

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EN EL CAMPUS SAN ALBERTO MAGNO DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, SEDE BOGOTÁ.

ANALYSIS OF THE PRODUCTION EFFICIENCY OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM ON THE SAN ALBERTO MAGNO CAMPUS OF THE SANTO TOMÁS UNIVERSITY, BOGOTÁ SITE.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.21.1.2025.14>

Artículo de Investigación Científica.

Fecha de Recepción: 05/04/2025, Fecha de Aceptación: 24/05/2025.

Juan Esteban Burbano Gamboa  <https://orcid.org/0000-0001-6542-9826>

Universidad Santo Tomas, (Colombia)

Juan.burbano@usantotomas.edu.co

Nicolas Forero López  <https://orcid.org/0000-0002-5305-6468>

Universidad Santo Tomas. Bogotá (Colombia)

nicolasforerol@usantotomas.edu.co

Deiver Saavedra Cotrina  <https://orcid.org/0000-0001-6720-8103>

Universidad Santo Tomas. Bogotá (Colombia)

deiversaavedra@usta.edu.co

I. Resumen

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en instituciones educativas representa una estrategia clave para avanzar hacia la sostenibilidad energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar la conciencia ambiental. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo estimar la eficiencia de producción y el impacto ambiental del sistema fotovoltaico del campus San Alberto Magno de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá, mediante un análisis comparativo entre la energía generada en condiciones reales y la energía potencial teórica. Para ello, se utilizaron datos históricos de generación eléctrica entre 2019 y 2022, junto con registros satelitales de irradiancia solar para la ubicación del campus. Con base en estos insumos, se estimó la producción teórica mensual bajo condiciones óptimas y se comparó con la generación real promedio. Adicionalmente, se calcularon las emisiones evitadas de dióxido de carbono (CO₂) aplicando el factor oficial de emisión del Sistema Interconectado Nacional (0,177 kgCO₂/kWh). Como resultado, se identificó una generación real promedio anual de 31.597,63 kWh frente a una generación teórica estimada de 44.954,97 kWh, lo que representa una eficiencia del 70,3 % y una diferencia de 2.364,24 kg de CO₂ que podrían haberse evitado. El análisis evidencia oportunidades de mejora en el aprovechamiento del sistema y destaca su potencial técnico y ambiental dentro de la estrategia institucional de sostenibilidad.

II. Palabras claves

Energía solar; Sistemas fotovoltaicos; Eficiencia energética; Huella de carbono; Energías renovables; Sustentabilidad; Instituciones educativas; Emisiones de CO₂; Transición energética.

III. Abstract

The implementation of photovoltaic solar systems in educational institutions represents a key strategy for advancing energy sustainability, reducing greenhouse gas emissions, and promoting environmental awareness. In this context, the objective of this study is to estimate the production efficiency and environmental impact of the photovoltaic system at the San Alberto Magno campus of Universidad Santo Tomás, Bogotá site, through a comparative analysis between actual energy generation and theoretical potential under optimal conditions. Historical electricity generation data from 2019 to 2022 were used, along with satellite-based solar irradiance records for the campus location. Based on this

information, monthly theoretical production was estimated and compared with the average actual generation. In addition, avoided carbon dioxide (CO₂) emissions were calculated using the official emission factor of the National Interconnected System (0.177 kgCO₂/kWh). The results showed an average actual annual generation of 31,597.63 kWh compared to an estimated theoretical generation of 44,954.97 kWh, representing a production efficiency of 70.3% and a difference of 2,364.24 kg of CO₂ that could have been avoided. The analysis highlights opportunities to improve the system's performance and emphasizes its technical and environmental potential as part of the institution's sustainability strategy.

IV. Key words:

Solar energy; Photovoltaic systems; Energy efficiency; Carbon footprint; Renewable energy; Sustainability; Educational institutions; CO₂ emissions.

V. Introducción

La transición hacia un modelo energético más sostenible y resiliente ha motivado a instituciones de todos los sectores a adoptar tecnologías basadas en fuentes renovables. En particular, el uso de sistemas fotovoltaicos ha cobrado protagonismo en el ámbito educativo, no solo como solución técnica para reducir el consumo de energía convencional, sino también como una herramienta didáctica que potencia el compromiso ambiental de la comunidad universitaria. En este contexto, la Universidad Santo Tomás ha apostado por la instalación de un sistema solar fotovoltaico en su campus San Alberto Magno, ubicado a una Latitud de 4,7903° y una Longitud de -74.055° como parte de su estrategia institucional de sostenibilidad.

Este tipo de sistemas ofrece múltiples beneficios. Desde una perspectiva técnica, permiten aprovechar el recurso solar para cubrir parte de la demanda eléctrica, reduciendo así la dependencia de fuentes convencionales. A nivel económico, representan una oportunidad de ahorro en el mediano y largo plazo, especialmente frente a los incrementos tarifarios y la volatilidad del mercado eléctrico. Desde el enfoque ambiental, contribuyen significativamente a la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), al sustituir electricidad generada con combustibles fósiles por energía limpia. Finalmente, en el plano pedagógico, su implementación dentro del campus genera oportunidades para integrar conocimientos reales a procesos académicos, fomentar proyectos de

investigación aplicada y fortalecer la conciencia ambiental entre los estudiantes.

No obstante, para garantizar que estos beneficios se materialicen, es necesario evaluar el comportamiento real del sistema frente a su potencial de diseño. Entender su eficiencia de producción (es decir, la proporción de energía efectivamente generada en comparación con la estimación teórica bajo condiciones ideales) permite identificar oportunidades de mejora y tomar decisiones fundamentadas sobre su gestión. Esta evaluación incluye, además, una estimación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que podrían evitarse mediante un mayor aprovechamiento del recurso solar disponible.

En este artículo se pretende analizar la eficiencia de producción del sistema fotovoltaico del campus San Alberto Magno de la Universidad Santo Tomás. A partir de la recopilación de datos históricos de generación eléctrica, registros satelitales de irradiancia solar y cálculos comparativos entre escenarios reales y teóricos, se busca determinar el nivel de aprovechamiento del sistema y su contribución ambiental.

VI. Marco Teórico

La energía solar fotovoltaica (FV) es una de las fuentes renovables más consolidadas mundialmente, por su capacidad para generar electricidad limpia con un recurso inagotable como la radiación solar. Este proceso se produce gracias al efecto fotovoltaico, fenómeno físico mediante el cual los fotones procedentes de la luz solar inciden sobre una célula de silicio, liberando electrones y generando una corriente eléctrica continua [1]. Esta corriente puede usarse directamente o, en muchos casos, almacenada en baterías o convertida en corriente alterna para usarse en sistemas eléctricos convencionales.

Los sistemas fotovoltaicos han evolucionado considerablemente en las últimas décadas, impulsados por avances tecnológicos, reducción de costos y el creciente interés por mitigar el cambio climático. Según datos del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, el precio promedio de los módulos fotovoltaicos ha disminuido más del 85 % desde 2010, lo que ha facilitado su implementación masiva tanto en sectores residenciales como institucionales [2].

Desde el punto de vista técnico, un sistema fotovoltaico está compuesto por módulos solares, inversores, estructuras de soporte, cableado y, en algunos casos, sistemas de almacenamiento. Estos componentes

pueden adaptarse a diversas escalas, lo que convierte a esta tecnología en una opción versátil para satisfacer las demandas energéticas de pequeños consumidores o grandes instalaciones [3].

Uno de los principales beneficios asociados al uso de la energía solar es la reducción de emisiones de GEI, especialmente dióxido de carbono (CO₂), lo cual contribuye directamente a los esfuerzos globales por descarbonizar el sector energético. Al generar electricidad a partir de un recurso limpio y abundante, se evita la quema de combustibles fósiles y, por ende, se disminuye la huella de carbono del usuario final [4].

A nivel institucional, especialmente en entornos académicos como las universidades, la implementación de sistemas fotovoltaicos representa una apuesta integral por la sostenibilidad. Estos sistemas no solo ofrecen una solución energética eficiente al cubrir parte de la demanda con una fuente renovable, sino que también se consolidan como herramientas pedagógicas y de concienciación ambiental. Su presencia en los campus permite visibilizar prácticas sostenibles, fomentar una cultura energética responsable entre estudiantes, docentes y personal administrativo, y facilitar el desarrollo de proyectos de investigación aplicada [5]. Además, los campus se transforman en laboratorios vivos donde convergen dimensiones técnicas, ambientales y sociales, fortaleciendo el vínculo entre teoría y práctica. Esta visión se alinea con compromisos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 7, que promueve la energía asequible y no contaminante, y el ODS 13, enfocado en la acción por el clima, ambos enmarcados en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas [6]. Varios estudios han demostrado que el uso de energía solar en entornos universitarios tiene efectos positivos tanto económicos como académicos. Desde el punto de vista financiero, su adopción conlleva una disminución progresiva de la dependencia de la red eléctrica convencional y, en consecuencia, una reducción de los costos por consumo. Aunque este trabajo no abordó directamente los aspectos económicos, se ha evidenciado en otras investigaciones que los ahorros acumulativos por autoconsumo pueden ser significativos en el largo plazo [7]. Desde el plano pedagógico, estos sistemas promueven el desarrollo de competencias clave en energías renovables, eficiencia energética, análisis de datos y monitoreo en tiempo real, enriqueciendo así los programas académicos en ingeniería, arquitectura y ciencias ambientales.

Desde la perspectiva del mantenimiento, los sistemas fotovoltaicos requieren cuidados relativamente simples en comparación con otras tecnologías energéticas. Su correcto funcionamiento depende de inspecciones periódicas, limpieza de módulos, revisión de conexiones eléctricas y verificación del estado de los inversores. Según estudios técnicos, un mantenimiento adecuado puede mejorar el rendimiento general hasta en un 10–15 % anual, evitando pérdidas innecesarias por degradación o suciedad [8].

Uno de los aspectos clave al evaluar el aporte ambiental de un sistema fotovoltaico es la huella de carbono. Esta se define como el conjunto total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), expresadas en dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$), generadas directa o indirectamente por una actividad o instalación [9]. En la generación eléctrica convencional, especialmente a partir de combustibles fósiles, la huella de carbono es alta, por procesos como la extracción, transporte y combustión de estos recursos. Por ejemplo, la generación con carbón puede emitir entre 800 y 1.000 gCO_2/kWh , mientras que la solar fotovoltaica tiene un impacto medio inferior a los 100 gCO_2/kWh durante su ciclo de vida completo [10].

El uso de energía solar en contextos institucionales no solo reduce estas emisiones, sino que también permite realizar cálculos comparativos entre escenarios reales y teóricos. Esto facilita la toma de decisiones informadas sobre el desempeño ambiental de los sistemas implementados. A través de métodos de análisis simplificados, como la aplicación de factores de emisión estándar (en este caso, 0,177 kgCO_2/kWh para el Sistema Interconectado Nacional colombiano [11]) es posible estimar cuántas emisiones se podrían evitar al cubrir cierta demanda energética con fuentes limpias.

Otro parámetro técnico fundamental para medir el desempeño de un sistema fotovoltaico es el Performance Ratio (PR). Este indicador compara la energía efectivamente generada por el sistema con la energía que se habría generado en condiciones ideales, considerando la irradiancia disponible. El PR tiene en cuenta todas las pérdidas del sistema (por temperatura, sombras, suciedad, inversores, cableado, etc.), y permite identificar de forma objetiva si el sistema está funcionando correctamente. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA) y el Fraunhofer ISE, un PR superior al 80 % se considera óptimo; entre 75 % y 90 %, aceptable; entre 50 % y 75 %, subóptimo; y por debajo del 50 %, se interpreta como un

funcionamiento deficiente o con fallas operativas significativas [12].

La evaluación conjunta de la huella de carbono evitada y el PR permite establecer la eficiencia técnica del sistema y su impacto ambiental real, fundamental para estrategias de gestión energética y cumplimiento de políticas de sostenibilidad institucional.

VII. Metodología

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y descriptivo, orientado a estimar el comportamiento energético y ambiental del sistema fotovoltaico del campus San Alberto Magno de la Universidad Santo Tomás sede Bogotá, a partir del análisis comparativo entre la generación real registrada y el potencial energético teórico bajo condiciones ideales conocido como Performance Ratio (PR). Este enfoque permitió integrar datos históricos, herramientas de estimación y procedimientos de cálculo técnico para representar de forma precisa el desempeño del sistema.

Inicialmente, se solicitó a la institución la base de datos correspondiente a la generación eléctrica del sistema. La información suministrada abarcó el periodo de 2019 a 2022 ya que la universidad no contaba con más registros a la fecha; sin embargo, se identificó una discontinuidad en los datos del año 2022, con registros únicamente hasta abril, lo que generó la necesidad de complementar dicha información.

Adicionalmente, se emplearon datos complementarios obtenidos de la base satelital POWER Data Access Viewer de la NASA [13], los cuales proporcionan valores históricos de irradiancia solar para la ubicación geográfica del campus. Esta fuente permite obtener estimaciones confiables de radiación diaria media mensual, útiles para determinar la energía solar disponible con fines comparativos y de simulación.

A partir de estos datos, se estimó la generación teórica potencial mensual bajo condiciones óptimas, considerando una inclinación de aproximadamente 20° (equivalente a la irradiancia para una inclinación de latitud más 15°) resultado del análisis de los datos de irradiancia para diferentes inclinaciones de paneles solares obtenidos para la ubicación del sistema fotovoltaico, además, se tuvo en cuenta una eficiencia promedio del 85 % dado que fue el porcentaje utilizado en el diseño original de la instalación y una potencia pico total por panel de 0,32 kW [14]. La fórmula empleada fue la siguiente:

$$E_{dr} = N * n_{panel} * HSPs * P_{ppanel} \quad (1)$$

En donde:

- E_{dr} = Energía diaria consumida en kWh/día.
- N = número total de paneles.
- n_{panel} = Rendimiento medio del panel (0,85).
- $HSPs$ = Horas pico solar para un ángulo de inclinación óptimo de 20° en cada mes del año.
- P_{ppanel} = Potencia pico del panel en kW, según los datos brindados por la universidad (0,32 kW)

Posteriormente, se multiplicó la energía diaria estimada por la cantidad de días de cada mes, obteniendo así la generación mensual total teórica. Este valor se utilizó como línea base para comparar con los registros reales entregados por la universidad y calcular la diferencia energética neta mensual entre lo generado y lo estimado bajo condiciones óptimas.

Dado que los registros reales del año 2022 no estaban completos, se aplicó un método de reconstrucción de datos faltantes. Para ello, se promediaron los valores reales correspondientes a los mismos meses de los años 2019, 2020 y 2021, considerando que estos mostraban una tendencia estable y representativa en cuanto al comportamiento energético mensual. Este promedio se usó para completar los valores faltantes de mayo a diciembre de 2022. Los datos consolidados permitieron estimar el volumen de energía generado en ese año con una base metodológica consistente.

Además, para calcular la eficiencia del sistema se tomaron en cuenta los datos anteriores y la siguiente fórmula.

$$PR = \left(\frac{\text{Generación real}}{\text{Generación teórica}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

En donde se categorizó el rendimiento de acuerdo con los siguientes requisitos tomados de la IEA [12]

- Eficiencia < 50 %: Rendimiento deficiente o fallas operativas.
- Eficiencia 50–75 %: Funcionamiento limitado o subóptimo.
- Eficiencia 75–90 %: Rendimiento aceptable o bueno.

- Eficiencia > 90 %: Rendimiento óptimo o muy cercano al máximo esperado.

Para el cálculo de la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se tomaron en cuenta los datos de generación de energía y el factor de emisión tomado de la Resolución 1198 de 2024[11].

$$Emisiones = E * F \quad (3)$$

En donde:

- E = Generación de energía en kWh
- F = Factor de emisión (0,177 kg CO₂/kWh)

Este valor permitió estimar las emisiones de CO₂ correspondientes a la energía generada, sirviendo como indicador ambiental para evaluar el impacto del sistema desde una perspectiva simplificada.

Posteriormente, se estimó la reducción de emisiones de carbono equivalente correspondiente a la generación teórica estimada bajo condiciones ideales, utilizando los mismos criterios aplicados al escenario real. Por último, se realizó una comparación entre ambos resultados con el fin de identificar la diferencia en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que permitió dimensionar el potencial de mitigación del sistema en caso de alcanzar un funcionamiento óptimo sostenido.

VIII. Resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la información suministrada por la Universidad Santo Tomás, correspondiente a los registros históricos de generación eléctrica del sistema solar fotovoltaico ubicado en el campus San Alberto Magno. Los datos abarcan los años 2019, 2020 y 2021, así como los primeros meses del año 2022.

Generación sistema fotovoltaico mensual/anual - kWh

MES	2019	2020	2021	2022 (Parcial)
ENE	1271,1	3279,9	3292,5	2493,7
FEB	2857,4	3019,3	2659,8	2372,5
MAR	2771,6	2763,8	2275,6	2584,5
ABR	2843,5	2617,6	2738,1	2255,1
MAY	2834	2353,6	2955,8	-
JUN	2425,9	2597,4	2818,4	-
JUL	2839,6	2533,1	2903	-

AGO	2816,1	2701,2	2666,1	-
SEPT	2495,2	2724,3	2564,9	-
OCT	2634,8	2600,1	2506,1	-
NOV	2570,5	2270,9	2594,4	-
DIC	2298,5	2760,3	2756,7	-
TOTAL	30658,2	32221,5	32731,4	9705,8

Tabla. 1 generación sistema fotovoltaico. Fuente Universidad Santo Tomas

En la Tabla 1 se presenta la cantidad de energía generada mensualmente por el sistema fotovoltaico durante el periodo comprendido entre 2019 y 2022. Los datos evidencian un comportamiento de generación estable en los años 2019, 2020 y 2021, con registros consistentes a lo largo de cada año. En contraste, para el año 2022 se dispone de registros solo para enero–abril; el total (9705,8 kWh) corresponde a un periodo parcial y no es directamente comparable con 2019–2021. Los valores estimados de mayo–diciembre de 2022, calculados mediante promedio simple de los mismos meses en 2019–2021, se presentan en la Tabla 6, con un total anual estimado de 30779,4 kWh.

Generación sistema fotovoltaico diario/mensual - kWh

MES	2019	2020	2021	2022
ENE	41,00	105,80	106,21	80,44
FEB	102,05	104,11	94,99	76,53
MAR	89,41	89,15	73,41	83,37
ABR	94,78	87,25	91,27	72,75
MAY	91,42	75,92	95,35	-
JUN	80,86	86,58	93,95	-
JUL	91,60	81,71	93,65	-
AGO	90,84	87,14	86,00	-
SEPT	83,17	90,81	85,50	-
OCT	84,99	83,87	80,84	-
NOV	85,68	75,70	86,48	-
DIC	74,15	89,04	88,93	-
Total	1009,96	1057,10	1076,5	313,09

Tabla. 2 generación sistema fotovoltaico diaria/mensual. Fuente Autores

La Tabla 2 complementa esta información al mostrar el promedio diario de energía generada en cada mes. Este enfoque permite evaluar la eficiencia diaria del sistema, y hace más visible la disminución progresiva o la ausencia de generación en determinados periodos. En los años

iniciales (2019–2021), los promedios diarios se mantuvieron entre 70 y 106 kWh/día, reflejando un funcionamiento regular. Sin embargo, en 2022 se observa una disminución considerable en la generación total, con varios meses sin datos registrados. Esto impide determinar si las reducciones corresponden a una baja en la producción real o a la ausencia de registros en esos periodos, lo cual marca una diferencia notable frente a la tendencia de los años anteriores.

Posteriormente, con base en los registros de irradiación solar para la ubicación del campus y las características técnicas del sistema fotovoltaico, se estimó la generación teórica diaria bajo condiciones ideales. Para este cálculo se consideró un total de 108 paneles, un rendimiento medio de 0,85, una potencia pico por panel de 0,32 kW y las horas solares pico correspondientes a una inclinación aproximada de 20°. Los valores de irradiación mensual promedio utilizados se muestran en la siguiente tabla.

Irradiación promedio mensual de los años 2019-2022 (kWh/m² día)

MES	Irradiación promedio mensual de los años 2019-2022
ENE	4,98
FEB	4,4
MAR	3,66
ABR	3,84
MAY	3,79
JUN	3,79
JUL	3,93
AGO	4,08
SEPT	4,43
OCT	4,39
NOV	4,33
DIC	4,7

Tabla 3. Irradiación promedio mensual de los años 2019-2022 Fuente: NASA

Estos valores se integraron en la fórmula (1) empleada para estimar la energía diaria generada en condiciones ideales (E_{dr}), por ejemplo, para el mes de enero, con una irradiación promedio de 4,98 horas pico solares, el cálculo fue:

$$E_{dr} = 108 \cdot 0,85 \cdot 0,32kW \cdot 4,98h/día = 146,29 \frac{kWh}{día} \quad (1)$$

Este procedimiento se repitió para cada uno de los 12 meses del año, utilizando las horas solares pico correspondientes a cada periodo. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Promedio diario de generación por mes (kWh/día)

MES	PROMEDIO DIARIO DE GENERACIÓN POR MES 2019-2022
ENE	146,29
FEB	129,25
MAR	107,52
ABR	112,80
MAY	111,34
JUN	111,34
JUL	115,45
AGO	119,85
SEPT	130,14
OCT	128,96
NOV	127,20
DIC	138,07

Tabla 4. Promedio diario de generación por mes (kWh/día)
Fuente: Autores

Para finalmente, conocer la generación mensual se multiplica cada dato anterior por los días correspondientes a cada mes como se muestra a continuación.

Generación mensual teórica estimada (kWh/mes)

MES	GENERACIÓN TEÓRICA ESTIMADA (2019 – 2022)
ENE	4535,07
FEB	3619,12
MAR	3333,00
ABR	3384,12
MAY	3451,39
JUN	3340,05
JUL	3578,88
AGO	3715,48
SEPT	3904,07
OCT	3997,78
NOV	3815,94
DIC	4280,08

TOTAL	44954,97
-------	----------

Tabla. 5 generación mensual teórica estimada.
Fuente: Autores

A partir de esta información, se calculó el potencial energético que el sistema alcanzaría en condiciones ideales de operación, sin interrupciones técnicas, fallos de conexión o falta de mantenimiento. Esta línea base permitió estimar el potencial energético mensual bajo condiciones óptimas de operación.

Los meses con mayor potencial energético estimado son enero (4535,07 kWh), diciembre (4280,08 kWh) y octubre (3997,78 kWh), mientras que los menores se registran en marzo (3333 kWh), abril (3384,12 kWh) y junio (3340,05 kWh). Estas variaciones reflejan comportamientos estacionales comunes de irradiancia solar en la región, que, en general, ofrecen un contexto favorable para la producción de energía renovable.

Para dar continuidad al análisis de eficiencia mensual del sistema y al cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente, fue necesario reconstruir los datos faltantes correspondientes a los meses de mayo a diciembre del año 2022. A fin de completar los datos faltantes de mayo a diciembre de 2022, se calculó un promedio simple de la generación registrada en esos mismos meses durante 2019, 2020 y 2021. Por ejemplo, para mayo se promediaron 2834 kWh (2019), 2353,6 kWh (2020) y 2955,8 kWh (2021), obteniendo un valor de 2714,5 kWh para 2022. Este mismo procedimiento se aplicó a cada uno de los meses sin registro, conformando la serie presentada a continuación.

Completado de datos de generación mensual anual para el año 2022

MES	2019	2020	2021	2022
ENE	1271,1	3279,9	3292,5	2493,7
FEB	2857,4	3019,3	2659,8	2372,5
MAR	2771,6	2763,8	2275,6	2584,5
ABR	2843,5	2617,6	2738,1	2255,1
MAY	2834	2353,6	2955,8	2714,5
JUN	2425,9	2597,4	2818,4	2613,9
JUL	2839,6	2533,1	2903	2758,6
AGO	2816,1	2701,2	2666,1	2727,8
SEPT	2495,2	2724,3	2564,9	2594,8
OCT	2634,8	2600,1	2506,1	2580,3
NOV	2570,5	2270,9	2594,4	2478,6

DIC	2298,5	2760,3	2756,7	2605,2
TOTAL	30658,2	32221,5	32731,4	30779,4

Tabla. 6 completado de datos de generación mensual anual para el año 2022 Fuente: Autores

Además, se calculó un promedio mensual consolidado para cada doce meses del año, tomando como referencia los valores registrados entre 2019 y 2022. Para cada mes se promediaron los datos correspondientes de los cuatro años analizados, para construir una línea base representativa del comportamiento energético típico del sistema. Esta referencia permitió establecer comparaciones directas con los valores teóricos estimados y con la generación observada en 2022, lo cual facilitó identificar la diferencia en la generación de energía mes a mes, así como calcular el porcentaje de eficiencia del sistema respecto a su potencial teórico como se ve en la siguiente tabla.

Generación teórica Vs Generación real (periodo 2019 – 2022)

MES	Generación Teórica (kWh/día)	Generación Real (kWh/día)	Diferencia	Desempeño (PR)
ENE	4535,07	2584,3	1950,77	Rendimiento medio (57 %)
FEB	3619,12	2727,3	891,87	Rendimiento aceptable (75 %)
MAR	3333,00	2598,9	734,13	Rendimiento aceptable (78 %)
ABR	3384,12	2613,6	770,54	Rendimiento aceptable (77%)
MAY	3451,39	2714,5	736,92	Rendimiento aceptable (79%)
JUN	3340,05	2613,9	726,15	Rendimiento aceptable (78%)
JUL	3578,88	2758,6	820,31	Rendimiento aceptable (77%)
AGO	3715,48	2727,8	987,68	Rendimiento medio (73%)
SEP	3904,07	2594,8	1309,27	Rendimiento medio (66%)
OCT	3997,78	2580,3	1417,45	Rendimiento medio (65%)

NOV	3815,94	2478,6	1337,34	Rendimiento medio (65%)
DIC	4280,08	2605,2	1674,92	Rendimiento medio (61%)

Tabla. 7 generación teórica Vs generación real (periodo 2019 – 2022). Fuente: Autores

En general, los resultados muestran una eficiencia variable a lo largo del año, con meses que se aproximan a niveles aceptables, mientras que otros presentan un desempeño medio.

Los meses con mayor eficiencia se encuentran entre febrero y julio con eficiencias que oscilan entre 75 % y 79 %. Estos valores sugieren un comportamiento favorable del sistema en ese periodo. Por otro lado, enero (57 %) y diciembre (61 %) registran los porcentajes más bajos del año, indicando una menor correspondencia con el potencial teórico.

Estas variaciones pueden deberse a múltiples factores, como cambios estacionales en la irradiancia, pérdidas por temperatura, acumulación de polvo o suciedad en los módulos, o incluso desajustes técnicos menores. En conjunto, los resultados evidencian un comportamiento funcional del sistema, aunque con márgenes de mejora en la eficiencia operativa mensual.

A continuación, se realizó el cálculo de la generación anual promedio tanto para el escenario teórico como para el real, a partir de la sumatoria de los valores mensuales promedios en cada caso, como se evidencia en la siguiente tabla.

Generación promedio anual teórico vs promedio anual real kWh

	Generación teórica	Generación real
Generación de energía promedio en el periodo 2019 - 2022	44954,97	31597,63
Diferencia	13360,34	

Tabla. 8 generación promedio anual teórico vs promedio anual real Fuente: Autores

Finalmente, teniendo en cuenta los valores de generación previamente estimados, se procedió al cálculo de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂) asociadas a cada escenario. En primer lugar, se estimaron las emisiones correspondientes a la generación teórica bajo condiciones ideales, y

posteriormente se calcularon las emisiones reales promedio-registradas entre 2019 y 2022, como se puede observar a continuación

$$\text{Emisiones evitadas (teoría)} = 44.954,97 \text{ kWh} \times 0,177 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 7957,02 \text{ kgCO}_2 \text{ (2)}$$

$$\text{Emisiones evitadas (real)} = 31597,637 \text{ kWh} \times 0,177 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 5592,78 \text{ kgCO}_2 \text{ (2)}$$

A partir del cálculo de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂) para los dos escenarios evaluados, se evidencia una diferencia considerable en el potencial de mitigación ambiental del sistema fotovoltaico. Bajo condiciones ideales (suponiendo que el sistema opera de manera continua, sin fallas técnicas, con los módulos en buen estado y sin interrupciones en el registro de datos), la generación estimada habría evitado un total de 7957,02 kg de CO₂ anuales, mientras que con la generación real promedio registrada entre 2019 y 2022, las emisiones evitadas fueron de 5592,78 kg de CO₂.

En el caso colombiano, la electricidad del Sistema Interconectado Nacional (SIN) proviene principalmente de hidroeléctricas a gran escala, gracias a la abundancia de agua en la mayoría de las zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles como: petróleo, gas y carbón, que generan dióxido de carbono (CO₂) por la combustión de combustibles fósiles. Por ello, la UPME establece un factor oficial de emisión de 0,177 kg CO₂/kWh [11], el cual representa la huella de carbono promedio de cada kilovatio-hora consumido de la red. Así, cada kWh generado con energía solar desplaza un kWh de esta mezcla eléctrica, evitando directamente las emisiones asociadas al consumo convencional.

Esta diferencia de aproximadamente 2364,24 kg de CO₂ pone en evidencia el margen de mejora existente en el aprovechamiento del sistema. Si se logra alcanzar el nivel de producción teórica, el impacto ambiental positivo se incrementaría sustancialmente, reflejando una mayor contribución a los objetivos de sostenibilidad institucional. Además, esta brecha representa una oportunidad para optimizar la eficiencia del sistema y maximizar su efecto en la reducción de gases de efecto invernadero.

IX. Conclusiones

- El análisis comparativo entre la generación real y la teórica evidenció que el sistema fotovoltaico del campus San Alberto Magno alcanza un nivel de eficiencia del 70,3 %. Este desempeño refleja que el sistema funciona de manera adecuada, aunque con un margen de mejora importante que puede lograrse mediante acciones de mantenimiento y optimización operativa.

- La diferencia energética calculada representó más de 13.000 kWh anuales no aprovechados, lo cual implicó una oportunidad perdida en términos de reducción de emisiones. Si se alcanzara el rendimiento estimado, se podrían evitar aproximadamente 2.364 kg de CO₂ anuales.
- La implementación de acciones correctivas como el monitoreo constante, mantenimientos preventivos y estrategias de seguimiento técnico permitiría aumentar la eficiencia del sistema y maximizar los beneficios ambientales asociados a la generación limpia.
- Además de los beneficios energéticos y ambientales, el sistema representa una oportunidad formativa dentro del entorno universitario, ya que permite integrar prácticas reales a los procesos académicos, generar datos aplicables a la investigación y sensibilizar a la comunidad educativa sobre el uso responsable de la energía.
- Finalmente, los resultados de este estudio demuestran la relevancia de realizar seguimientos periódicos al rendimiento de los sistemas fotovoltaicos instalados, no solo para garantizar su eficiencia técnica, sino también para asegurar su impacto positivo en la reducción de la huella de carbono institucional.

X. Financiamiento

Artículo de investigación científica derivado del trabajo desarrollado en el semillero de investigación (Biotecnología, Energía y Ambiente - BEA) de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá. El proyecto se realizó por iniciativa académica propia, sin financiación externa institucional o de terceros. Contó con el acompañamiento del docente investigador Deiver Saavedra Cotrina, como parte del proceso de formación en investigación dentro del pregrado en Ingeniería Ambiental. Año de inicio: 2024. Año de finalización: 2025.

XI. Agradecimientos

- Yo Juan Esteban Burbano agradezco de todo corazón a mi mamá, por ser mi mayor apoyo, guía y motivación constante en cada paso que doy. También a mi querido Locky, mi fiel compañero felino, por estar siempre presente con su ternura en los momentos de estrés y darme paz con su compañía. Extiendo mi gratitud a mis familiares y amigos, quienes con su ánimo, consejos y cariño hicieron posible que este trabajo llegara a buen término, y a mis profesores, por compartir sus conocimientos y acompañarme en este proceso de aprendizaje.

- Yo Nicolas Forero agradezco con todo mi corazón a mi familia, por ser el refugio al que siempre puedo volver, por su amor incondicional, por sostenerme en los días difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño logro. A todas las personas que estuvieron presentes en este camino, incluso si ya no siguen, gracias también; porque cada conversación, cada gesto, cada momento compartido dejó una huella que forma parte de lo que soy hoy. A los que aún caminan a mi lado, gracias por no soltarme, por creer en mí incluso en mis dudas, por estar sin condiciones. A mis profesores, quienes más allá de lo académico dejaron enseñanzas que marcaron mi vida: gracias por cada palabra exigente, cada guía silenciosa y cada espacio de aprendizaje. Todos ustedes, de una u otra forma, construyeron conmigo este trayecto. Este logro no me pertenece solo a mí; es también de quienes, con su presencia o su recuerdo, ayudaron a que hoy esté aquí.

XII. Referencias

[1] Iberdrola, “¿Qué es la energía solar y cómo funciona?”, Iberdrola, 2023. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica>. [Accessed: Apr. 10, 2025].

[2] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, “Photovoltaics Report,” Fraunhofer ISE, 2023. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>. [Accessed: Apr. 18, 2025].

[3] SMA Solar Technology, “Performance Ratio,” Sunny Portal Manual, 2011. [Online]. Available: <https://manuals.sma.de/SPortal/en-US/1073615883.html>. [Accessed: Apr. 25, 2025].

[4] Enchufe Solar, “Ventajas de la energía solar,” Enchufesolar.com, 2023. [Online]. Available: <https://enchufesolar.com/blog/ventajas-solar-fotovoltaica/>. [Accessed: May 02, 2025].

[5] Eden Global Solutions, “Energía solar en universidades: beneficios ambientales y económicos,” Eden Global, 2023. [Online]. Available: <https://www.edenglobalsolutions.com/energia-solar-universidades/>. [Accessed: May 09, 2025].

[6] United Nations, “Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante,” United Nations Sustainable Development, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>. [Accessed: May 16, 2025].

[7] M. Martínez-López, F. J. Martín-Álvarez, and D. Campa-Planas, “Las energías renovables como herramienta de desarrollo sostenible en universidades,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 5, pp. 184–191, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9776474.pdf>. [Accessed: May 22, 2025].

[8] Greening-e, “El mantenimiento de los paneles solares es clave para que funcionen mejor y más tiempo,” Greening-e, 2023. [Online]. Available: <https://greening-e.com/el-mantenimiento-de-los-paneles-solares-es-clave-para-que-funcionen-mejor-y-mas-tiempo/>. [Accessed: May 29, 2025].

[9] L. Muñoz Merodio, Propuesta de guía para el cálculo de la huella de carbono - alcance 3, según norma UNE-EN-ISO 14064:2019. Adaptación a la Universidad Politécnica de Madrid, M.S. thesis, E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2023. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/75528/>. [Accessed: Jun. 05, 2025].

[10] International Energy Agency (IEA), “Carbon emissions from electricity generation,” IEA Data Explorer, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>. [Accessed: Jun. 12, 2025].

[11] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Resolución No. 1198 de 2024 – Actualización del factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional 2023 para inventarios de emisiones de GEI y proyectos de mitigación, Bogotá D.C., Colombia, Dec. 26, 2024. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_1198_2024.htm. [Accessed: Jun. 18, 2025].

[12] SMA Solar Technology AG, El rendimiento energético (Performance Ratio) como parámetro para la comparación de plantas FV, Niestetal, Alemania: SMA Solar Technology AG, 2011. [Online]. Available: <https://www.sma.de>. [Accessed: Jun. 25, 2025].

[13] NASA Langley Research Center, “POWER Data Access Viewer,” Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), NASA, 2023. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>. [Accessed: Jun. 30, 2025].

[14] Universidad Santo Tomás, “Campus San Alberto Magno de la USTA, uno de los más sostenibles del país,” Portal USTA, Mar. 18, 2019. [Online]. Available: <https://antiguoportal.usta.edu.co/index.php/tomas-noticias/noticias-de-la-semana/item/4705-campus-san-alberto-magno-de-la-usta,-uno-de-los-mas-sostenibles-del-pa%C3%ADs>. [Accessed: Jul. 08, 2025].