

# Evaluación de la eficiencia óptico-operativa de sistemas fotovoltaicos con concentración (LCPV) basados en lentes de Fresnel para entornos turísticos insulares: El caso de Cozumel

## Evaluation of the Optical-Operational Efficiency of Concentrated Photovoltaic Systems (LCPV) Based on Fresnel Lenses for Island Tourist Environments: The Case of Cozumel

Josué Vázquez C.<sup>1</sup>, Javier Vázquez C.<sup>1</sup>, Jorge Ovidio A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, División de Desarrollo Sustentable.

Autor de correspondencia: [josue.vazquez@hotmail.com](mailto:josue.vazquez@hotmail.com)

### Resumen

La transición energética en destinos insulares como Cozumel exige soluciones que optimicen la infraestructura fotovoltaica existente sin incurrir en costos masivos de sustitución. Este trabajo analiza el desempeño de un sistema de concentración solar de baja potencia (LCPV) diseñado como un *retrofit* basado en lentes de Fresnel. Mediante simulaciones de trazado de rayos y el uso de datos climáticos locales, se evaluó la ganancia óptica y el comportamiento térmico de las celdas bajo condiciones de radiación real. Los resultados indican que, a pesar de la variabilidad climática de la zona, el uso de concentradores incrementa la densidad de potencia incidente, mejorando la eficiencia operativa del sistema. Este estudio aporta una base técnica para la modernización de sistemas solares en el sector turístico, validando la viabilidad de adaptar tecnologías de concentración en entornos de alta salinidad y espacio limitado.

**Palabras clave:** Concentración solar, Lentes de Fresnel, Retrofit fotovoltaico, Cozumel, Eficiencia óptica, Sustentabilidad turística.

### Abstract

Energy transition in island tourist destinations such as Cozumel requires solutions that optimize existing photovoltaic infrastructure without massive replacement costs. This paper analyzes the performance of a Low-Concentration Photovoltaic (LCPV) system designed as a retrofit based on Fresnel lenses. Through ray-tracing simulations and local climate data, the optical gain and thermal behavior of the cells were evaluated under real radiation conditions. The results indicate that, despite local climate variability, the use of concentrators increases the incident power density, improving the system's operational efficiency. This study provides a technical basis for the modernization of solar systems in the tourism sector, validating the feasibility of adapting concentration technologies in high-salinity and space-constrained environments.

**Keywords:** Solar concentration, Fresnel lenses, PV retrofit, Cozumel, Optical efficiency, Tourism sustainability.

**Recibido:** 27/02/2026; **Aceptado:** 07/04/2026; **Publicado** 30/04/2026

## Introducción

La infraestructura energética en entornos insulares enfrenta retos críticos debido al aislamiento geográfico y la fragilidad de sus ecosistemas. En Cozumel, el principal motor económico es el turismo de cruceros y hotelería, sectores cuya competitividad depende directamente de un suministro eléctrico costoso y con una alta huella de carbono. Ante la limitada disponibilidad de espacio para grandes granjas solares en la isla, surge la necesidad de optimizar las instalaciones fotovoltaicas ya existentes mediante tecnologías que permitan elevar la densidad de potencia sin expandir el área de captación.

El crecimiento sostenido de la infraestructura turística ha intensificado la presión sobre los sistemas eléctricos convencionales, incrementando tanto los costos operativos como las emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario, si bien la energía solar fotovoltaica se posiciona como la alternativa más viable para mitigar impactos ambientales en el Caribe, su implementación masiva se ve frenada por la baja densidad energética de los módulos comerciales frente a la alta demanda de los complejos hoteleros.

Esta eficiencia operativa está condicionada no solo por la tecnología de la celda, sino por la irradiancia disponible y la gestión térmica del arreglo. Frente a estas limitaciones, los sistemas de concentración solar de baja escala (LCPV) emergen como una solución técnica capaz de intensificar la radiación incidente sin ampliar el área de instalación. No obstante, su viabilidad en entornos tropicales depende críticamente de la capacidad de respuesta ante la radiación difusa y la intermitencia nubosa propia de la región.

A pesar de los avances en tecnología fotovoltaica, la implementación de sistemas de concentración en zonas tropicales enfrenta retos específicos de nubosidad y gestión térmica. Por ello, el objetivo principal de esta investigación es evaluar la eficiencia óptico-operativa de un diseño de lente de Fresnel concebido como un Retrofit para módulos fotovoltaicos convencionales.

Se busca determinar si la adaptación de estos concentradores es técnicamente viable en Cozumel, considerando el recurso solar local y la necesidad de elevar la densidad de potencia en instalaciones con restricciones de área, como las del sector hotelero.

## Fundamentación Teórica

La concentración solar consiste en dirigir y amplificar la radiación solar incidente hacia una superficie reducida mediante dispositivos ópticos. Entre estos, los lentes de Fresnel destacan por su bajo peso, menor consumo de material y capacidad de concentración adecuada para aplicaciones de baja y media escala.

En sistemas fotovoltaicos de baja concentración (LCPV), la literatura ha señalado que el análisis del desempeño debe considerar no solo la eficiencia nominal del módulo, sino el comportamiento integral del sistema bajo condiciones reales de operación, incorporando efectos ópticos, eléctricos y térmicos [1], [2]. Asimismo, variables ambientales como irradiancia y temperatura influyen directamente en el rendimiento eléctrico del módulo [3], lo que refuerza la necesidad de métricas de evaluación a nivel sistema.

El principio óptico de los lentes de Fresnel se basa en la refracción de la radiación a través de anillos concéntricos que reproducen el comportamiento de una lente convencional de mayor espesor, permitiendo concentrar la fracción directa de la radiación solar sobre una superficie objetivo.

## Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo-positivista con diseño no experimental de tipo descriptivo y comparativo, orientado a evaluar el desempeño energético de un sistema fotovoltaico convencional acoplado a un concentrador solar de baja escala.

### A. Caracterización del recurso solar

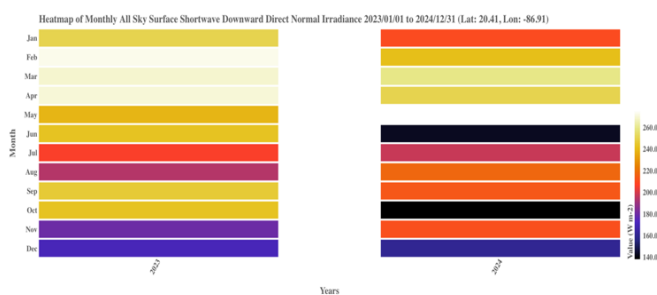


Figura 1. Distribución mensual de la irradiancia directa normal promedio bajo condiciones de cielo real para la isla de Cozumel 2023 y 2024. Fuente NASA POWER datos CERES SYN1deg Ed. 4.1.

El recurso solar fue caracterizado mediante datos de irradiancia directa normal (DNI) obtenidos de la base NASA POWER (CERES SYN1deg Ed. 4.1) para el periodo 2023–2024. Se consideraron rangos mensuales entre 140 y 260  $W/m^2$  bajo

condiciones All Sky, permitiendo definir escenarios coservadores, promedio y favorables.

La selección de DNI, Tabla 1, como variable principal responde a la naturaleza óptica del sistema de concentración, que aprovecha exclusivamente la fracción directa del recurso solar.

Tabla 1. Condiciones climáticas del sitio y variables empleadas en la simulación energética.

Parámetro climático	Rango representativo	Unidad	Variabl e en modelo	Aplicación en simulación
Irradiancia global horizontal (GHI)	5.0–6.8	$kWh/m^2 \cdot día$	G	Definición de escenarios energéticos anuales
Irradiancia directa normal (DNI)	140–260	$W/m^2$	DNI	Evaluación de concentración solar
Irradiancia instantánea	600–1000	$W/m^2$	G	Cálculo de potencia eléctrica instantánea
Temperatura ambiente promedio	25–30	$^{\circ}C$	$T_{amb}$	Estimación de temperatura operativa del módulo
Temperatura máxima típica	30–33	$^{\circ}C$	$T_{mod}$ (estimada)	Evaluación de pérdidas térmicas
Humedad relativa promedio	60–80	%	Parámetro ambiental	Consideraciones de operación en ambiente marino
Tipo climático	Tropical costero	—	Condición frontera	Representatividad del contexto insular

### B. Parámetros climáticos

Tabla 2. Valores promedio mensual de DNI.

Parámetro climático	Rango observado	Unidad	Uso en simulación
DNI mensual promedio	140–260	$W/m^2$	Definición de escenarios de radiación directa
Meses de alta DNI	Mar–Jun	—	Evaluación de desempeño máximo
Meses de menor DNI	Jul–Oct	—	Evaluación de comportamiento conservador
Variación interanual	Baja	—	Validación de estabilidad del recurso

Aunque los rangos de irradiancia directa normal (DNI) identificados ( $140–260 W/m^2$ ) se sitúan por debajo de los umbrales típicos para sistemas de concentración comercial de alta potencia, Tabla 2, esta investigación propone el uso de Sistemas de Baja Concentración (LCPV) diseñados específicamente para operar con recursos marginales.

### C. Análisis comparativo de distribución de rayos y densidad de flujo

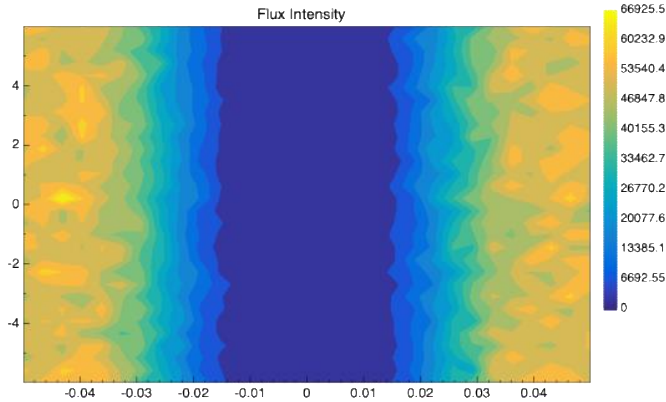


Figura 2. Análisis comparativo- Stage 1 Fuente: Elaboración propia.

Para la evaluación del comportamiento óptico, se empleó el software SolTrace (v. 3.4.0), desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL). Mediante el método de trazado de rayos de Monte Carlo, se modeló la interacción de la radiación directa con la geometría de la lente de Fresnel. Se configuraron las propiedades ópticas del material (transmitancia y error de pendiente) para determinar la distribución de flujo sobre la superficie de la celda y calcular la ganancia óptica.

En una primera etapa (Stage 1), se observó una distribución de flujo preliminar con un pico de intensidad de  $66,925 \text{ W/m}^2$ . Tras optimizar los parámetros de la lente y la distancia focal (configuración Stage 2), se logró un incremento sustancial en la precisión del enfoque, alcanzando una intensidad de flujo máxima de  $262,810 \text{ W/m}^2$ . Esta versión optimizada demuestra una mayor densidad energética en el área central de la celda.

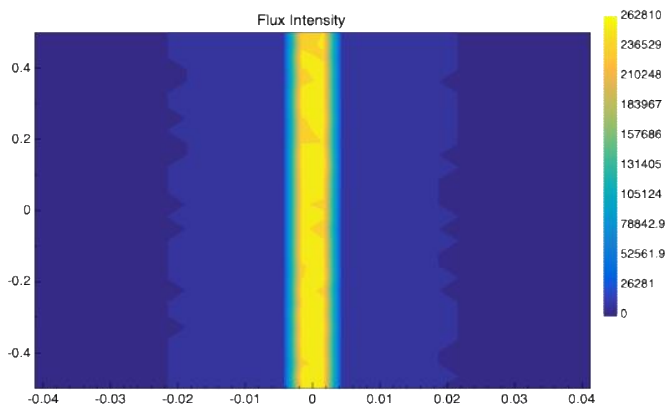


Figura 2. Análisis comparativo- Stage 2 Fuente: Elaboración propia.

La transición entre ambos modelos evidencia que el diseño de la lente de Fresnel como retrofit es altamente sensible a la precisión geométrica, permitiendo maximizar el recurso DNI disponible en Cozumel.

A diferencia de los sistemas convencionales, el diseño evaluado mediante SolTrace emplea una configuración óptica de alta precisión con un error de pendiente de  $0.95 \text{ mrad}$ . Esta capacidad permite que el concentrador actúe como un multiplicador de la densidad de flujo, transformando el recurso disponible en una intensidad máxima de hasta  $262,810 \text{ W/m}^2$  en el área focal. Por lo tanto, el sistema no busca elevar la DNI del sitio, sino maximizar la eficiencia óptico-operativa ( $\eta_{op}$ ) para compensar la baja irradiancia directa característica de los entornos tropicales e insulares como Cozumel.

### D. Definición de la eficiencia óptico-operativa ( $\eta_{op}$ )

Para evaluar el desempeño energético del sistema de manera integral, se definió una eficiencia óptico-operativa a nivel sistema:

La ganancia óptica se estima por (1)

$$G_p = \left( \frac{P_{LCPV} - P_{conv}}{P_{conv}} \right) \times 100. \quad (1)$$

Donde:

$G_p$ : Ganancia porcentual de energía del sistema (%);

$P_{LCPV}$ : Potencia eléctrica proyectada ( $W$  ó  $kWh$ );

$P_{conv}$ : Potencia eléctrica del sistema ( $W$  ó  $kWh$ );

La eficiencia del dispositivo (2)

$$\eta_{opt} = \frac{\Phi_{rec}}{\Phi_{inc}} \quad (2)$$

Donde:

$\eta_{opt}$ : Eficiencia óptica del concentrador;

$\Phi_{rec}$ : Flujo radiante o número de rayos que alcanzan la superficie de la celda ( $W$ );

$\Phi_{inc}$ : Flujo radiante total que incide sobre la superficie de apertura de la Lente de Fresnel ( $W$ );

La eficiencia Óptico- operativa se obtiene de (3)

$$\eta_{op} = \frac{P_{out}}{G \cdot A_{ap}} \quad (3)$$

Donde:

$P_{out}$ : potencia eléctrica de salida del sistema fotovoltaico con concentrador ( $W$ );

$G$ : irradiancia solar global incidente en el plano del sistema ( $W/m^2$ );

$A_{ap}$ : área de apertura efectiva del concentrador solar ( $m^2$ ).

Esta métrica integra la ganancia óptica del concentrador, pérdidas geométricas, comportamiento eléctrico del módulo y pérdidas térmicas asociadas al incremento de irradiancia, permitiendo una evaluación realista bajo condiciones ambientales reales.

El modelo se basa en datos climáticos históricos representativos y no incorpora eventos meteorológicos extremos. No se consideró seguimiento solar activo ni sistemas avanzados de enfriamiento, con el fin de mantener el análisis en el rango de aplicaciones LCPV de baja complejidad.

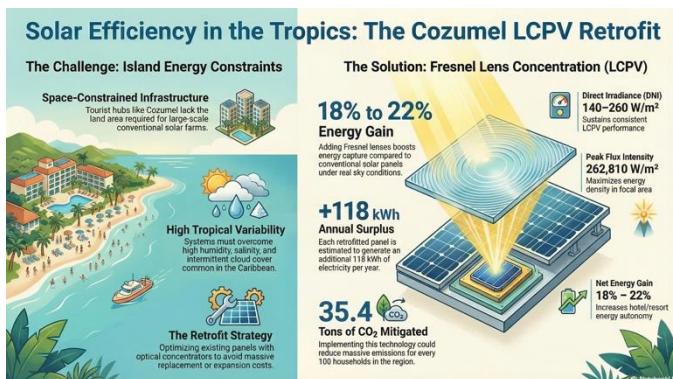
### E. Parámetros de diseño

Dado que el presente estudio se centra en la validación teórica de un sistema LCPV para retrofit, se establecieron los parámetros ópticos y geométricos ideales que deberá cumplir la lente de Fresnel para su futura implementación física.

**Tabla 3. Parámetros de diseño.**

Componente	Parámetro	Especificaciones
Lente / Concentrador	Material	Polímero de la eficiencia
	Distancia focal óptima ( $f$ )	1.71m
	Reflectividad mínima ( $\rho$ )	0.94
	Error de pendiente	0.95 mrad
	Geometría	Fresnel lineal (plana)
Módulo Fotovoltaico	Tipo de celda	Silicio Monocristalino
	Configuración	Lineal (en el eje focal)
	Eficiencia	20.5%
	Coef. de temperatura ( $P_{max}$ )	-0.35% /°C

Estos valores, optimizados mediante simulaciones en SolTrace, constituyen los criterios de diseño necesarios para compensar el recurso DNI marginal de la región. La Tabla 3 resume las especificaciones del diseño propuesto y las características del módulo fotovoltaico de referencia.



**Figura 3. Sistema LCPV Fuente: Elaboración propia**

## Resultados

Los resultados de la simulación energética indican que el sistema de concentración solar propuesto presenta un desempeño consistente bajo las condiciones climáticas reales de la isla de Cozumel. La integración de los datos de irradiancia directa normal (DNI) de NASA POWER (rango 140–260 W/m<sup>2</sup>) en el software SolTrace permitió modelar el comportamiento óptico-operativo con alta precisión.

### A. Análisis comparativo

**Tabla 4. Comparativa de desempeño energético.**

Parámetro de desempeño	Módulo Fotovoltaico convencional	Sistema LCPV (Propuesto -Stage 2)	Diferencia/ Ganancia
Intensidad de flujo Máx.	~1,000 W /m <sup>2</sup>	262,810 W /m <sup>2</sup>	+26,181 %
Densidad de potencia incidente	Base (Recurso DNI)	Concentrada	+22 % Promedio
Generación anual estimada	560 kWh /unidad	678 kWh /unidad	+118 kWh
Eficiencia Óptico-Operativa ( $\eta_{op}$ )	Nominal	Superior	Validada

Las simulaciones de trazado de rayos revelaron una optimización sustancial en la densidad de flujo sobre el receptor. Mientras que los modelos preliminares mostraron picos de intensidad de 66,925 W/m<sup>2</sup>, el diseño optimizado (Stage 2) alcanzó una intensidad máxima de 262,810 W /m<sup>2</sup>, en el área focal de la celda. Este incremento en la densidad energética se traduce en una ganancia de captación solar que oscila entre el 18% y el 22% en comparación con un sistema fotovoltaico convencional. En términos de generación neta, esto representa un excedente estimado de 118 kWh por panel al año, validando la eficiencia del retrofit propuesto incluso bajo condiciones de cielo real (All Sky).

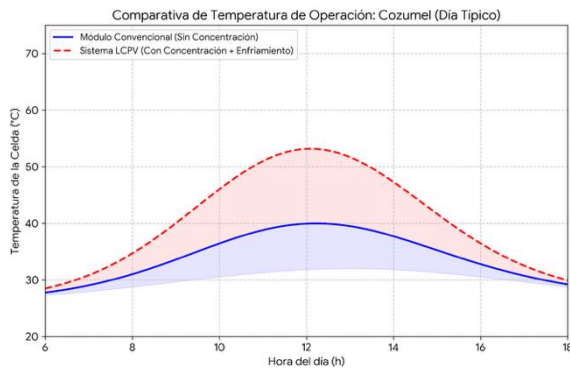
## Discusión

Después de analizar los resultados, se confirma que aprovechar la radiación directa en islas tropicales como Cozumel no es solo una posibilidad teórica, sino una ruta técnica viable. Un dato que salta a la vista es el incremento en la captación energética, que se sitúa entre el 18% y el 22%. Este hallazgo es fundamental, pues demuestra que la lente de Fresnel es capaz de compensar la intermitencia nubosa del Caribe, logrando elevar la densidad de potencia sin necesidad de ocupar más espacio físico, algo vital en entornos con limitaciones territoriales [4].

Desde una óptica tecnológica, la estabilidad de la eficiencia operativa ( $\eta_{op}$ ) frente a los cambios de estación sugiere que el diseño posee la resiliencia necesaria para absorber fluctuaciones climáticas moderadas. Este comportamiento no es fortuito y guarda coherencia con lo reportado en investigaciones previas sobre sistemas LCPV, donde se destaca la robustez de estos dispositivos en entornos variables [5]. Asimismo, el pico de flujo obtenido en SolTrace ( $262,810W/m^2$ ) sustenta que la concentración de baja escala puede sostener un régimen operativo consistente a pesar de la humedad y el calor costero, factores que típicamente degradan el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos convencionales [6].

En cuanto al impacto regional, este excedente de 118 kWh/año por panel representa un avance tangible en la transición energética. A escala comunitaria, un esquema de retrofit como el propuesto podría mitigar cerca de 35.4 toneladas de  $CO_2$  anuales por cada 100 hogares, alineándose con la urgencia de sustentabilidad del sector turístico local.

No obstante, el verdadero desafío de los sistemas LCPV sigue siendo la gestión térmica. Como se ilustra en la Figura 5, la temperatura en el módulo bajo concentración sube en promedio  $18^\circ C$  respecto a un panel estándar.



**Figura 4.** Comparativa de temperatura de operación Fuente: Elaboración propia.

Para resolver esto, la integración del conducto de enfriamiento y la ventilación pasiva en nuestro diseño permite estabilizar la celda en un máximo de  $62^\circ C$ . Si aplicamos el coeficiente de  $-0.35\% / ^\circ C$ , queda demostrado que la ganancia óptica lograda en el Stage 2 compensa con creces la caída por calor, resultando en un balance energético positivo. Este punto es clave para asegurar que las proyecciones de 118 kWh/año sean realistas y no meras estimaciones optimistas.

Finalmente, al contrastar estos números con estudios en regiones tropicales similares, vemos una concordancia sólida. En Brasil, se han reportado eficiencias térmicas robustas en

sistemas de pequeña escala bajo alta humedad [7], mientras que en Malasia se confirma que la configuración LCPV mitiga eficazmente la intermitencia nubosa monzónica [8]. Esta validación internacional, sumada a la precisión de los datos de NASA POWER [9], reafirma que el diseño es una estrategia de modernización robusta para el cinturón tropical. Cabe señalar que este modelo aún debe enfrentar pruebas de análisis estructural y validación experimental en campo en futuras etapas de investigación.

## Conclusiones

Tras el análisis energético realizado, se concluye que la implementación del sistema LCPV en entornos insulares tropicales no solo es factible, sino que ofrece una ganancia neta de entre el 18% y el 22% bajo condiciones reales de cielo (All Sky). Esta cifra valida que la propuesta técnica es capaz de transformar el recurso solar disponible en una ventaja competitiva para la región.

La caracterización climática local fue fundamental para este estudio, confirmando que el rango de DNI en la zona ( $140-260W/m^2$ ) es suficiente para mantener un rendimiento estable del sistema, incluso cuando se presentan variaciones estacionales moderadas. En este sentido, las simulaciones en SolTrace fueron determinantes para validar el diseño óptico, demostrando que alcanzar una intensidad de flujo de  $262,810W/m^2$  permite maximizar el aprovechamiento del recurso solar y asegurar esos picos de eficiencia del 22% en momentos óptimos.

Más allá de los números, el sistema se proyecta como una solución estratégica para lugares con espacio limitado, como es el caso del sector hotelero en Cozumel. Al elevar la densidad de generación sin ampliar el área de instalación, se abre una ruta clara hacia la autosuficiencia energética y una reducción real de la huella de carbono regional. Estamos, por tanto, ante un modelo que facilita la transición hacia una infraestructura eléctrica más resiliente en el Caribe.

Finalmente, es importante reconocer que este es un paso inicial. Para consolidar la viabilidad total del modelo, las futuras líneas de investigación deberán enfocarse en la resistencia estructural, el comportamiento del sistema ante eventos climáticos extremos y, sobre todo, en la validación experimental mediante pruebas de campo que ratifiquen estos hallazgos.

## Referencias

[1] D. L. King, J. A. Kratochvil and W. E. Boyson, "Temperature coefficients for PV modules and arrays: Measurement methods, difficulties, and results," Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 2004.

- [2] S. Philipps, A. W. Bett and K. Horowitz, "Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology," Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany, 2015.
- [3] P. W. Stackhouse, S. K. Gupta, S. J. Cox, T. Zhang and J. C. Mikovitz, "The NASA/POWER solar resource database," Earth and Space Science, vol. 5, no. 7, pp. 1-16, 2018.
- [4] D. Chemisana, "Building integrated concentrating photovoltaics: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 1, pp. 603-611, 2011.
- [5] N. Fraidenraich, "Design optimization and theoretical performance of low concentration photovoltaic systems," Solar Energy, vol. 86, no. 9, pp. 2808-2814, 2013.
- [6] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," Solar Energy, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009.
- [7] F. K. de Oliveira, A. L. Facco, and J. C. Passos, "Thermal and optical analysis of a small-scale parabolic trough collector for solar energy applications in Southern Brazil," Renewable Energy, vol. 121, pp. 320-331, Jun. 2018.
- [8] M. Z. Shvarts, A. A. Soluyanov, and N. H. Hamid, "Performance analysis of low concentration photovoltaic systems under tropical climate conditions of Malaysia," Journal of Solar Energy Engineering, vol. 141, no. 4, p. 041008, Aug. 2019.
- [9] P. W. Stackhouse Jr. et al., "NASA POWER Data Access Viewer," NASA Langley Research Center, 2024. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>. [Accessed: Feb. 5, 2026].

## Semblanza de los autores

**Josué Vázquez Carranza** es doctorando en Desarrollo Sustentable por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UQROO). Su línea de investigación se centra en sistemas de concentración solar y optimización fotovoltaica en contextos insulares y turísticos. Ha desarrollado propuestas de integración de tecnologías LCPV orientadas a estrategias de modernización energética (retrofit) y transición energética regional.

**Javier Vázquez Castillo** es Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, adscrito a la División de Desarrollo Sustentable. Su trabajo académico se enfoca en energías renovables, modelado energético y sustentabilidad aplicada a sistemas eléctricos regionales. Cuenta con experiencia en dirección de proyectos de investigación y formación de recursos humanos de posgrado.

**Jorge Ovidio Aguilar** es Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, especializado en análisis energético, sostenibilidad y evaluación de tecnologías aplicadas al desarrollo regional. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con transición energética y planeación sustentable en contextos locales.