



## FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

### Potencial eólico marino en México: Zonas óptimas para aerogeneradores fijos.

*Offshore wind potential in Mexico: Optimal zones for fixed-bottom wind turbines.*

*Potencial eólico marinho no México: Zonas ótimas para aerogeneradores fixos.*

**Claudia Rebeca Rábago Arredondo,  
Denise Margarita Rivera Rivera**

Universidad Centro Panamericano de Estudios  
Superiores, México

[denise.rivera@unicepes.edu.mx](mailto:denise.rivera@unicepes.edu.mx)

Artículo científico

Enviado: 2/6/2025

Aprobado: 17/9/2025

Publicado: 30/9/2025

### RESUMEN

La energía eólica es un recurso renovable aprovechable mediante aerogeneradores instalados en tierra y mar. Desde la década de 1990 países como Dinamarca y Estados Unidos desarrollaron parques eólicos marinos, impulsando la transición energética. En contraste, México, pese a condiciones geográficas y climáticas favorables, presenta rezago en la evaluación y aprovechamiento del recurso eólico marino. Este estudio tuvo como objetivo identificar las regiones mexicanas con mayor potencial eólico marino para la instalación de aerogeneradores fijos, considerando factores geográficos, climáticos y tecnológicos. Se emplearon simulaciones geoestadísticas con el programa *Global Wind Atlas* para caracterizar el potencial eólico en el Istmo de Tehuantepec, las costas de Yucatán y Veracruz. Posteriormente, se simuló un parque eólico marino con aerogeneradores fijos en *System Advisor Model* para evaluar su viabilidad técnica y económica. Los resultados indicaron que el Istmo de Tehuantepec presentó el mayor potencial, gracias a la elevada velocidad del viento, estabilidad atmosférica y condiciones batimétricas óptimas; lo que permite un alto rendimiento energético y costos operativos competitivos. Este estudio demostró la relevancia de un análisis técnico riguroso para orientar decisiones estratégicas, diversificar la matriz energética, impulsar la transición hacia fuentes renovables y desarrollar infraestructura eólica marina en México.

**Palabras clave:** energía renovable, infraestructura marina, modelado energético, simulación geoestadística, transición energética, viabilidad técnica.

### ABSTRACT

Wind energy is a renewable resource harnessed by turbines installed onshore and offshore. Since the 1990s, countries such as Denmark and the United States have developed offshore wind farms, driving energy transition. In contrast, Mexico, despite favorable geographic and climatic conditions, lags in the assessment and exploitation of offshore wind resources. This study aimed to identify Mexican regions with the highest offshore wind potential for fixed-bottom turbines installation, considering geographic, climatic, and technological factors. Geostatistical simulations using the *Global Wind Atlas* software were used to characterize the wind potential in the Isthmus of Tehuantepec and the coasts of Yucatán and Veracruz. An offshore wind farm with fixed-bottom turbines was subsequently simulated in the *System Advisor Model* software to assess its technical and economic feasibility. Results indicated that the Isthmus of Tehuantepec exhibited the greatest potential, thanks to its high wind speed, atmospheric stability, and optimal bathymetric conditions, enabling high energy yield

and competitive operational costs. This study demonstrated the relevance of rigorous technical analysis to guide strategic decisions, diversify the energy matrix, drive transition to renewable sources, and develop offshore wind infrastructure in Mexico.

**Keywords:** energy modeling, energy transition, geostatistical simulation, marine infrastructure, renewable energy, technical feasibility.

## RESUMO

A energia eólica é um recurso renovável que pode ser explorado por meio de turbinas eólicas instaladas em terra e no mar. Desde a década de 1990, países como Dinamarca e Estados Unidos desenvolveram parques eólicos offshore, impulsionando a transição energética. Em contraste, o México, apesar das condições geográficas e climáticas favoráveis, está atrasado na avaliação e exploração de recursos eólicos offshore. Este estudo teve como objetivo identificar as regiões mexicanas com maior potencial eólico offshore para instalação de turbinas eólicas fixas, considerando fatores geográficos, climáticos e tecnológicos. Simulações geoestatísticas usando o programa Global Wind Atlas foram usadas para caracterizar o potencial eólico no istmo de Tehuantepec e nas costas de Yucatán e Veracruz. Um parque eólico offshore com turbinas fixas foi então simulado no System Advisor Model para avaliar sua viabilidade técnica e econômica. Os resultados indicaram que o Istmo de Tehuantepec apresentou o maior potencial, graças à sua alta velocidade de vento, estabilidade atmosférica e condições batimétricas ótimas, permitindo alta eficiência energética e custos operacionais competitivos. Este estudo demonstrou a importância de uma análise técnica rigorosa para orientar decisões estratégicas, diversificar a matriz energética, impulsionar a transição para fontes renováveis e desenvolver infraestrutura eólica offshore no México.

**Palavras-chave:** energia renovável, infraestrutura marinha, modelagem de energia, simulação geoestatística, transição energética, viabilidade técnica.

## INTRODUCCIÓN

La energía eólica tiene su origen en la energía solar: la radiación solar calienta de forma desigual la superficie terrestre y la atmósfera, generando gradientes de temperatura y presión que ponen en movimiento el aire y concentran energía cinética a distintas escalas. Esta energía cinética del viento puede convertirse en electricidad mediante aerogeneradores onshore (terrestres) y offshore (marinos) y se perfila como una de las energías renovables de más rápido crecimiento a nivel global. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2024) en 2023 la capacidad instalada a nivel mundial de energía eólica supera los 1000 GW, de los cuales alrededor del 7% corresponden a parques marinos. Aunque la tecnología offshore ofrece factores de planta más elevados y una producción más continua, sus costos de instalación siguen siendo altos y según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2023), aún no existen mapeos integrados que orienten de manera precisa la elección de sitios, lo que frena su despliegue frente a proyectos terrestres.

En México, el potencial eólico marino resulta muy atractivo: con más de 11 000 km de litoral en sus costas pacífica y del Golfo de México, y velocidades medias de viento superiores a 7 m/s en aguas someras (<60 m de profundidad), las condiciones son adecuadas para las cimentaciones fijas de aerogeneradores según el Consejo Global de Energía Eólica (2024) y la Secretaría de Energía (2023). Estudios oficiales estiman un recurso eólico offshore potencial de varios miles de gigavatios en la plataforma continental mexicana, muy por encima de la meta nacional de 15 GW de capacidad eólica de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (2023). Sin embargo, esta oportunidad permanece sin aprovecharse por la carencia de un marco técnico que integre batimetría, recurso eólico, cercanía a

costa y criterios tecnológicos, así como por falta de regulaciones específicas y de certeza jurídica para proyectos marinos más allá de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (2008), que define las directrices generales para el uso de fuentes limpias y establece los mecanismos de financiamiento; y a la Reforma Energética de 2013, implementada en 2014 mediante modificaciones a la Ley de la Industria Eléctrica orientadas a modernizar el sector eléctrico (Vázquez-Pérez, 2021). Además, las directrices recientes que privilegian proyectos de Petróleos Mexicanos y de la Comisión Federal de Electricidad desalientan la inversión privada y la adopción de tecnología avanzada, retrasando la materialización de parques offshore.

La investigación nacional en energía eólica marina se encuentra todavía en una etapa incipiente y fragmentada. Los estudios existentes carecen de regionalizaciones detalladas y datos robustos sobre variables climatológicas, geográficas y tecnológicas para la selección de emplazamientos óptimos (Arredondo-Gómez *et al.*, 2022; Meza-Carreto *et al.*, 2024). Además, la dependencia de tecnología importada encarece los proyectos y dispersa sus beneficios en fabricantes extranjeros, lo que dificulta el desarrollo de capacidades locales y la transferencia tecnológica. Este escenario subraya la necesidad de un método sistemático que combine modelaciones de viento, evaluaciones ambientales y estándares de diseño adaptados al contexto mexicano, de modo que el potencial teórico se convierta en capacidad instalada real.

En este trabajo se tuvo como objetivo principal identificar zonas óptimas para la instalación de aerogeneradores fijos marinos en México, evaluando de manera integral variables geográficas, climáticas y tecnológicas. El alcance de esta primera etapa se centra exclusivamente en la determinación de los sitios más adecuados para su instalación; por ello, las variables socioambientales, como los impactos sobre hábitats, el uso del espacio marino, la pesca y las dinámicas de comunidades costeras, si bien se reconocen como fundamentales para una eventual implementación, no fueron consideradas en este análisis y deberán incorporarse en fases posteriores. Además, se propone un modelo de parque eólico offshore orientado a maximizar los beneficios económicos, naturales y tecnológicos para el sistema eléctrico nacional. Entre los objetivos específicos se tuvieron: caracterizar los beneficios potenciales de un parque eólico marino adaptado a México y contrastar las regiones de mayor recurso con experiencias internacionales de éxito, con el fin de extraer recomendaciones y buenas prácticas que sirvan de base a futuros marcos regulatorios y de planificación.

La hipótesis plantea que las regiones costeras mexicanas con vientos constantes, profundidades adecuadas y proximidad a la costa ofrecen un recurso suficiente para diseñar instalaciones offshore capaces de generar beneficios económicos, naturales y tecnológicos comparables a los de los proyectos eólicos marinos más avanzados del mundo. Si bien este estudio se centra en variables geográficas, climáticas y tecnológicas, dejando sistemáticamente fuera del análisis la dimensión social, se reconoce que esta última es esencial para la viabilidad de cualquier proyecto y deberá incorporarse en evaluaciones futuras. Además de los resultados técnicos, este estudio analiza las implicaciones en políticas energéticas, como el convenio entre la Comisión Federal de Electricidad y la Agencia Danesa de Energía, así como el potencial de creación de empleo y desarrollo económico en las comunidades costeras.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se empleó un enfoque de simulación geoestadística dividido en dos etapas complementarias. En la primera etapa se caracterizaron cuatro parques eólicos marinos consolidados: Vineyard Wind I (Estados Unidos), Wikinger (Alemania), Hornsea 2 (Reino Unido) y Anholt (Dinamarca), para evaluar sus condiciones climáticas (velocidad media, densidad de potencia y direccionalidad del viento) y sus atributos geográficos (batimetría y proximidad a la costa) a través de la plataforma Global Wind Atlas (2022). Con estos resultados se definieron categorías de buenas prácticas que sirvieron de criterio para la selección de zonas análogas en México, considerando únicamente ubicaciones con aguas someras (<60 m de profundidad), velocidades medias del viento superiores a 7 m/s y distancias optimizadas a la costa para cimentaciones fijas de aerogeneradores. En la segunda etapa, cada una de las zonas mexicanas seleccionadas se modeló como un parque eólico offshore de cimentación fija utilizando el software System Advisor Model (SAM) versión 2023, herramienta del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (2023) con el propósito de evaluar la viabilidad técnica y económica. Este software considera datos representativos de EE. UU., de modo que, para los fines de esta investigación, se seleccionaron modelos con características similares a las ubicaciones propuestas para las zonas costeras mexicanas. Los resultados simulados se compararon con los cuatro casos mencionados (Vineyard Wind I, Wikinger, Hornsea 2 y Anholt) (*figura 1*).

Para la obtención y tratamiento de datos, se empleó principalmente la plataforma Global Wind Atlas (GWA, 2022), la cual proporcionó mapas de alta resolución del recurso eólico a nivel global, nacional y regional (*figura 2*). Se recopilaron datos correspondientes al periodo 2020-2024, de modo que se capturaron las variaciones a corto plazo y los patrones estacionales que pudieran influir en la viabilidad de aerogeneradores fijos. A partir de las capas clasificadas según los factores de carga de la Comisión Electrotécnica Internacional (2019), se extrajeron los parámetros de velocidad y densidad del viento, y se superpusieron las capas de batimetría y distancia a costa para delimitar los emplazamientos viables (*figura 3*). A fin de ilustrar el procedimiento aplicado a todos los casos de estudio, se muestra el caso de Vineyard Wind I en las *figuras 4-6*, que representan respectivamente: (i) la velocidad media del viento superior a 7 m/s, (ii) densidad media de potencia y (iii) batimetría uniforme cercana a 45 m de profundidad.

**Figura 1. Flujo metodológico del presente estudio.**

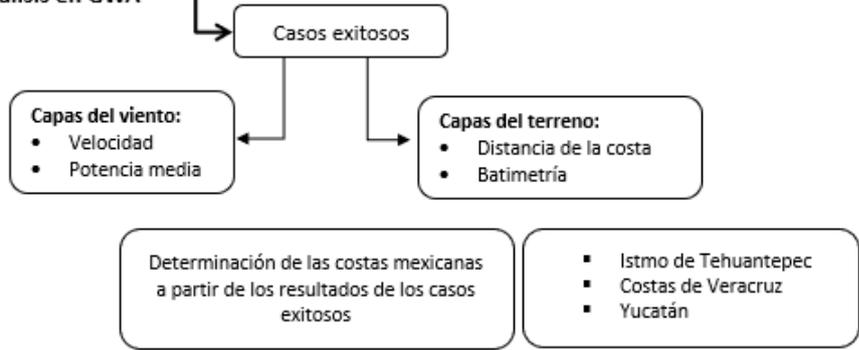
**1. Selección de casos exitosos de parques eólicos marinos:**

- Vineyard Wind, en Estados Unidos.
- Hornsea 2, Reino Unido.
- Wikingen, en Alemania.
- Anholt, en Dinamarca.

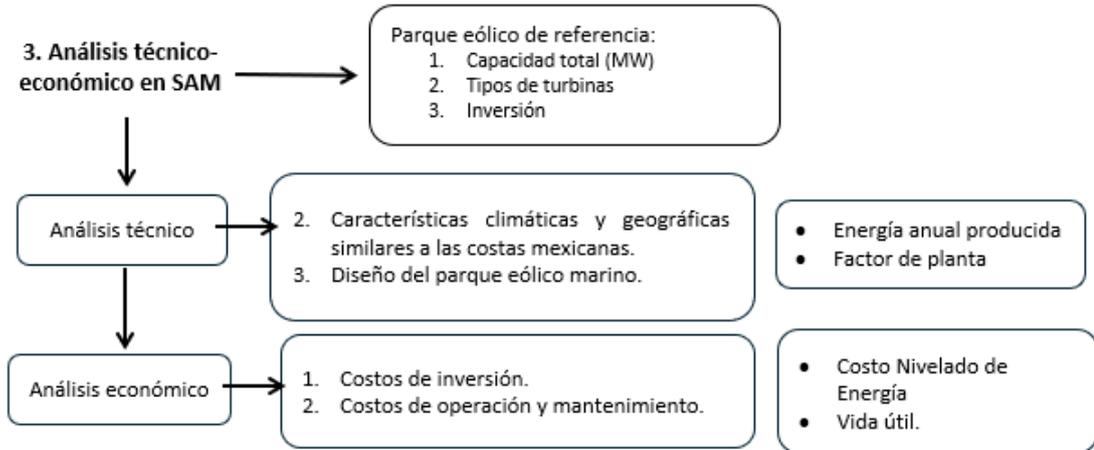
**Características:**

- Ubicación
- Capacidad instalada (MW)
- Tipos de turbinas
- Costos

**2. Análisis en GWA**

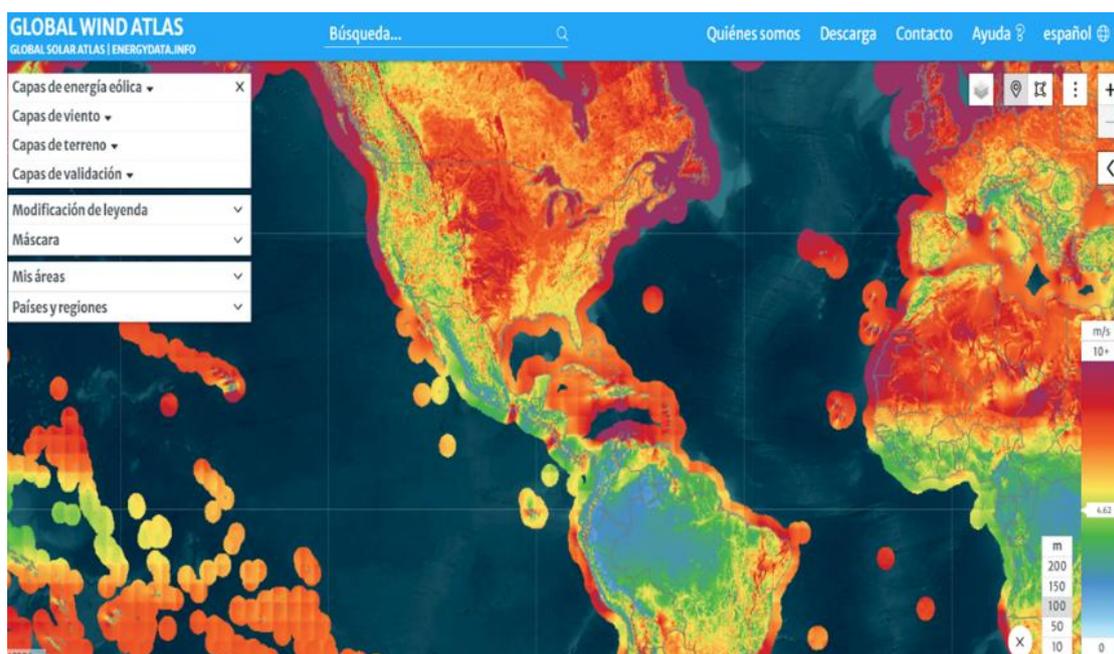


**3. Análisis técnico-económico en SAM**



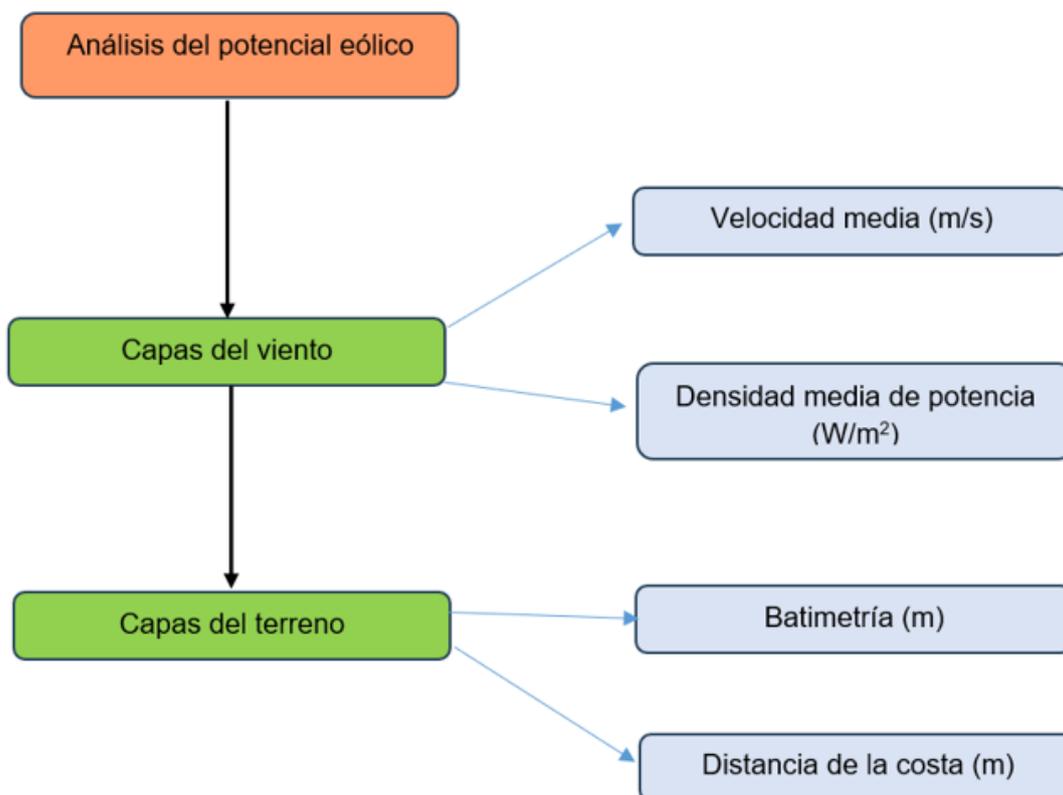
**Fuente:** *Elaboración propia.*

Figura 2. Interfaz de GWA.



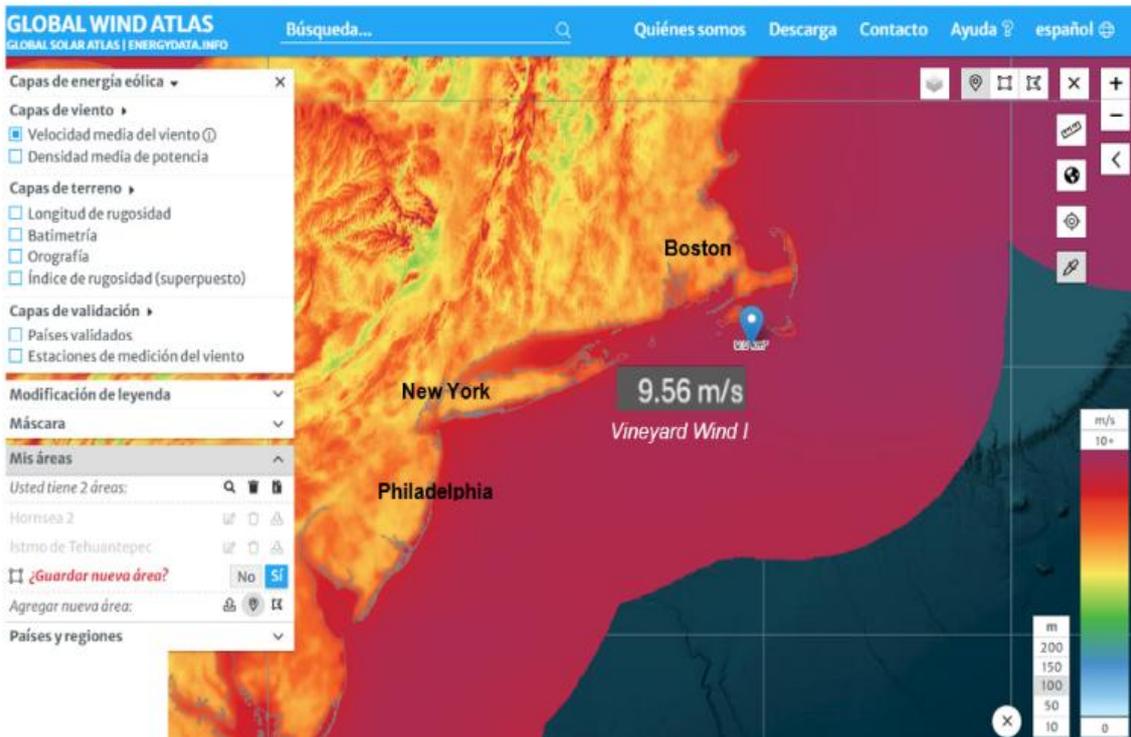
Fuente: Global Wind Atlas (2024).

Figura 3. Diagrama de análisis de datos para la evaluación del potencial eólico en GWA.



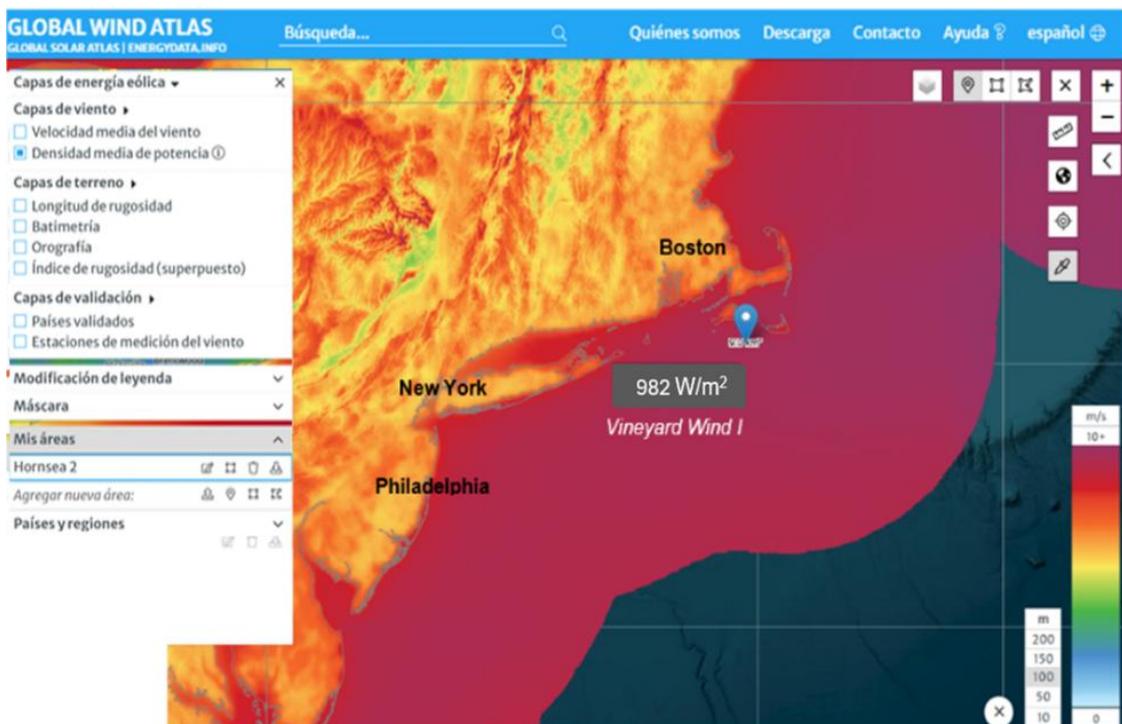
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.** Velocidad media del viento a lo largo del periodo de estudio (4 años) en el Parque Eólico Vineyard Wind I de Estados Unidos.



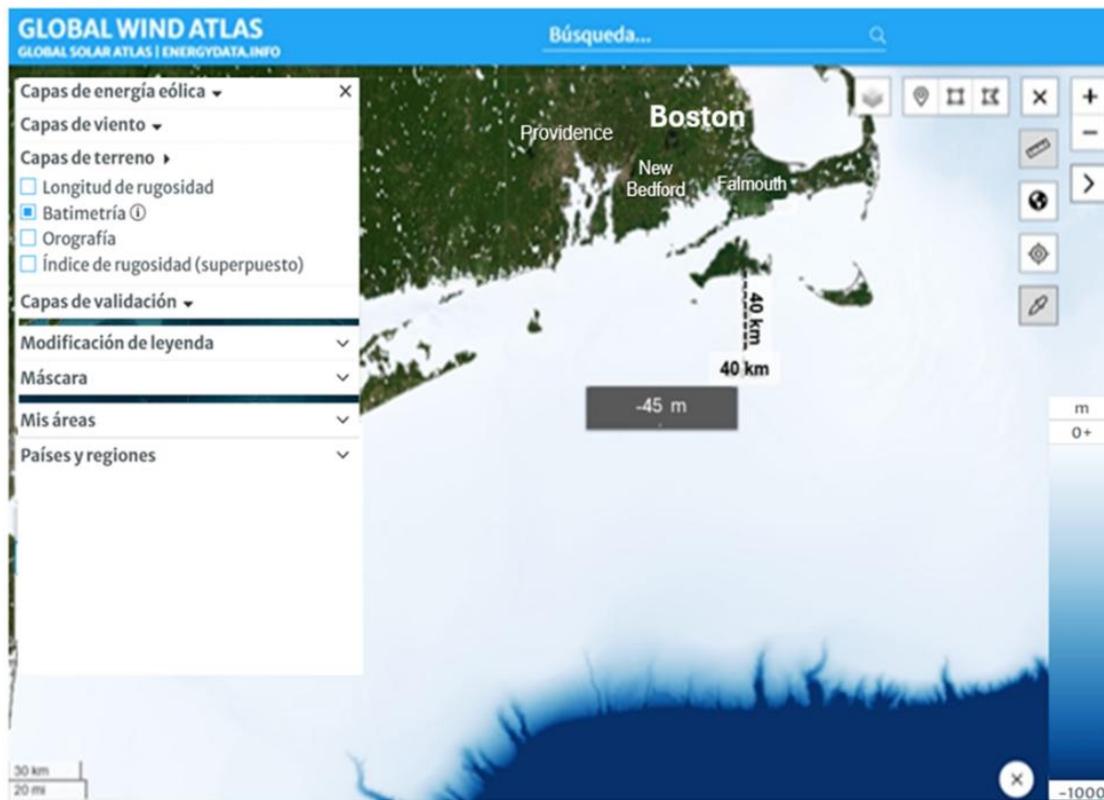
Fuente: Global Wind Atlas (2024).

**Figura 5.** Densidad media de potencia en el Parque Eólico Vineyard Wind I de Estados Unidos.



Fuente: Global Wind Atlas (2024).

**Figura 6.** Batimetría y distancia de la costa del Parque Eólico Vineyard Wind I de Estados Unidos.



Fuente: *Global Wind Atlas* (2024).

Una vez validada la metodología con los cuatro casos de estudio internacionales (*Vineyard Wind I*, *Hornsea 2*, *Wikingen* y *Anholt*), se replicaron los mismos criterios en las regiones costeras mexicanas. A partir del reporte del recurso eólico disponible para México extraído del GWA, se identificaron las costas con mayor velocidad media del viento, destacando el Istmo de Tehuantepec, las costas de Veracruz y Yucatán como las zonas más prometedoras para instalar tecnología offshore. Estas tres zonas se compararon, en términos de categoría de recurso, con cada uno de los proyectos internacionales seleccionados, y posteriormente se simuló su comportamiento en México mediante un análisis técnico-económico. En SAM, los datos climáticos y geográficos extraídos de GWA se incorporaron a una plantilla de proyecto donde se ejecutaron simulaciones para estimar la producción anual, el factor de planta y los costos de inversión, operación y mantenimiento. El modelo generó además las curvas de generación horaria, mensual y anual, así como las métricas financieras: Costo Nivelado de Energía (LCOE) y costo neto de capital, así como un análisis de sensibilidad ante variaciones en el recurso eólico. Estos resultados permitieron comparar la viabilidad técnico-económica de cada sitio mexicano con los promedios de los casos internacionales de referencia.

Para cuantificar la eficiencia operativa se calculó el factor de planta mediante la fórmula:

$$\text{Factor de planta} = \frac{\text{Energía neta anual (kWh)}}{\text{Capacidad del sistema (kW} * 8760 \text{ horas)}}$$

Por su parte, el LCOE resume el costo total de ciclo de vida del proyecto (inversión, operación y mantenimiento) expresado en unidades monetarias por kWh generado, el cual se calculó durante la vida útil del proyecto, según la metodología de NREL (2022). Este indicador resultó clave para comparar alternativas y para la toma de decisiones de inversión en parques eólicos marinos (IRENA, 2023).

Como parte de la metodología, se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas de literatura especializada en energía eólica marina y geoestadística, que validó los parámetros de simulación y facilitó el contraste de los hallazgos con las mejores prácticas internacionales. Entre las limitaciones principales se identificaron la ausencia de mediciones in situ, lo que impuso la dependencia total de los datos de GWA; y la falta de datos meteorológicos históricos detallados para las zonas marinas mexicanas. Asimismo, no se modelaron efectos detallados de interacción oleaje-estructura, aspecto complejo que deberá abordarse en estudios futuros mediante simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

## RESULTADOS

Los resultados del análisis de los cuatro parques eólicos internacionales, presentados en la *tabla 1*, permitieron establecer rangos de referencia para comparar las ubicaciones mexicanas.

**Tabla 1.** Resultados de los proyectos exitosos.

Parque eólico	País	Velocidad media del viento (m/s)	Densidad media de potencia (W/m <sup>2</sup> )	Batimetría (m)	Distancia de la costa (km)
Vineyard Wind	Estados Unidos	9.43	1134	-40	24.14
Hornsea	Reino Unido	10.01	1307	-30	89
Wikinger	Alemania	9.35	1105	-40	35
Anholt	Dinamarca	9.29	1064	-15	20

**Fuente:** Elaboración propia a partir de resultados de GWA.

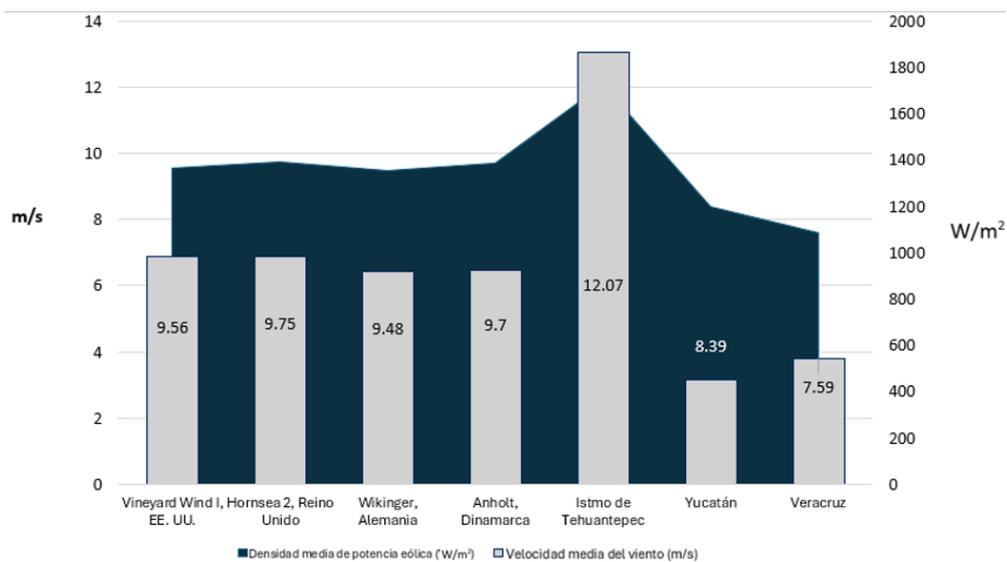
El análisis geoestadístico realizado en el Global Wind Atlas (*tabla 2*) reveló que el Istmo de Tehuantepec fue la región mexicana con mayor potencial eólico marino: la velocidad media del viento alcanzó 12.07 m/s, mientras que en Vineyard Wind se registraron 9.56 m/s; en Hornsea 9.75 m/s; en Wikinger, 9.48 m/s; y en Anholt 9.70 m/s. De modo análogo, la densidad media de potencia en el Istmo fue de 1863 W/m<sup>2</sup> frente a valores inferiores a los 1400 W/m<sup>2</sup> registrados en los casos internacionales (*figura 7*). La batimetría uniforme cercana a -50 m y la distancia a costa de 14.60 km confirmaron las condiciones óptimas para cimentaciones fijas, coherentes con la hipótesis de que México podría superar 15 GW de capacidad offshore instalada.

**Tabla 2.** Potencial eólico de tres regiones de México.

Región	Velocidad media del viento (m/s)	Densidad media de potencia (W/m <sup>2</sup> )	Batimetría (m)	Distancia de la costa (km)
Istmo de Tehuantepec	12.07	1863	-50	14.60
Costas de Yucatán	7.56	648	-15	14.80
Costas de Veracruz	7.38	456	-20	18.50

**Fuente:** Elaboración propia a partir de resultados de GWA.

**Figura 7.** Comparación entre los casos de éxito de proyectos eólicos internacionales y México.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de resultados de GWA.

En contraste, las costas de Yucatán presentaron una velocidad media de 8.39 m/s y una densidad de potencia de 451 W/m<sup>2</sup>, con batimetría de solo 15 m de profundidad (*tabla 2*). Estos valores indicaron un potencial moderado, adecuado para proyectos de menor escala o pilotos, pero no competitivo frente al Istmo o a los grandes parques internacionales. Por su parte, las costas de Veracruz arrojaron una velocidad media de 7.59 m/s y una densidad de potencia de relativamente alta (541 W/m<sup>2</sup>), con batimetría de 50 m a solo 7.2 km de la costa. En conjunto, estos parámetros en Veracruz resultaron inferiores a los del Istmo, lo que refuerza la prioridad de este último para futuras inversiones.

La modelación técnico-económica en SAM para un parque tipo de 864 MW (62 turbinas) confirmó dichas diferencias cuantitativas. En el Istmo de Tehuantepec la producción anual estimada fue de 3638.80 GWh con un factor de planta de 48.1% y un LCOE de ¢ USD 8.56/kWh. En Yucatán, la simulación arrojó 3016.27 GWh, un factor de planta de 39.9% y un LCOE de ¢ USD 10.33/kWh; mientras que en Veracruz la producción anual fue de 2615.69 GWh, con factor de planta de 34.6% y un LCOE de ¢ USD 11.91/kWh (*tabla 3*).

La relación entre velocidad media del viento y densidad de potencia se reflejó directamente en los factores de planta y en los LCOE: velocidades superiores a 9 m/s generaron factores de planta cercanos a 50%, mientras que valores por debajo de 8 m/s redujeron significativamente la rentabilidad del proyecto.

Al comparar el modelo simulado para el Istmo de Tehuantepec con los valores promedio de los cuatro proyectos internacionales de referencia, se observó que la velocidad media del viento en el Istmo (12.07 m/s) superó el promedio internacional (10.27 m/s) y su densidad media de potencia (1863 W/m<sup>2</sup>) excedió el promedio internacional (1217.25 W/m<sup>2</sup>) e incluso duplica el promedio de parques terrestres (24-35%). Además, la distancia a costa de 14.60 km representó una ventaja logística frente a desarrollos como Hornsea 2 (89 km) o Wikinger (34 km), reduciendo costos de instalación, mantenimiento y transmisión. El LCOE de 8.56 ¢ USD/kWh en el Istmo se mantuvo dentro del rango competitivo internacional (7.5–13 ¢ USD/kWh) (IRENA, 2023) lo que reforzó la viabilidad económica de ese emplazamiento.

Los beneficios potenciales de las instalaciones eólicas marinas en México se agruparon en aspectos tecnológicos, ecológicos y económicos (*tabla 4*).

**Tabla 3.** Resumen de resultados de los modelos técnico-económicos de México.

Ubicación	Energía anual (GWh)	Factor de capacidad (%)	LCOE (\$ MXN / kWh)
Istmo de Tehuantepec	3638.80	48.1	1.60
Costas de Yucatán	3016.27	39.9	1.98
Veracruz	2615.69	34.6	2.29

Fuente: *Elaboración propia de resultados de SAM.*

**Tabla 4.** Beneficios potenciales de la energía eólica marina en México

Beneficios económicos	Beneficios ecológicos	Beneficios tecnológicos
Generación de empleo (aprox. 15 puestos por MW instalado)	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	Desarrollo de capacidades técnicas locales
Reducción de costos energéticos a largo plazo	Disminución de dependencia de combustibles fósiles	Transferencia tecnológica
Desarrollo de cadenas de suministro locales	Menor impacto en ecosistemas terrestres	Innovación en tecnologías marinas
Ingresos por arrendamiento de zonas marítimas	Posible creación de santuarios marinos artificiales	Mejora en sistemas de conexión a red
Impulso al desarrollo regional	Mitigación del cambio climático	Adaptación de tecnologías a condiciones locales

Fuente: *Elaboración propia.*

## DISCUSIÓN

Los resultados confirman que México posee regiones con alto potencial para el desarrollo de proyectos eólicos marinos, destacando de manera especial el Istmo de Tehuantepec. En esta región, la velocidad media del viento supera los 12 m/s y la densidad media de potencia alcanza los 1,863 W/m<sup>2</sup>, valores notablemente superiores a los observados en parques internacionales consolidados como Hornsea (10.01 m/s) o Vineyard Wind I (9.43 m/s) (Olivares, 2021). La batimetría uniforme cercana a -50 m y la distancia moderada a la costa (14.60 km) ofrecen condiciones excepcionales para cimentaciones fijas de aerogeneradores.

El modelo simulado para el Istmo mostró, además, una producción anual estimada de 3638.80 GWh y un factor de planta de 48.1%, cifras que exceden con holgura las observadas en Yucatán (39.9%) y Veracruz (34.6%). Estos factores de planta superan el umbral del 40% que diferentes estudios han identificado como indicativo de proyectos altamente rentables en entornos marinos (Li *et al.*, 2020; Pryor *et al.*, 2021).

Un aspecto clave es el Costo Nivelado de Energía (LCOE) de 8.56¢ USD/kWh para el Istmo de Tehuantepec, sensiblemente menor que los valores estimados para Yucatán (10.33¢ USD/kWh) y Veracruz (11.91¢ USD/kWh). Este LCOE se sitúa dentro del rango competitivo a nivel global para parques eólicos marinos (7.5–13 ¢ USD/kWh) (IRENA, 2023), lo que refuerza la viabilidad económica de la región como sitio de escala comercial.

Desde una perspectiva de política energética y transición justa, estos hallazgos respaldan la necesidad de enfocar los primeros desarrollos offshore en el Istmo, complementados por proyectos piloto en Yucatán y Veracruz para acumular experiencia técnica y social. La capacidad de generar empleo especializado y dinamizar economías locales se maximiza si se priorizan las zonas de mayor recurso, tal como sugieren los resultados técnico-económicos. Asimismo, el bajo LCOE obtenido en

el Istmo de Tehuantepec refuerza la viabilidad de la energía eólica marina como palanca para reducir costos de generación y emisiones de gases de efecto invernadero en el mix eléctrico nacional.

Yucatán y Veracruz, pese a registrar recursos menores, pueden servir como sitios piloto debido a sus factores de planta (39.9% y 34.6%) y LCOE (10.33¢ USD/kWh y 11.91¢ USD/kWh) aún viables para proyectos de escala reducida. Estos emplazamientos facilitan la acumulación de experiencia operativa y social antes de avanzar a desarrollos de mayor envergadura (Consejo Global de Energía Eólica, 2024).

No obstante, la implementación de parques eólicos marinos en México enfrenta retos regulatorios y de infraestructura de transmisión (Urbano-Juárez, 2023). La ausencia de un marco normativo específico para proyectos offshore y la falta de interconexión marítima obligan a diseñar nuevas políticas y actualizar la red eléctrica para garantizar la evacuación eficiente de la energía. Además, resulta imperativo establecer mecanismos de consulta comunitaria que permitan mitigar oposiciones sociales y asegurar la aceptación local.

Entre las principales limitaciones de este estudio se encuentran la dependencia exclusiva de datos satelitales (GWA) sin mediciones in situ, y la falta de bases de datos detalladas sobre costos de operación y mantenimiento propios de la tecnología offshore en México. Por ello, se recomienda que trabajos futuros:

- Realicen estudios de impacto ambiental<sup>1</sup> más detallados, especialmente en la interacción oleaje-estructura utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional;
- Analicen a fondo la factibilidad de modernizar la red eléctrica nacional para integrar la energía generada por parques marinos;
- Explore la aceptación y participación comunitaria en zonas costeras, documentando experiencias de consulta y planeación conjunta.

## CONCLUSIONES

Se concluye que México cuenta con regiones de alto potencial para el desarrollo de parques eólicos marinos, siendo el Istmo de Tehuantepec la más prometedora para las cimentaciones fijas gracias a sus condiciones geográficas y climatológicas, comparables o superiores a las de proyectos internacionales consolidados. Su recurso eólico, que supera 12 m/s en velocidad media y 1863 W/m<sup>2</sup> en densidad de potencia, junto con batimetría uniforme en -50 m y una distancia a costa de 14.60 km, podría permitir la instalación de más de 15 GW de capacidad offshore con niveles de rentabilidad adecuados. Este potencial ofrece una oportunidad para diversificar la matriz energética nacional, reducir la dependencia de combustibles fósiles y acelerar la transición hacia fuentes renovables, al tiempo que fomenta la creación de empleo especializado, el desarrollo de cadenas de suministro locales y la transferencia de tecnología.

Sin embargo, se observa que la planificación de proyectos offshore en México ha carecido de mapeos integrados que combinen batimetría, estudios anemométricos sobre recurso eólico, proximidad a costa y criterios de cimentación, lo que ha limitado la materialización de iniciativas a pesar del potencial teórico de alrededor de 3000 GW en la plataforma continental. Además, la adopción de tecnologías para aguas profundas y anclajes marinos sigue siendo marginal, por lo que es necesario impulsar la transferencia de tecnología, promover la inversión en equipos de cimentación fija y ejecutar proyectos piloto que validen los beneficios ambientales (ecológicos, económicos y sociales)

---

<sup>1</sup> Entendido el ambiente como “un complejo sistema de interacción entre la naturaleza y la sociedad, en el que intervienen elementos bióticos, abióticos, económicos, psicosociales, culturales, políticos, institucionales y tecnológicos, que determinan su estructura, funcionamiento y estabilidad” (Puerta, 2022, p.5).

de la energía eólica marina. A la vez, se requiere un marco regulatorio específico que facilite la inversión, garantice la sostenibilidad y promueva la participación de las comunidades costeras.

Este estudio presenta dos limitaciones principales: las simulaciones, basadas en datos de alta resolución de recursos eólicos, pueden diferir de las condiciones operativas reales en mar abierto, y no se abordaron de forma detallada los factores sociales, cuya consideración resulta esencial para la viabilidad de los proyectos energéticos. Por ello, se recomienda que investigaciones futuras profundicen en la evaluación del impacto ambiental, incluida la interacción oleaje-estructura, exploren la modernización de la red eléctrica para integrar la generación offshore y analicen mecanismos de aceptación y participación comunitaria en las regiones costeras seleccionadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Internacional de Energías Renovables. (2023). *Renewable Power Generation Costs in 2023*. <https://shre.ink/Sf5g>

Agencia Internacional de Energías Renovables. (2024). *Renewable capacity statistics 2024*. <https://acortar.link/mnRHDp>

Agencia Internacional de la Energía. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

Arredondo-Gómez, M., García-Nava, H., Rodríguez-Hernández, O. y Lambert-Arista, A. (2022). *Estimación del recurso eólico marino en la península de Baja California, México, utilizando la base de datos ERA 5* [Resumen de presentación]. En XII Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (pp. 543-555). <https://shre.ink/SfAh>

Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2023). *Reporte de energía eólica en México 2022*. <https://acortar.link/luFfiU>

Comisión Electrotécnica Internacional. (2019). *IEC 61400-1: 2019- Wind turbines – Part 1: Design requirements* (Standard No. IEC 61400-1 Ed. 4.0). <https://shre.ink/SfAl>

Consejo Global de Energía Eólica. (2024). *Global Offshore Wind Report 2024*. <https://shre.ink/SfLP>

Global Wind Atlas. (2024). *Conjunto de datos* [Data set]. <https://globalwindatlas.info>

Laboratorio Nacional de Energías Renovables. (2022). *System Advisor Model. User Guide (Version 2022)*. <https://sam.nrel.gov>

Laboratorio Nacional de Energías Renovables. (2023). *System Advisor Model Version 2023* [Software]. <https://sam.nrel.gov/download/version-2023-12-17-1.html>

Li, J., Wang, G., Li, Z., Yang, S., Chong, W. T. y Xiang, X. (2020). A review on development of offshore wind energy conversion system. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9283–9297. <https://doi.org/10.1002/er.5751>

- Meza-Carreto, J., Romero-Centeno, R., Figueroa-Espinoza, B., Moreles, E., & López-Villalobos, C. (2024). Outlook for Offshore Wind Energy Development in Mexico from WRF Simulations and CMIP6 Projections. *Energies*, 17(8), 1866. <https://doi.org/10.3390/en17081866>
- Olivares, G. M. (2021). Incentivos regulatorios para el desarrollo de la energía eólica marina en Chile. *Revista Derecho Administrativo Económico*, 33, 227-253. <https://doi.org/10.7764/redae.33.8>
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J. y Shepherd, T.J. (2021). Wind power production from very large offshore wind farms, *Joule*, 5(10), 2663–2686. <https://acortar.link/YQeTJf>
- Puerta de Armas, Y. G. (2022). Editorial. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5, e294. <https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e294>
- Secretaría de Energía. (2023). *Parques eólicos en México. Capacidad instalada*. Gobierno de México. <https://acortar.link/WBxYC4>
- Urbano-Juárez, N. (2023). Transición energética en México, retos y desafíos. *Revista Lex*, 6(22), 308-326. <https://doi.org/10.33996/revistalex.v6i22.163>
- Vázquez-Pérez, J. T. (2021). *Iniciativa de reforma a la Ley de la Industria Eléctrica: Retroceso en materia energética*. Centro de Investigación Económica y Presupuestaria. <https://acortar.link/cpJ2LN>