspondencia:
agunsham@uteq.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Gunsha-Morales, A., Mejía, D., Paredes, A., & Orozco, M. (2026). Evaluación técnico-económica de un sistema de monitoreo meteorológico de bajo costo para el análisis de potencial solar y eólico. *Esprint Investigación*, 5(2), 295-314.
<https://doi.org/10.61347/ei.v5i2.368>

Recibido: 28 de julio de 2026
Aceptado: 31 de agosto de 2026
Publicado: 4 de septiembre de 2026

Copyright: Derechos de autor 2026 Alfonso Gunsha-Morales, Darwin Rene Mejía Candelejo, Adrian Jefferson Paredes Cuyo, Miguel Ángel Orozco Campaz.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: La disponibilidad de información meteorológica confiable constituye un elemento fundamental para caracterizar recursos solares y eólicos y orientar decisiones sobre su aprovechamiento energético. El objetivo del estudio fue evaluar técnica y económicamente alternativas de monitoreo meteorológico destinadas a la caracterización del potencial solar y eólico en el cantón Quevedo, Ecuador. Se desarrolló una investigación cuantitativa, descriptivo-comparativa y analítica mediante el análisis de sensores, configuraciones tecnológicas e información secundaria procedente de PVGIS-5, Windfinder y registros meteorológicos del INAMHI. La evaluación técnica consideró precisión, variables registradas, integración, instalación, conectividad y autonomía energética, mientras que el análisis económico empleó el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) bajo escenarios de aprovechamiento de datos del 100 %, 50 % y 25 %. Los resultados mostraron una mayor disponibilidad relativa del recurso solar entre julio y septiembre, con irradiaciones de 135 a 145 kWh/m², mientras que el recurso eólico presentó velocidades entre 1,03 y 2,06 m/s, poco favorables para pequeñas turbinas en los horarios evaluados. Las estaciones compactas WH2900 y HP2550 presentaron los resultados financieros más favorables en escenarios de aprovechamiento igual o superior al 50 %, mientras que las alternativas de mayor inversión registraron indicadores menos favorables. Se concluyó que las configuraciones de menor inversión pueden constituir alternativas funcionales para la caracterización preliminar de recursos renovables, siempre que sus prestaciones técnicas respondan a los requerimientos de medición y se consideren las limitaciones del modelo económico y de la información secundaria utilizada.

Palabras clave: Energía eólica, energía solar, estación meteorológica, monitoreo meteorológico, viabilidad económica.

Abstract: The availability of reliable meteorological information is essential for characterizing solar and wind resources and supporting decisions regarding their energy utilization. The objective of this study was to technically and economically evaluate meteorological monitoring alternatives for characterizing solar and wind potential in Quevedo, Ecuador. A quantitative, descriptive-comparative, and analytical study was conducted through the assessment of sensors, technological configurations, and secondary information obtained from PVGIS-5, Windfinder, and meteorological records from INAMHI. The technical evaluation considered accuracy, recorded variables, system integration, installation, connectivity, and energy autonomy, while the economic analysis used Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) under data utilization scenarios of 100%, 50%, and 25%. The results showed greater relative availability of the solar resource between July and September, with irradiation values ranging from 135 to 145 kWh/m², whereas the wind resource presented speeds between 1.03 and 2.06 m/s, which were unfavorable for small wind turbines during the evaluated time periods. The compact WH2900 and HP2550 stations showed the most favorable financial results under utilization scenarios equal to or greater than 50%, while higher-investment alternatives recorded less favorable indicators. It was concluded that lower-investment configurations can constitute functional alternatives for the preliminary characterization of renewable resources, provided that their technical capabilities meet measurement requirements and that the limitations of the economic model and the secondary information used are taken into account.

Keywords: Economic feasibility, meteorological monitoring, meteorological station, solar energy, wind energy.

1. Introducción

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles ha incrementado la necesidad de caracterizar con precisión los recursos renovables disponibles en cada territorio. La generación de energía solar y eólica depende de variables meteorológicas cuyo comportamiento temporal y variabilidad condicionan la estimación del potencial energético. En consecuencia, disponer de información confiable resulta indispensable para la planificación y dimensionamiento de proyectos basados en fuentes renovables. Esta necesidad adquiere relevancia ante los desafíos asociados con su integración en los sistemas energéticos actuales (Monga et al., 2022; Bala et al., 2024; Rodríguez-Galarza; 2026).

Las estaciones meteorológicas constituyen herramientas fundamentales para registrar sistemáticamente variables como irradiancia solar, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, velocidad y dirección del viento. La confiabilidad de estos registros depende de la precisión y calibración de los sensores, el mantenimiento de los equipos, la continuidad de las mediciones y las condiciones de emplazamiento. Estos factores determinan la representatividad de la información recopilada y su posterior utilización. Por ello, los procedimientos de observación deben ajustarse a criterios técnicos que garanticen la calidad de los datos meteorológicos (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018).

En Ecuador, la caracterización de los recursos renovables requiere información meteorológica que represente las condiciones particulares de las diferentes zonas geográficas. Estudios nacionales han analizado la disponibilidad del recurso solar y eólico mediante registros meteorológicos, bases de datos y procedimientos computacionales orientados a estimar su potencial energético (Arla et al., 2017; Peralta et al., 2013). De igual manera, se ha destacado la importancia del aprovechamiento de la energía eólica dentro de la diversificación de la matriz energética nacional (Uvidia et al., 2023). Estas investigaciones evidencian la necesidad de fortalecer la disponibilidad y calidad de información meteorológica local.

El desarrollo tecnológico ha favorecido la incorporación de sensores electrónicos, sistemas embebidos y tecnologías de comunicación inalámbrica en el diseño de estaciones meteorológicas automáticas. Estas soluciones permiten adquirir, almacenar y transmitir datos de manera remota, lo que amplía sus posibilidades de aplicación en ámbitos ambientales, agrícolas y energéticos. En Ecuador se han desarrollado estaciones autónomas basadas en hardware embebido y sistemas con tecnologías de comunicación como LoRaWAN (Darquea & Santacruz, 2020; Lema & Cabrera, 2023). Estas experiencias demuestran la factibilidad tecnológica de implementar soluciones adaptadas a diferentes requerimientos de monitoreo.

La selección de una estación meteorológica no debe depender exclusivamente de su costo de adquisición, sino de su capacidad para satisfacer los requerimientos técnicos del propósito de medición. Deben considerarse aspectos como precisión, rango y resolución de los sensores, variables registradas, almacenamiento, conectividad, autonomía energética, mantenimiento y adaptación a las condiciones ambientales. Incluso los dispositivos desarrollados para estudios específicos requieren garantizar condiciones mínimas de funcionamiento y confiabilidad instrumental (Bohórquez & Enciso, 2019). Por consiguiente, la relación entre prestaciones técnicas y costo constituye un criterio relevante para seleccionar una alternativa de monitoreo.

Desde una perspectiva económica, la implementación de una estación meteorológica involucra costos de adquisición, instalación, operación, mantenimiento, transmisión de información y eventual reposición de componentes. La evaluación financiera permite establecer si los beneficios esperados justifican la inversión y comparar diferentes alternativas tecnológicas bajo condiciones equivalentes.

El Valor Actual Neto (VAN) constituye uno de los indicadores empleados para determinar la conveniencia económica de un proyecto mediante la actualización de sus flujos monetarios (Andía, 2011). Estos criterios resultan pertinentes para complementar la evaluación técnica de sistemas destinados al monitoreo de recursos renovables.

Aunque existen investigaciones relacionadas con estaciones meteorológicas y caracterización de recursos solares y eólicos, la selección de una alternativa de monitoreo requiere integrar simultáneamente criterios instrumentales y económicos. Estudios desarrollados en Ecuador han abordado sistemas de adquisición meteorológica y herramientas para evaluar recursos renovables, mientras otros han considerado específicamente el componente técnico-económico de estas estaciones (Monga et al., 2022; Castro & Gunsha-Morales, 2025). Sin embargo, resulta necesario comparar alternativas con diferentes prestaciones y costos bajo condiciones concretas de aprovechamiento. Este análisis permite fundamentar la selección del sistema más adecuado para las características del área de estudio.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente alternativas de monitoreo meteorológico orientadas a la obtención de datos para la caracterización del potencial solar y eólico en Quevedo, Ecuador. Para ello, se compararon las prestaciones técnicas de diferentes configuraciones de estaciones meteorológicas y se analizaron las condiciones de los recursos renovables mediante información meteorológica secundaria. Paralelamente, se examinó la viabilidad financiera de las alternativas mediante indicadores económicos aplicados bajo diferentes escenarios de aprovechamiento de los datos generados. De esta manera, se buscó establecer criterios técnicos y económicos que sustenten la selección de una alternativa de monitoreo acorde con las necesidades del contexto estudiado.

2. Metodología

Enfoque y diseño de investigación

Se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo, alcance descriptivo-comparativo y componente analítico. El procedimiento metodológico integró la revisión bibliográfica y técnica, el análisis comparativo de estaciones meteorológicas comerciales, la evaluación de información meteorológica secundaria y el análisis económico de distintas alternativas tecnológicas. La investigación se orientó a comparar las prestaciones técnicas, la capacidad de adquisición de datos, las características funcionales y los costos asociados con cada configuración de monitoreo meteorológico.

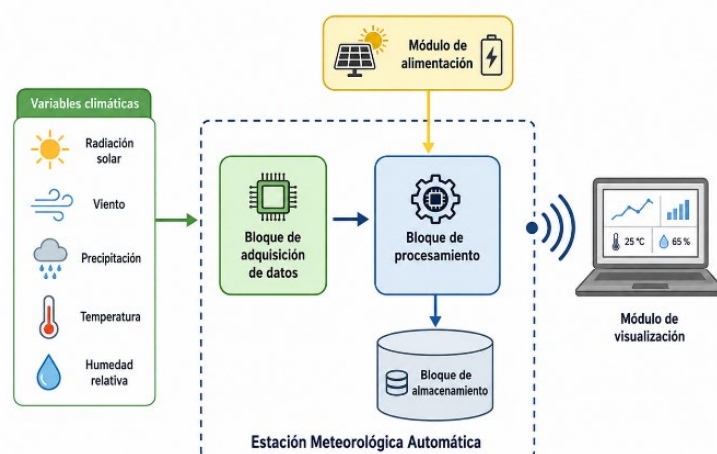
El área de estudio se delimitó al cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, Ecuador, seleccionado por sus condiciones climáticas y por la disponibilidad de información meteorológica útil para la caracterización de los recursos renovables. Se utilizaron datos secundarios correspondientes a variables solares y eólicas obtenidos de fuentes especializadas. Esta información permitió analizar el comportamiento del recurso energético local y establecer los requerimientos técnicos considerados para la comparación y selección de los sistemas de monitoreo meteorológico.

La arquitectura funcional del sistema de monitoreo se definió como una representación conceptual de los componentes requeridos para una estación automática de adquisición de datos, por lo que no correspondió a un prototipo construido o implementado durante la investigación. Según se presentó en la Figura 1, la estructura incluyó módulos de adquisición, procesamiento, almacenamiento, alimentación energética y visualización de información. La configuración representó el flujo operativo desde la captación de las variables ambientales hasta su procesamiento, almacenamiento y posterior consulta.

La arquitectura conceptual permitió identificar los principales elementos tecnológicos requeridos por una estación meteorológica automática y se utilizó como referencia para establecer los criterios de comparación entre las alternativas comerciales analizadas. La evaluación se concentró en la capacidad funcional de los equipos disponibles, sus prestaciones técnicas y los costos asociados con su implementación. También se valoró su aplicabilidad para la obtención de información destinada a la caracterización de los recursos solares y eólicos en el área de estudio.

Figura 1

Arquitectura funcional de referencia de una estación meteorológica automática para la adquisición, procesamiento y visualización de variables climáticas



La figura 1 representó la arquitectura funcional de referencia de una estación meteorológica automática, utilizada como modelo conceptual para identificar los componentes tecnológicos requeridos en un sistema de monitoreo de variables ambientales. Esta representación no correspondió a un prototipo desarrollado ni implementado físicamente durante la investigación, sino a una estructura de análisis empleada para comprender la interacción entre los módulos necesarios para la adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización de información meteorológica.

La arquitectura considerada estuvo conformada por un módulo de adquisición de datos destinado al registro de variables ambientales asociadas con el análisis de recursos renovables, entre ellas radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitación, temperatura y humedad relativa. Los datos recopilados fueron transferidos a un módulo de procesamiento, en el que se organizaron y gestionaron antes de su almacenamiento en sistemas locales o remotos.

La configuración incluyó, además, un módulo de alimentación energética destinado a garantizar la autonomía operativa del sistema y un módulo de comunicación y visualización orientado a la transmisión, consulta y representación de los registros meteorológicos. Estos componentes permitieron establecer una secuencia funcional desde la captación de las variables ambientales hasta la disponibilidad de la información para su posterior análisis.

Esta arquitectura conceptual permitió definir los elementos funcionales considerados en la evaluación comparativa de las alternativas comerciales analizadas. A partir de esta estructura, se relacionaron las capacidades técnicas de cada equipo con los requerimientos de adquisición, procesamiento, almacenamiento, alimentación y comunicación necesarios para la obtención de información destinada a la caracterización del potencial solar y eólico.

Evaluación técnica y análisis de información meteorológica

La evaluación técnica se orientó al análisis de los componentes directamente relacionados con la caracterización del potencial solar y eólico en el área de estudio. Para el recurso solar se consideraron dispositivos destinados a la medición de irradiancia mediante piranómetros y sensores integrados, mientras que para el recurso eólico se analizaron sistemas basados en anemómetros de copa y ultrasónicos. También se examinaron variables meteorológicas complementarias, como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación. La comparación técnica y económica se concentró en los componentes vinculados directamente con la estimación del potencial energético (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018; Monga et al., 2022).

Los criterios utilizados para comparar las alternativas tecnológicas incluyeron precisión de medición, integración del sistema, facilidad de instalación, autonomía energética, conectividad, requerimientos de mantenimiento y costo de adquisición. La valoración se efectuó mediante un análisis comparativo descriptivo sustentado en las especificaciones técnicas proporcionadas por fabricantes y distribuidores. No se aplicó una ponderación matemática, debido a las diferencias existentes entre las capacidades funcionales, niveles de aplicación y configuraciones tecnológicas de los equipos evaluados. Por esta razón, la comparación consideró conjuntamente las prestaciones técnicas, los requerimientos operativos y la viabilidad económica de cada alternativa.

También se analizaron las tecnologías disponibles para la transmisión y gestión remota de datos, entre ellas GPRS/GSM, LoRaWAN, WiFi/Ethernet y protocolos industriales como MODBUS-RTU. Estas alternativas se examinaron según su capacidad de integración con los sistemas de adquisición, almacenamiento y consulta de información meteorológica. Se consideraron, además, configuraciones estructurales de instalación mediante montaje en pared, trípode y torreta. La evaluación contempló aspectos relacionados con la estabilidad de la estructura, ubicación de los sensores y condiciones requeridas para la operación del sistema (Darquea & Santacruz, 2020; Lema & Cabrera, 2023).

La información utilizada para caracterizar el recurso solar correspondió al cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, Ecuador. Los registros de irradiación solar global y difusa sobre plano horizontal se obtuvieron mediante la plataforma PVGIS-5 para el año 2023. La información se organizó con resolución mensual y horaria con el propósito de examinar su comportamiento temporal y las variaciones observadas durante diferentes períodos del año. Los datos obtenidos permitieron caracterizar la disponibilidad del recurso solar y establecer referentes para la evaluación de los requerimientos instrumentales de las estaciones analizadas (Arla et al., 2017).

Para la caracterización del recurso eólico se utilizaron estimaciones y estadísticas medias disponibles en la plataforma Windfinder para el punto correspondiente a Quevedo, consultadas durante el período de análisis 2024–2025. La extracción consideró cuatro horarios de referencia del ciclo diurno: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00, hora local. Las velocidades del viento correspondieron a registros referidos a 10 m sobre el nivel del suelo y sus valores originales fueron convertidos de nudos a metros por segundo. Posteriormente, estos datos se contrastaron con valores de referencia asociados con la operación de aerogeneradores de pequeña escala (Gordillo et al., 2022; Uvidia et al., 2023).

De manera complementaria, se incorporó información meteorológica procedente del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología durante el período diciembre de 2024–enero de 2025. Se analizaron registros relacionados con condiciones de sequía y precipitación satelital para el área correspondiente a Quevedo. Los datos fueron organizados a escala diaria y mensual con el propósito de identificar las condiciones pluviométricas presentes durante el período evaluado. Esta información

se utilizó como referencia ambiental complementaria para interpretar las variaciones observadas en la disponibilidad del recurso solar durante los períodos de mayor precipitación.

El procesamiento de la información comprendió la recopilación, organización, depuración y revisión de consistencia de las variables meteorológicas utilizadas en el estudio. Se consideraron principalmente irradiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y precipitación, de acuerdo con la disponibilidad de las fuentes secundarias seleccionadas. La revisión de consistencia permitió estructurar la información requerida para la caracterización de los recursos solar y eólico y para la comparación de las alternativas tecnológicas. Este procedimiento redujo el riesgo de incorporar registros incompletos o inconsistentes en los análisis posteriores (Matovelle et al., 2022).

La información meteorológica procesada se utilizó como referencia para determinar las necesidades de adquisición de datos y relacionarlas con las prestaciones de las estaciones meteorológicas evaluadas. De este modo, se comparó la capacidad de cada alternativa para registrar las variables requeridas en la caracterización de los recursos solar y eólico. Los resultados de esta evaluación técnica se integraron posteriormente con los costos de adquisición e implementación de cada configuración. Esta integración proporcionó la base para el análisis económico de las alternativas mediante los indicadores financieros establecidos en el estudio.

Evaluación económica mediante VAN y TIR

La valoración económica de la información meteorológica se sustentó en el esquema tarifario establecido por el INAMHI para el suministro de datos hidrometeorológicos. De acuerdo con este tarifario, se asignó un valor diario de USD 1,06 a cada registro de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, equivalente a USD 386,90 anuales por variable. Para la precipitación se consideró una tarifa de USD 3,44 diarios, correspondiente a USD 1.255,60 anuales.

A partir de estos valores se estimó un beneficio económico anual de referencia para cada configuración meteorológica, entendido como el valor equivalente de la información que potencialmente podía generarse durante un año de operación. Para las estaciones capaces de registrar simultáneamente temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y precipitación, se obtuvo un valor anual base de USD 2.803,20. En las configuraciones que no incorporaron medición de radiación solar, el valor de referencia se estableció en USD 2.416,30 anuales.

Debido a que una estación instalada con fines académicos o privados no implicó necesariamente la comercialización total de los datos generados, se efectuó un análisis de sensibilidad según diferentes niveles de aprovechamiento económico. El ingreso anual considerado en cada escenario se calculó como una proporción del valor económico anual de referencia de la información meteorológica. Para este propósito se evaluaron escenarios equivalentes al 100 %, 50 % y 25 % de aprovechamiento, los cuales fueron incorporados posteriormente en los respectivos flujos de caja.

Para las estaciones capaces de registrar las cinco variables consideradas, los ingresos anuales modelados fueron de USD 2.803,20 para el escenario del 100 %, USD 1.401,60 para el 50 % y USD 700,80 para el 25 %. En las configuraciones que registraron cuatro variables, los valores correspondientes fueron de USD 2.416,30, USD 1.208,15 y USD 604,08 para los escenarios del 100 %, 50 % y 25 %, respectivamente. Estos valores constituyeron la base económica utilizada posteriormente para el cálculo del Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

Tabla 1*Escenarios de aprovechamiento económico de la información meteorológica*

Escenario	Nivel de aprovechamiento	Interpretación económica	Ingreso anual estimado: estación completa (USD)	Ingreso anual estimado: estación compacta (USD)
Optimista	100 %	Aprovechamiento integral de los datos para planificación y diseño de proyectos de energías renovables.	2.803,20	2.416,30
Moderado	50 %	Aprovechamiento parcial de los datos para estudios técnicos específicos.	1.401,60	1.208,15
Conservador	25 %	Aprovechamiento limitado de los datos para consultas y análisis técnicos puntuales.	700,80	604,08

Nota. La estación completa correspondió a una configuración con cinco variables meteorológicas y un valor económico anual base de USD 2.803,20. La estación compacta correspondió a una configuración con cuatro variables y un valor económico anual base de USD 2.416,30. Los ingresos estimados se calcularon mediante la aplicación del porcentaje de aprovechamiento correspondiente sobre el valor económico anual base.

3. Resultados

Evaluación técnica de las alternativas de monitoreo

La evaluación técnica evidenció diferencias en las prestaciones de los sensores considerados para el monitoreo de variables asociadas con el aprovechamiento de recursos renovables. En la tabla 2 se compararon el piranómetro SR-01 y el sistema integrado ClimaVUE50 según precisión, tiempo de respuesta, modalidad de integración y aplicación principal. Los resultados mostraron que ambos dispositivos presentaron características funcionales diferenciadas de acuerdo con el nivel de exigencia requerido para la adquisición de datos.

Tabla 2*Comparación técnica de sensores para el monitoreo de radiación solar*

Sensor	Precisión	Tiempo de respuesta	Integración	Aplicación principal	Valoración técnica
SR-01	±2 % anual	<1 ms	Analógica	Validación y monitoreo especializado	Mayor precisión y rapidez de respuesta
ClimaVUE50	±5 % típica	<1 s	Digital SDI-12	Monitoreo meteorológico integrado	Mayor facilidad de integración e implementación

Nota. Elaboración propia a partir de Castro y Gunsha-Morales (2025).

El piranómetro SR-01 presentó una precisión de ±2 % anual y un tiempo de respuesta inferior a 1 ms, lo que evidenció mejores prestaciones para aplicaciones que demandaron mayor precisión y rapidez de medición. En contraste, el ClimaVUE50 registró una precisión típica de ±5 % y un tiempo de respuesta inferior a 1 s. Esta alternativa destacó por su integración digital mediante SDI-12 y por las facilidades asociadas con su implementación en sistemas de monitoreo meteorológico.

En términos comparativos, el SR-01 resultó más adecuado para aplicaciones especializadas en las que la precisión de la medición constituyó un criterio prioritario. El ClimaVUE50 representó una alternativa funcional para configuraciones que priorizaron integración, facilidad de implementación y adquisición conjunta de variables ambientales. Estas diferencias permitieron establecer que la selección del sensor dependió de los requerimientos técnicos y del nivel de precisión exigido para la caracterización del recurso solar.

Configuraciones estructurales para la instalación de estaciones meteorológicas automáticas

La evaluación de las configuraciones estructurales evidenció diferencias relacionadas con estabilidad, movilidad, facilidad de instalación y requerimientos de montaje. Como se presenta en la tabla 3, ninguna alternativa resultó universalmente superior, debido a que su conveniencia dependió de las condiciones del sitio y del propósito del monitoreo. El anclaje en pared se caracterizó por una instalación sencilla y menor requerimiento de espacio, mientras que el trípode ofreció mayor capacidad de reubicación.

La torreta presentó ventajas asociadas con una mayor altura y estabilidad estructural, características favorables para reducir posibles interferencias del entorno durante el registro de variables meteorológicas. No obstante, esta configuración implicó mayores requerimientos de instalación, cimentación e inversión frente a las demás alternativas. En consecuencia, la selección de la estructura dependió del carácter temporal o permanente del monitoreo, las condiciones físicas del emplazamiento y los requerimientos operativos de la estación.

Tabla 3

Comparación de configuraciones estructurales para estaciones meteorológicas

Configuración	Principales ventajas	Principales limitaciones	Aplicación sugerida
Anclaje en pared	Instalación sencilla, menor ocupación de espacio y menor requerimiento de infraestructura	Dependencia de estructuras existentes, posibles interferencias del entorno y menor flexibilidad de ubicación	Instalaciones permanentes en espacios con infraestructura disponible
Trípode	Portabilidad, adaptación a diferentes terrenos y facilidad de reubicación	Menor estabilidad frente a condiciones ambientales adversas y limitaciones de altura	Estudios temporales y monitoreo en zonas que requieren movilidad
Torreta	Mayor altura, estabilidad estructural y posibilidad de reducir interferencias del entorno	Mayor inversión, necesidad de cimentación y menor facilidad de reubicación	Monitoreo permanente y aplicaciones con mayores exigencias instrumentales

Nota. Elaboración propia a partir de Castro y Gunsha-Morales (2025).

Requisitos técnicos y operativos para el monitoreo meteorológico

La evaluación permitió identificar los principales requerimientos técnicos y operativos asociados con el funcionamiento de una estación meteorológica automática. Como se presenta en la Tabla 4, estos requerimientos comprendieron condiciones de emplazamiento, instalación, mantenimiento, alimentación energética, comunicación y almacenamiento de información. Su consideración resultó necesaria para garantizar la continuidad operativa del sistema y favorecer la obtención de registros meteorológicos técnicamente confiables.

El emplazamiento y la instalación constituyeron factores relevantes debido a su influencia sobre la representatividad y calidad de las mediciones. De igual manera, el mantenimiento periódico permitió conservar las condiciones operativas de los sensores y reducir posibles alteraciones en los registros. La alimentación energética, los sistemas de comunicación y el almacenamiento complementaron estos requerimientos al facilitar la adquisición continua, transmisión y conservación de las series meteorológicas utilizadas posteriormente en el análisis de los recursos renovables (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018).

Tabla 4

Requisitos técnicos y operativos para el funcionamiento de una estación meteorológica automática

Componente	Requisito principal	Finalidad
Emplazamiento	Terreno adecuado y ausencia de obstáculos que interfieran con los sensores	Favorecer la representatividad de las mediciones y reducir interferencias del entorno
Instalación	Montaje conforme con las especificaciones técnicas y condiciones de operación de cada sensor	Garantizar el funcionamiento adecuado y la calidad de los registros
Mantenimiento	Limpieza, calibración e inspección periódica de los componentes	Conservar la estabilidad operativa y reducir errores asociados con el deterioro de los equipos
Alimentación	Sistema de alimentación principal y respaldo energético, según las condiciones del emplazamiento	Mantener la continuidad operativa de la estación
Comunicación	WiFi, GPRS/GSM, LoRaWAN u otros sistemas compatibles	Facilitar la transmisión y consulta remota de la información meteorológica
Almacenamiento	Datalogger o sistema equivalente de registro	Conservar las series temporales para su procesamiento y análisis posterior

Nota. Elaboración propia con base en los criterios técnicos y operativos considerados en Castro y Gunsha-Morales (2025) y en las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (2018).

Potencial solar y eólico

La evaluación del recurso solar evidenció variaciones temporales en los niveles de irradiación registrados para el cantón Quevedo. Como se presenta en la tabla 5, entre julio y septiembre se observaron los valores más elevados, con un rango de 135 a 145 kWh/m² y relaciones difusas/global comprendidas entre 0,39 y 0,42. Estos resultados indicaron una mayor disponibilidad relativa del recurso solar durante este período y una menor participación de la componente difusa en la radiación global.

Durante el período abril-junio, la irradiación presentó valores entre 115 y 130 kWh/m², acompañados de una relación difusa/global de 0,43 a 0,50. En comparación con julio-septiembre, estos registros evidenciaron una disponibilidad solar intermedia. Por su parte, entre noviembre y marzo se identificaron los valores más bajos, con irradiaciones entre 92 y 110 kWh/m² y una mayor proporción de radiación difusa, comprendida entre 0,52 y 0,58.

En conjunto, los resultados mostraron una relación inversa entre la disponibilidad de irradiación y la proporción de radiación difusa durante los períodos analizados. Los intervalos con mayor irradiación coincidieron con menores relaciones difusa/global, mientras que los períodos de menor disponibilidad presentaron una participación relativamente mayor de la radiación difusa. Este

comportamiento evidenció la variabilidad temporal del recurso solar en Quevedo y la necesidad de considerar estas fluctuaciones en su caracterización energética (Arla et al., 2017).

Tabla 5

Comportamiento temporal del recurso solar en el cantón Quevedo

Período	Irradiación (kWh/m ²)	Relación difusa/global	Disponibilidad relativa del recurso
Julio–septiembre	135–145	0,39–0,42	Mayor
Abril–junio	115–130	0,43–0,50	Intermedia
Noviembre–marzo	92–110	0,52–0,58	Menor

Nota. Elaboración propia a partir de datos obtenidos mediante PVGIS-5. La disponibilidad relativa se estableció mediante la comparación de los rangos de irradiación registrados entre los períodos analizados y no correspondió a una clasificación estandarizada del potencial solar.

La clasificación del potencial solar se estableció mediante un criterio técnico comparativo basado en los niveles de irradiación obtenidos para el área de estudio mediante PVGIS-5. Debido a que el análisis se orientó a diferenciar la disponibilidad relativa del recurso solar en Quevedo, se definieron tres categorías operativas de acuerdo con la magnitud de la irradiación registrada. Esta clasificación tuvo carácter comparativo dentro del estudio y no correspondió a una escala estandarizada de evaluación del recurso solar.

Se consideró como potencial excelente una irradiación igual o superior a 135 kWh/m², asociada con una mayor disponibilidad energética relativa; como potencial bueno, valores comprendidos entre 115 y menos de 135 kWh/m²; y como potencial moderado, registros entre 90 y menos de 115 kWh/m². De manera complementaria, se examinó la relación entre radiación difusa y global para interpretar las variaciones observadas. Este criterio permitió comparar homogéneamente los períodos analizados y evitar intervalos sin clasificación.

La categorización permitió identificar diferencias temporales en la disponibilidad del recurso solar y relacionarlas con los requerimientos técnicos de las alternativas de monitoreo evaluadas. Los valores de irradiación utilizados en el análisis se obtuvieron mediante PVGIS-5 y se emplearon como información secundaria para caracterizar el comportamiento del recurso solar en Quevedo. Esta aproximación resultó consistente con estudios realizados en Ecuador que han utilizado información de radiación para evaluar las condiciones de aprovechamiento de la energía solar (Arla et al., 2017).

Como se presentó en la Tabla 5, el período comprendido entre julio y septiembre registró los valores más elevados de irradiación, entre 135 y 145 kWh/m², junto con una menor relación entre radiación difusa y global. En contraste, entre noviembre y marzo se identificaron los valores más bajos, comprendidos entre 92 y 110 kWh/m². A pesar de esta reducción, los registros evidenciaron la presencia del recurso solar durante todos los períodos considerados, aunque con diferencias en su disponibilidad relativa.

El recurso eólico presentó un comportamiento distinto al observado para la irradiación solar. Su caracterización se realizó mediante las velocidades del viento correspondientes a los diferentes horarios de referencia establecidos en la metodología y su conversión a metros por segundo. Los resultados permitieron identificar las variaciones del recurso a lo largo del ciclo diario y determinar los intervalos con mayor disponibilidad relativa. Estos valores se presentan en la Tabla 6 y complementaron la caracterización energética del área de estudio.

Caracterización del recurso eólico en el área de estudio

La caracterización referencial del recurso eólico evidenció velocidades reducidas en los horarios considerados para el cantón Quevedo. Como se presenta en la Tabla 6, los valores oscilaron entre 2 y 4 nudos, equivalentes aproximadamente a 1,03 y 2,06 m/s. Estas velocidades reflejaron una baja disponibilidad relativa del recurso eólico superficial durante los momentos analizados. Los resultados se utilizaron como referencia para comparar su comportamiento con los requerimientos operativos de sistemas de generación eólica de pequeña escala.

Los datos correspondieron a estimaciones meteorológicas obtenidas mediante la plataforma Windfinder para Quevedo, referidas a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Se consideraron cuatro horarios representativos del ciclo diario: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00, hora local. Las velocidades registradas fueron de 2 nudos (1,03 m/s), 3 nudos (1,54 m/s), 4 nudos (2,06 m/s) y 2 nudos (1,03 m/s), respectivamente. El valor más elevado se identificó a las 12:00, aunque permaneció dentro de un rango reducido para fines de generación.

Desde una perspectiva técnica, la producción de energía eólica está condicionada por la velocidad del viento y por las características de operación del aerogenerador utilizado. Las turbinas de pequeña escala requieren alcanzar una velocidad mínima de arranque o *cut-in wind speed* para iniciar la generación eléctrica, cuyos valores dependen del diseño y especificaciones de cada equipo (Bohórquez & Enciso, 2019; Escudero, 2011). En comparación con estos requerimientos, las velocidades observadas en Quevedo permanecieron por debajo de los rangos usualmente asociados con el inicio de operación de pequeñas turbinas.

En consecuencia, los registros analizados indicaron condiciones poco favorables para el aprovechamiento eólico superficial mediante sistemas de pequeña escala durante los horarios evaluados. No obstante, estos resultados no constituyeron una determinación definitiva del potencial eólico anual, debido a que procedieron de estimaciones secundarias y de un número limitado de horarios de referencia. Por ello, una evaluación concluyente requeriría series temporales de mayor duración, mediciones continuas y datos obtenidos a alturas representativas de operación de los aerogeneradores.

Tabla 6

Comportamiento horario del recurso eólico estimado en Quevedo, Ecuador

Hora de referencia	Velocidad del viento (nudos)	Velocidad aproximada (m/s)	Valoración referencial
00:00	2	1,03	Poco favorable
06:00	3	1,54	Poco favorable
12:00	4	2,06	Poco favorable
18:00	2	1,03	Poco favorable

Nota. Datos obtenidos mediante la plataforma Windfinder para Quevedo, Ecuador, a una altura de referencia de 10 m sobre el nivel del suelo. La valoración correspondió a una comparación preliminar con los requerimientos operativos de aerogeneradores de pequeña escala y no representó una estimación definitiva del potencial eólico anual.

Evaluación económica

La evaluación económica evidenció diferencias importantes en los niveles de inversión requeridos por las alternativas de monitoreo meteorológico analizadas. Como se presenta en la Tabla 7, los costos iniciales oscilaron entre USD 520 y USD 10.000, mientras que los gastos anuales estimados de operación

y mantenimiento variaron entre USD 150 y USD 1.150. Estas diferencias estuvieron asociadas principalmente con la capacidad funcional, el número de variables registradas y los sistemas de comunicación incorporados.

Para garantizar una comparación homogénea, se incluyeron únicamente sistemas con capacidad para registrar múltiples variables meteorológicas y gestionar la información obtenida mediante mecanismos de almacenamiento, procesamiento o transmisión. Los instrumentos individuales fueron excluidos de la comparación económica principal, debido a que no representaron alternativas equivalentes a una estación meteorológica automática completa. Su consideración se limitó a servir como referencia para el costo de componentes específicos del sistema.

Tabla 7

Comparación técnica y económica de alternativas de estaciones meteorológicas según nivel de inversión

Nivel de inversión	Modelo o sistema	Capacidad funcional	Variables o prestaciones principales	Inversión inicial (USD)	Operación y mantenimiento anual (USD)
Alta	LSI Lastem Professional	Estación meteorológica profesional	Temperatura, humedad, presión, radiación solar, precipitación, viento, almacenamiento y comunicación avanzada	10.000	1.150
Alta	RK900-10 Ultrasónica	Estación meteorológica multiparámetro	Medición integrada mediante sensores ultrasónicos, adquisición y transmisión de datos	3.790	500
Alta	DataGarrison Satelital	Sistema remoto de monitoreo	Adquisición meteorológica y transmisión satelital de información	2.900	400
Media	Davis Vantage Pro2	Estación meteorológica automática compacta	Temperatura, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento y comunicación inalámbrica	1.650	300
Media	Davis Vantage Vue	Estación meteorológica automática básica	Variables atmosféricas principales y transmisión inalámbrica	950	200
Media	HP2550 WiFi	Estación meteorológica compacta con conectividad	Temperatura, humedad, presión, precipitación, viento y conexión WiFi	920	200
Media	WH2900 WiFi	Estación meteorológica compacta	Variables meteorológicas básicas y transmisión inalámbrica	520	150

Nota. Los instrumentos individuales fueron excluidos de la comparación principal debido a que no representaron alternativas equivalentes de monitoreo integral. Los valores correspondieron a los costos considerados para el análisis económico del estudio y fueron organizados a partir de Castro y Gunsha-Morales (2025).

Las alternativas clasificadas en el nivel de inversión alta presentaron costos iniciales comprendidos entre USD 2.900 y USD 10.000, además de mayores requerimientos anuales de operación y mantenimiento. Estas configuraciones incorporaron prestaciones asociadas con monitoreo multiparámetro, almacenamiento, comunicación avanzada o transmisión remota. La LSI Lastem Professional registró la mayor inversión inicial y el mayor costo anual, mientras que la DataGarrison Satelital presentó el menor costo dentro de este grupo.

Las alternativas de inversión media mostraron costos iniciales entre USD 520 y USD 1.650 y gastos anuales de mantenimiento entre USD 150 y USD 300. Dentro de este grupo, la Davis Vantage Pro2 presentó la mayor inversión, mientras que la WH2900 WiFi registró el menor costo inicial y operativo. En términos funcionales, estas alternativas permitieron registrar las principales variables meteorológicas requeridas para aplicaciones de monitoreo, aunque con diferencias en integración, conectividad y número de parámetros disponibles.

En conjunto, los resultados evidenciaron una relación entre el nivel de inversión y las prestaciones funcionales ofrecidas por las alternativas analizadas. Las estaciones de mayor costo incorporaron sistemas de adquisición, almacenamiento y comunicación más completos, mientras que las opciones de inversión media proporcionaron configuraciones orientadas a requerimientos de monitoreo menos especializados. Estos resultados constituyeron la base para el análisis posterior de viabilidad mediante el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

Evaluación económica mediante Valor Actual Neto (VAN)

La viabilidad económica de las alternativas se evaluó mediante el Valor Actual Neto (VAN) bajo tres escenarios de aprovechamiento de la información meteorológica: 100 %, 50 % y 25 %. Como se presenta en la Tabla 8, los resultados variaron de acuerdo con la inversión inicial, los costos anuales de operación y mantenimiento y el valor económico atribuido a los datos generados. Un VAN positivo indicó condiciones favorables de recuperación económica bajo los supuestos establecidos, mientras que un valor negativo reflejó que los beneficios proyectados no compensaron los costos considerados (Andía, 2011).

Tabla 8

Valor Actual Neto (VAN) de las estaciones meteorológicas automáticas bajo distintos escenarios de aprovechamiento de datos

Nivel de inversión	Modelo o sistema	Inversión inicial (USD)	Costo anual de O&M (USD)	VAN 100 % (USD)	VAN 50 % (USD)	VAN 25 % (USD)
Alta	LSI Lastem Professional	10.000,00	1.150,00	-9.373,59	-10.775,19	-11.475,99
Alta	RK900-10 Ultrasónica	3.790,00	500,00	-1.933,23	-3.334,83	-4.035,63
Alta	DataGarrison Satelital	2.900,00	400,00	-1.240,84	-2.448,99	-3.053,07
Media	Davis Vantage Pro2	1.650,00	300,00	198,44	-1.009,71	-1.613,78
Media	Davis Vantage Vue	950,00	200,00	1.087,73	-120,42	-724,50

Media	HP2550 con WiFi	920,00	200,00	1.504,63	103,03	-597,77
Media	WH2900 con WiFi	520,00	150,00	1.612,37	404,22	-199,85

Nota. Elaboración propia con base en los costos y escenarios económicos considerados a partir de Castro y Gunsha-Morales (2025). O&M: operación y mantenimiento.

En el escenario de aprovechamiento del 100 %, cuatro alternativas de inversión media alcanzaron valores positivos de VAN. La WH2900 con WiFi presentó el resultado más favorable, con USD 1.612,37, seguida de la HP2550 con WiFi, con USD 1.504,63, y la Davis Vantage Vue, con USD 1.087,73. La Davis Vantage Pro2 registró un VAN positivo de USD 198,44, mientras que las tres alternativas clasificadas como de inversión alta presentaron valores negativos.

Al reducir el aprovechamiento de la información al 50 %, únicamente la WH2900 con WiFi y la HP2550 con WiFi mantuvieron valores positivos de VAN, equivalentes a USD 404,22 y USD 103,03, respectivamente. Las demás configuraciones registraron resultados negativos, entre los que la Davis Vantage Vue presentó el valor más próximo al punto de equilibrio, con -USD 120,42. Este comportamiento evidenció una disminución progresiva de la viabilidad financiera conforme se redujo el nivel de aprovechamiento económico de los datos.

En el escenario conservador del 25 %, ninguna de las alternativas alcanzó un VAN positivo. La WH2900 con WiFi presentó la menor pérdida relativa, con -USD 199,85, seguida de la HP2550 con WiFi, con -USD 597,77, y la Davis Vantage Vue, con -USD 724,50. En contraste, la LSI Lastem Professional registró el resultado menos favorable, con un VAN de -USD 11.475,99, principalmente en función de su elevada inversión inicial frente al beneficio económico considerado en el modelo.

En conjunto, los resultados mostraron una elevada sensibilidad del VAN frente al nivel de aprovechamiento económico atribuido a la información meteorológica. Las configuraciones de menor inversión presentaron un comportamiento financiero más favorable bajo los escenarios del 100 % y 50 %, mientras que la reducción al 25 % generó valores negativos en todos los equipos analizados. Estos resultados deben interpretarse dentro de los supuestos económicos, horizonte temporal y tasa de descuento establecidos para el análisis.

Evaluación económica mediante Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se analizó para las alternativas de estaciones meteorológicas bajo escenarios de aprovechamiento económico del 100 %, 50 % y 25 % de la información generada. Como se presenta en la Tabla 9, el indicador mostró variaciones considerables en función de la inversión inicial, los costos anuales de operación y mantenimiento y los ingresos estimados para cada escenario. Los resultados permitieron complementar la evaluación obtenida previamente mediante el Valor Actual Neto.

En el escenario de aprovechamiento del 100 %, las alternativas de inversión media presentaron los resultados más favorables. La WH2900 con WiFi alcanzó la mayor TIR, con 335,83 %, seguida de la HP2550 con WiFi, con 182,96 %, y la Davis Vantage Vue, con 133,29 %. La Davis Vantage Pro2 presentó una TIR de 28,26 %, mientras que las alternativas de mayor inversión registraron valores negativos, comprendidos entre -30,47 % y -83,47 %.

La reducción del aprovechamiento al 50 % disminuyó la TIR de todas las alternativas evaluadas. En este escenario, la WH2900 con WiFi mantuvo el resultado más favorable, con 103,49 %, seguida de la

HP2550 con WiFi, con 30,61 %, y la Davis Vantage Vue, con 6,12 %. Las restantes configuraciones presentaron valores negativos, lo que evidenció una menor capacidad de recuperación de la inversión frente a la reducción de los ingresos atribuidos al aprovechamiento de la información meteorológica.

En el escenario del 25 %, todas las configuraciones presentaron resultados desfavorables. La WH2900 con WiFi registró la TIR más próxima al punto de equilibrio, con -12,68 %, seguida de la HP2550 con WiFi, con -45,57 %, y la Davis Vantage Vue, con -57,47 %. En el caso de la LSI Lastem Professional, el flujo neto anual resultó negativo, por lo que no se determinó una TIR financieramente interpretable para este escenario.

En conjunto, la TIR mostró una elevada sensibilidad frente al nivel de aprovechamiento económico atribuido a los datos meteorológicos. Las alternativas con menor inversión inicial presentaron mejores resultados bajo los escenarios del 100 % y 50 %, mientras que el escenario del 25 % produjo resultados desfavorables en todas las configuraciones. Debido al horizonte de evaluación de un año, estos valores se interpretaron juntamente con el VAN y dentro de los supuestos establecidos en el modelo económico.

Tabla 9

Tasa Interna de Retorno (TIR) de las estaciones meteorológicas bajo distintos escenarios de aprovechamiento

Nivel de inversión	Modelo o sistema	Inversión inicial (USD)	TIR 100 %	TIR 50 %	TIR 25 %
Alta	LSI Lastem Professional	10.000,00	-83,47 %	-97,48 %	No calculable
Alta	RK900-10 Ultrasónica	3.790,00	-39,23 %	-76,21 %	-94,70 %
Alta	DataGarrison Satelital	2.900,00	-30,47 %	-72,13 %	-92,96 %
Media	Davis Vantage Pro2	1.650,00	28,26 %	-44,96 %	-81,57 %
Media	Davis Vantage Vue	950,00	133,29 %	6,12 %	-57,47 %
Media	HP2550 con WiFi	920,00	182,96 %	30,61 %	-45,57 %
Media	WH2900 con WiFi	520,00	335,83 %	103,49 %	-12,68 %

Nota. Los instrumentos de medición individual, incluidos los pluviómetros WH5360 y WH0531 y la brújula WS-110, fueron excluidos del análisis financiero principal debido a que no constituyeron alternativas funcionalmente equivalentes a una estación meteorológica automática. En el escenario del 25 % de la LSI Lastem Professional no se reportó TIR debido a la ausencia de un cambio de signo entre los flujos considerados.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron que la evaluación de una estación meteorológica orientada al análisis de recursos renovables requirió integrar criterios técnicos, económicos y operativos. La comparación mostró que un mayor nivel de prestaciones instrumentales no implicó necesariamente una mayor conveniencia económica, debido a que la selección dependió de la precisión requerida, la disponibilidad presupuestaria y la finalidad del monitoreo. Este hallazgo coincidió con experiencias de sistemas basados en sensores integrados y tecnologías de comunicación que han demostrado posibilidades de aplicación bajo requerimientos específicos (Darquea & Santacruz, 2020; Lema & Cabrera, 2023).

En relación con el recurso solar, los resultados mostraron variaciones temporales en la irradiación disponible en Quevedo, con condiciones relativamente más favorables entre julio y septiembre. Este comportamiento confirmó que la disponibilidad solar no debe interpretarse mediante un valor único, sino considerando sus fluctuaciones temporales y la proporción de radiación difusa registrada en cada período. Estudios realizados en Ecuador también han destacado la importancia de caracterizar adecuadamente el recurso solar antes de definir aplicaciones energéticas específicas (Arla et al., 2017; Peralta et al., 2013).

La mayor disponibilidad relativa del recurso solar identificada en determinados períodos respalda la utilidad de complementar las bases de datos secundarias con mediciones meteorológicas locales. Mientras plataformas como PVGIS permiten obtener una aproximación del comportamiento energético de una zona, una estación instalada en el sitio podría registrar variaciones asociadas con las condiciones microclimáticas y ambientales específicas. Esta complementariedad resulta relevante para reducir la dependencia exclusiva de estimaciones y fortalecer la caracterización de recursos renovables mediante información obtenida directamente en el área de interés (Monga et al., 2022).

Respecto al recurso eólico, las velocidades analizadas mostraron condiciones poco favorables para la operación de pequeñas turbinas durante los horarios evaluados. Los valores comprendidos entre 1,03 y 2,06 m/s se situaron por debajo de los rangos de arranque habitualmente requeridos por sistemas de microgeneración, lo que limitó su aprovechamiento bajo las condiciones consideradas (Bohórquez & Enciso, 2019; Escudero, 2011). Este resultado fue consistente con la necesidad de evaluar previamente velocidad, distribución temporal y altura de medición antes de plantear aplicaciones eólicas (Gordillo et al., 2022; Uvidia et al., 2023).

Sin embargo, la menor disponibilidad eólica observada no permitió descartar de manera definitiva el aprovechamiento de este recurso en Quevedo. Las estimaciones procedieron de información secundaria a 10 m de altura y de horarios específicos, por lo que no representaron una caracterización anual exhaustiva. En consecuencia, los resultados deben entenderse como una aproximación preliminar que identificó condiciones menos favorables frente al recurso solar en los datos analizados. Una evaluación concluyente requeriría series continuas de mayor duración y mediciones a alturas representativas de operación de los aerogeneradores.

La comparación económica mostró que las alternativas de menor inversión inicial presentaron resultados financieros más favorables bajo los escenarios de mayor aprovechamiento de la información. No obstante, esta ventaja económica no debe interpretarse como equivalencia técnica frente a estaciones profesionales, debido a que estas últimas pueden incorporar mayores prestaciones de instrumentación, comunicación, almacenamiento y continuidad operativa. Por tanto, la decisión de adquisición debe considerar conjuntamente costo, requerimientos de medición y finalidad de los datos, en concordancia con los criterios técnicos recomendados para la observación meteorológica (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018).

El análisis mediante VAN y TIR evidenció una elevada sensibilidad frente al porcentaje de aprovechamiento económico asignado a los datos meteorológicos. Los VAN positivos se concentraron principalmente en las alternativas de inversión media bajo los escenarios del 100 % y, en menor medida, del 50 %, mientras que el escenario del 25 % produjo resultados desfavorables para todas las configuraciones. Este comportamiento mostró que la conveniencia financiera dependió tanto del desembolso inicial como del valor económico atribuido a la información generada. La interpretación del VAN permitió establecer esta relación entre inversión y recuperación esperada (Andía, 2011).

Las elevadas TIR obtenidas por algunas alternativas de menor inversión deben interpretarse con especial cautela, debido a que estuvieron condicionadas por un horizonte económico corto y por ingresos modelados a partir del valor atribuido a los datos, y no por ventas efectivamente observadas. En consecuencia, estos indicadores representaron escenarios financieros derivados de los supuestos adoptados y no tasas de rentabilidad garantizadas. La consideración conjunta del VAN y la TIR permitió evitar una interpretación aislada de porcentajes elevados de retorno y ofreció una valoración económica más consistente de las alternativas.

Desde una perspectiva aplicada, las configuraciones de menor inversión podrían resultar apropiadas para instituciones educativas, proyectos piloto y estudios exploratorios cuando sus prestaciones técnicas fueran compatibles con los objetivos de medición. Esta interpretación guardó relación con experiencias en las que se han integrado sensores, sistemas de adquisición y tecnologías energéticas en entornos académicos y experimentales (Guerra et al., 2025). Sin embargo, la selección de estos equipos debería sustentarse previamente en la verificación de precisión, estabilidad, mantenimiento y variables efectivamente registradas, antes de asumir su idoneidad para aplicaciones energéticas.

Para aplicaciones relacionadas con diseño definitivo de sistemas energéticos, certificación del recurso o estudios que demanden elevada precisión metrológica, las exigencias instrumentales son superiores a las de un monitoreo exploratorio. En estos escenarios resulta necesario considerar equipos adecuados, emplazamiento técnicamente controlado, procedimientos de calibración y mantenimiento periódico. Las recomendaciones de la OMM (2018) destacan precisamente la importancia de estos elementos para preservar la calidad y representatividad de las observaciones meteorológicas. Por ello, el menor costo de una alternativa no debería constituir el criterio principal cuando la finalidad requiera mediciones de alta confiabilidad.

Una limitación relevante del estudio fue el uso predominante de información secundaria, especificaciones técnicas comerciales y plataformas meteorológicas de consulta, sin una campaña experimental prolongada que permitiera comparar simultáneamente estaciones de diferentes niveles de prestación. También constituyeron limitaciones el uso de estimaciones eólicas correspondientes a horarios específicos y la valoración económica de los datos mediante escenarios hipotéticos de aprovechamiento. En consecuencia, los resultados representaron una evaluación técnico-económica preliminar y no una validación de equivalencia metrológica ni una demostración de rentabilidad comercial efectiva.

Futuros estudios deberían incorporar mediciones continuas de radiación solar y viento, comparación simultánea con instrumentos de referencia y análisis estadístico de precisión e incertidumbre. En el componente económico sería conveniente ampliar el horizonte de evaluación, incorporar vida útil, reposición de sensores, depreciación, costos reales de conectividad y mantenimiento, y distintos modelos de aprovechamiento de la información. Estos elementos permitirían determinar con mayor precisión la relación entre desempeño técnico, disponibilidad del recurso y sostenibilidad económica de las alternativas de monitoreo meteorológico.

5. Conclusiones

La evaluación técnico-económica permitió establecer que las alternativas de monitoreo meteorológico de menor costo pueden constituir soluciones funcionales para estudios preliminares de caracterización de recursos renovables, siempre que su selección responda a las variables requeridas, precisión de medición, condiciones de emplazamiento, capacidad de transmisión y finalidad del estudio. La comparación evidenció que la elección tecnológica debe sustentarse en un equilibrio entre prestaciones

técnicas, confiabilidad operativa y disponibilidad presupuestaria, y no únicamente en el costo inicial de adquisición.

El análisis meteorológico del cantón Quevedo evidenció un comportamiento diferenciado entre los recursos solar y eólico. El recurso solar presentó mayor disponibilidad relativa entre julio y septiembre, con valores de irradiación entre 135 y 145 kWh/m², mientras que el recurso eólico registró velocidades comprendidas entre 1,03 y 2,06 m/s en los horarios evaluados. Estas velocidades indicaron condiciones poco favorables para pequeñas turbinas bajo el escenario analizado, sin constituir una determinación definitiva del potencial eólico anual de la localidad.

Desde la perspectiva económica, las configuraciones de menor inversión inicial presentaron los resultados financieros más favorables en los escenarios de mayor aprovechamiento de la información meteorológica. El VAN disminuyó progresivamente conforme se redujo el aprovechamiento del 100 % al 25 %, escenario en el que ninguna alternativa presentó resultados favorables. De igual manera, la TIR mostró una elevada sensibilidad frente a los ingresos estimados, por lo que su interpretación quedó condicionada por los supuestos económicos y el horizonte temporal considerados en el modelo.

En conjunto, los resultados mostraron que la selección de una estación meteorológica requirió considerar precisión, mantenimiento, autonomía energética, conectividad, capacidad de registro y finalidad del monitoreo. Las alternativas de menor inversión resultaron más apropiadas para aplicaciones exploratorias, académicas o de monitoreo preliminar cuando sus prestaciones satisficieron los requerimientos definidos. En contraste, las aplicaciones que demandan mayor precisión, continuidad y trazabilidad de las mediciones requieren equipos y procedimientos instrumentales acordes con niveles superiores de exigencia técnica.

La principal limitación correspondió al uso predominante de información secundaria y especificaciones técnicas comerciales, sin una campaña experimental prolongada ni comparación simultánea entre las alternativas evaluadas y una estación meteorológica de referencia. Por ello, los resultados deben interpretarse como una evaluación técnico-económica preliminar. Futuras investigaciones deberán incorporar mediciones continuas, procesos de calibración, análisis de incertidumbre y costos reales de operación para determinar con mayor precisión el desempeño y viabilidad de las configuraciones seleccionadas.

Referencias

- Andía, W. (2011). Indicador de rentabilidad de proyectos: El valor actual neto (VAN) o el valor económico agregado (EVA). *Industrial Data*, 14(1), 15–18. <https://doi.org/10.15381/idata.v14i1.6204>
- Arla, S., Tapia, M., Guasumba, J., Martínez, J., Asitimbay, J., & Tapia, E. (2017). Validación del recurso solar en el Ecuador para aplicaciones de media y alta temperatura. *INNOVA Research Journal*, 2(7), 34–45. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n7.2017.226>
- Bala, M., Ganesh, P., Vinay, K., Mohanarao, P., Swathi, A., & Manoj, V. (2024). Renewable energy integration in modern power systems: Challenges and opportunities. *E3S Web of Conferences*, 591, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459103002>
- Bohórquez, C., & Enciso, M. (2019). *Diseño y construcción de un anemómetro para estudios de viabilidad de implementación de generadores eólicos en lugares remotos* [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio Institucional UNAB. <http://hdl.handle.net/20.500.12749/7033>

- Castro, D. & Gunsha-Morales, A. (2025). *Estudio técnico-económico de una estación meteorológica enfocada en la obtención de datos de recursos primarios para la generación de energías renovables* [Trabajo de integración curricular, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/8893>
- Darquea, J., & Santacruz, F. (2020). *Diseño y construcción de una estación meteorológica autónoma e inalámbrica basada en hardware embebido que soporte entornos gráficos de programación* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/18048>
- Escudero, J. (2011). *Manual de energía eólica: Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distinto tipo de instalaciones* (2.ª ed.). Mundi-Prensa. <https://n9.cl/m110m>
- Gordillo, A., Montoya, M., & Salinas, P. (2022). Análisis del desarrollo y potencial de la energía eólica en el Perú. *Ingeniería Industrial*, (43), 177–198. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n43.6114>
- Guerra, D., Boderó, J., Caicedo, F., & Guerra Chávez, J. (2025). Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico con seguidor solar para aplicar en entornos educativos. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 12(1), 45–56. <https://doi.org/10.26423/rctu.v12i1.884>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2025). *Guía para el emplazamiento de las estaciones meteorológicas* (Versión 4, Código GDI-G006), INAMHI. <https://n9.cl/5cs1cg>
- Lema, A., & Cabrera, A. (2023). *Estación meteorológica aplicando internet de las cosas con soporte en LoRaWAN para la agricultura inteligente* [Proyecto integrador, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. DSpace ESPOL. <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58474>
- Matovelle, C., Heras, D., & Solano-Peláez, J. (2022). Eficiencia de la imputación de datos faltantes de precipitaciones utilizando herramientas computacionales en la cuenca hidrográfica, Jubones-Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(2), 23–30. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.03>
- Monga, J., Barreno, C., Granda, N., & Quilumba, F. (2022). Desarrollo de una estación meteorológica y una herramienta computacional para la evaluación de los recursos eólico y solar. *Revista Técnica "energía"*, 18(2), 113–123. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.495>
- Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de instrumentos y métodos de observación* (OMM-N.º 8). <https://library.wmo.int/es/records/item/68714-guia-de-instrumentos-y-metodos-de-observacion>
- Peralta, J., López, A., Barriga, A., Sosa-Tinoco, I., & Delgado, E. (2013, noviembre). *Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador* [Ponencia]. Primer Congreso ISEREE 2013, Quito, Ecuador. <https://n9.cl/6avi>
- Rodríguez-Galarza, G., Jinez-Tapia, J., Torres-Rodríguez, K., & Rentería-Bustamante, L. (2026). Implementación de un tablero ocupacional digital para mejorar las actividades de la vida diaria en discapacidad intelectual. *Revista Digital Científica Causalidad (caui3)*, 2(1), 10–22. <https://doi.org/10.70929/caui3.v2i1.0018>
- Uvidia, L., Masaquiza, J., Paladines, J., & Moyano, M. (2023). Revisión documental de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en el Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 6714–6734. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9202

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Alfonso Gunsha-Morales: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Darwin René Mejía Candelejo: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Adrian Jefferson Paredes Cuyo: Software, análisis formal, gestión de datos, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Miguel Ángel Orozco Campaz: Validación, análisis formal, investigación, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.