

Eficiencia en el uso de energía renovable y no renovable y crecimiento económico en las economías desarrolladas y en desarrollo del APEC. Un estudio de DEA Metafrontera con badoutputs

Efficiency in the use of renewable and non-renewable energy and economic growth in developed and developing APEC economies: A Meta-frontier DEA study with bad outputs

América Ivonne Zamora Torres*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (México)

Recibido: 07 de mayo de 2025

Aceptado: 13 de noviembre de 2025

Publicado: 30 de mayo de 2026

Resumen

Las economías que componen APEC hacen esta zona la más dinámica del mundo, lo que conlleva a un panorama ambivalente con crecimiento económico al alza, pero a su vez con un creciente impacto ambiental. Por lo que el uso de energías renovables puede coadyuvar a

* Email: america.zamora@umich.mx



seguir generando crecimiento económico con un menor costo en el cambio climático por lo que el objetivo de esta investigación es determinar el grado de eficiencia de las economías que conforman APEC respecto a la relación existente entre el crecimiento económico, el consumo de energías renovables, el consumo de energías fósiles y las emisiones de dióxido de carbono haciendo dos análisis el primero por grado de industrialización donde se dividen a las economías en dos grupos (economías desarrolladas y en desarrollo) para posteriormente obtener la eficiencia de la metafrontera de las economías objeto del análisis, todo esto a través de un modelo DEA de metafrontera con Badoutputs. Los resultados del trabajo muestran que las economías más eficientes son Corea, Estados Unidos, Hong Kong, Nueva Zelandia, Singapur, Brunéi Darussalam, y Perú acorde a las variables utilizadas.

Palabras clave: cambio climático, APEC, DEA, metafrontera y Badoutput.

Abstract

APEC economies make this area the most dynamic in the world, which leads to an ambivalent panorama with rising economic growth, but at the same time with a growing environmental impact. Therefore, the use of renewable energies can help to continue generating economic growth with a lower cost in climate change, so the objective of this research is to determine the degree of efficiency of the economies that make up APEC with respect to the existing relationship between economic growth, the consumption of renewable energy, the consumption of fossil energy and carbon dioxide emissions, making two analyses, the first by degree of industrialization where the economies are divided into two groups (developed and developing economies) to subsequently obtain the efficiency of the metafrontier of the economies under analysis, all this through a metafrontier DEA model with Badoutputs. The results of the work show that the most efficient economies are Korea, the United States, Hong Kong, New Zealand, Singapore, Brunei Darussalam, and Peru according to the variables used.

Keywords: climate change, APEC, DEA, metafrontier and Badoutput.

Introducción

Durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo — también conocida como Cumbre de la Tierra de Río— en 1992, se estableció el marco regulatorio internacional para enfrentar el cambio climático mediante la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El propósito fundamental de este acuerdo multilateral fue alcanzar niveles de concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEI) que no representaran un peligro para el sistema climático global. Cabe destacar que esta meta ambiental se encuentra intrínsecamente relacionada con dos pilares fundamentales del desarrollo: la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ecológica a largo plazo.

En concordancia con el principio rector establecido en la CMNUCC (1992) de «preservar el sistema climático para las generaciones actuales y venideras, fundamentado en criterios de equidad y en el reconocimiento de responsabilidades compartidas, aunque diferenciadas, según las capacidades nacionales», se han desarrollado múltiples instrumentos de política y acuerdos internacionales en esta materia. Puesto que, dentro de la CMNUCC, se reconoce la vulnerabilidad de todos los países a los efectos del cambio climático, se establece la necesidad de realizar esfuerzos especiales para mitigar dicho impacto. Entre las medidas de control se pueden señalar (UNFCCC, 2022):

- a) Las naciones desarrolladas están obligadas a rendir informes periódicos detallando sus estrategias y acciones climáticas, particularmente en lo concerniente a los compromisos establecidos en el Protocolo de Kioto (en el caso de los Estados signatarios).
- b) Dichas economías avanzadas deben elaborar anualmente un registro pormenorizado de sus emisiones de GEI, el cual debe contener información retrospectiva desde su año de referencia (1990) hasta el presente.
- c) Por su parte, los Estados en vías de desarrollo tienen requerimientos de reporte menos exhaustivos, enfocados tanto en sus iniciativas de mitigación como en sus planes de adaptación climática.

El marco regulatorio internacional conocido como Protocolo de Kioto fue adoptado oficialmente el 11 de diciembre de 1997. Este instrumento jurídico multilateral tiene como objetivo principal materializar los principios establecidos en la CMNUCC, estableciendo compromisos vinculantes para los Estados parte en cuanto a la contención y disminución progresiva de sus emisiones antropogénicas de GEI. Para ello, se acordaron metas individuales acordes al impacto ambiental de cada una de las economías firmantes. Una vez implementadas las políticas y medidas de mitigación, se exige informar periódicamente, de acuerdo con lo establecido en el protocolo. Los principios, disposiciones y estructura que se siguen se encuentran enmarcados en los anexos del Protocolo de Kioto.

Por ejemplo, en el Anexo B, el Protocolo de Kioto establece los objetivos vinculantes de reducción de emisiones para 36 países industrializados y la Unión Europea: al menos un 5.2% respecto de los niveles de emisiones de 1990. Cada uno de los países contaba con diversos mecanismos para cumplir dichas metas, como la inversión en proyectos de energía limpia, el recorte de la contaminación y el comercio de emisiones, entre otros.

Debido a su complejo proceso de ratificación, el protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, bajo la premisa de que debía ser ratificado por países responsables de al menos el 55% de las emisiones globales de dióxido de carbono. La negativa de Estados Unidos a firmarlo desalentó a algunas naciones; no obstante, la incorporación de Rusia, Singapur e Indonesia marcó el cumplimiento de este requisito (véase anexo 1).

La importancia que tiene APEC a nivel mundial es altamente significativa en lo que respecta al concierto económico mundial, puesto que las economías miembro que lo componen representan el 60% de la PIB mundial con aproximadamente 51.3 millones de dólares, el 50% de la población global con 2.9 millones de personas y el 50% del comercio mundial llegando a registrar 9.6 billones de dólares en exportaciones (70% de comercio intrarregional) y 9.9 billones de importaciones (69% de comercio intrarregional) (OMC, 2019). Todos estos factores hacen a la región APEC la más dinámica del mundo, lo que conlleva a un panorama ambivalente: mientras se espera que las economías continúen su crecimiento, este mismo dinamismo agrava el problema ambiental y contribuye al cambio climático.

El modelo tradicional de producción no prevé que el uso de las energías fósiles utilizadas va generando emisiones de dióxido de carbono. Por ello, el impacto del crecimiento económico bajo este sistema será contraproducente para el bienestar de las sociedades si no se adoptan energías renovables, afectando la calidad de los alimentos, su producción, el acceso al agua, la salud y el medio ambiente. De ahí la importancia que reviste analizar el comportamiento de la emisión de dióxido de carbono de las economías que conforman APEC. La tabla 2 permite un primer panorama mostrando las emisiones de dióxido de carbono por kilotón (kt) y toneladas métricas per cápita de manera comparativa en dos periodos 2015 y 2018. Donde resaltan el crecimiento de las emisiones de dióxido de carbono por kt generadas de economías como Vietnam (23.26%), Filipinas (25.13%), Brunéi (19.40%), Indonesia (18.80%) y Papua Nueva Guinea (16.02%) y el crecimiento de toneladas métricas per cápita de Brunéi (16.64%), Canadá (15.50%), Australia (15.48%), Estados Unidos (15.24%) y Rusia (11.13%) (Véase tabla 2).

Cabe señalar que, pese al crecimiento promedio anual relativamente bajo de las emisiones de dióxido de carbono, China, Estados Unidos, Japón y Rusia son los países que más emisiones generan en la zona APEC durante el periodo analizado. No obstante, un aspecto notable de esta región —debido a su localización entre los océanos Pacífico e Índico— es su alta exposición a amenazas climáticas. Así lo evidencia el Índice de Riesgo Climático Global (Eckstein et al., 2021), que destaca a países como Chile (posición 25), Australia (19), China (32), Indonesia (14), Japón (4), Filipinas (17), Rusia (39), Tailandia (34) y Vietnam (38). Por ello, resulta urgente priorizar la transición energética y la reducción de la huella ecológica, junto con estrategias de gestión de riesgos climáticos (véase anexo 2).

Sin embargo, la mayoría de las economías de APEC han comenzado a tomar medidas al respecto cambiando el consumo de energía a energías renovables. Sin embargo, el porcentaje del consumo de este tipo de energías es bajo respecto del total del consumo total como se observa en la tabla 2 donde se puede observar el consumo de energía renovable utilizado por economía del 2018 respecto del 2015 y el crecimiento promedio anual donde se observa que economías como Malasia (55.90%), Japón (16.83%), Corea (16.03%), Singapur (12.74%) y Estados Unidos (11.88%) son las que más han incrementado el uso de este tipo de energías; mientras que economías como Brunéi (-26.85%), Vietnam (-23.53%), Indonesia (-22.59%),

Filipinas (-10.23%), Papua Nueva Guinea (-2.22%), Canadá (-2.03%), Rusia (-0.62%) y Nueva Zelandia (-0.39%) han decrecido el uso de este tipo de energías.

Partiendo de la pregunta de investigación: ¿En qué medida las economías que conforman APEC son eficientes en la relación entre crecimiento económico, consumo de energías renovables y no renovables, y emisiones de CO₂, considerando las diferencias por grado de industrialización a través de un modelo DEA metafrontera con *badoutputs*?, el presente estudio busca evaluar cuantitativamente los niveles de eficiencia en la interrelación entre cuatro variables clave: desarrollo económico, utilización de fuentes energéticas renovables, consumo de combustibles fósiles y generación de CO₂, analizando específicamente cada una de las economías miembro del Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC), haciendo dos análisis: el primero por grado de industrialización, donde se dividen a las economías en dos grupos para posteriormente obtener la metafrontera de las economías objeto del análisis.

El trabajo se compone de cuatro apartados, además de la introducción, donde se plantea la situación problemática y el objetivo de la investigación. Le sigue un apartado relativo a las aproximaciones metodológicas utilizadas para dar respuesta al objetivo planteado. En el tercer apartado se presenta la metodología DEA metafrontera con *badoutputs*. En el cuarto apartado se exponen los resultados derivados de la aplicación de la metodología empleada, así como la discusión de estos. Por último, se plantean las conclusiones.

1. Revisión de literatura

El análisis de la interacción entre desarrollo económico y medio ambiente constituye uno de los campos de estudio más dinámicos en la economía ambiental contemporánea. Desde sus primeras formulaciones teóricas hasta los actuales modelos econométricos avanzados, esta línea de investigación ha evolucionado significativamente, generando un corpus de conocimiento cada vez más sofisticado y matizado. La presente revisión examina críticamente esta evolución, prestando especial atención a los fundamentos conceptuales, los principales hallazgos empíricos y los debates metodológicos que continúan dando forma a este campo de estudio.

Los cimientos teóricos de esta área de investigación se remontan a mediados del siglo XX, cuando los primeros trabajos comenzaron a cuestionar la compatibilidad entre el crecimiento económico continuo y los límites biofísicos del planeta. El informe del Club de Roma "Los límites del crecimiento" (Meadows et al., 1972) marcó un hito fundamental al plantear, mediante modelos de simulación computacional, que la trayectoria de crecimiento económico predominante conduciría inevitablemente al colapso ecológico. Este enfoque fue complementado por Mesarovic y Pestel (1975), quienes introdujeron importantes matices al argumentar que estos límites no eran absolutos, sino que variaban según regiones y contextos específicos. Paralelamente, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en Estocolmo en 1972 representó el primer reconocimiento formal de la problemática ambiental como asunto de agenda global, sentando las bases para lo que posteriormente se conceptualizaría como desarrollo sostenible (Panayotou, 1997).

La evolución de estos debates teóricos ha estado acompañada por un creciente cuerpo de evidencia empírica que busca comprender los mecanismos específicos que vinculan las variables económicas con los resultados ambientales. Un área particularmente relevante ha sido el estudio del nexo entre energía y crecimiento económico, donde destacan los trabajos de Chen y Lee (2022). Estos autores realizaron un metaanálisis exhaustivo de 45 estudios empíricos, encontrando que las mejoras en eficiencia energética tienen impactos económicos positivos significativos, especialmente en contextos de países en desarrollo. Sus resultados cuantitativos revelan que un incremento del 10% en eficiencia energética se asocia con un aumento promedio del 1.2% en el PIB per cápita, efecto que opera a través de tres canales principales: la reducción de costos productivos (que explica aproximadamente el 35% del efecto total), el estímulo a la innovación tecnológica (responsable del 45% del impacto) y la creación de empleo en sectores verdes (que contribuye con el 20% restante).

Estos hallazgos generales, sin embargo, presentan importantes variaciones cuando se examinan contextos específicos. La investigación de Ali et al. (2023) en las economías MINT (México, Indonesia, Nigeria y Turquía) reveló patrones notablemente más complejos, donde los resultados ambientales dependen críticamente de la combinación particular de fuentes energéticas y políticas industriales implementadas en cada país. Por ejemplo, mientras que Indonesia mostró mejoras significativas en indicadores ambientales al aumentar su

participación de energías renovables, Nigeria experimentó retrocesos a pesar de similares esfuerzos, debido principalmente a la falta de coordinación entre sus políticas energéticas e industriales. Estas diferencias subrayan la importancia de considerar factores institucionales y contextuales al analizar la relación entre desarrollo económico y medio ambiente.

La hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC) ha ocupado un lugar central en estos debates teóricos y empíricos. Formulada originalmente por Selden (1994) y posteriormente desarrollada por Dasgupta et al. (2002), Catalán (2014) y Terán-Pérez et al. (2025), esta teoría postula una relación no lineal entre desarrollo económico y degradación ambiental. Según este marco conceptual, las sociedades experimentarían inicialmente un deterioro ambiental durante las primeras etapas de desarrollo industrial, seguido por una fase de mejora una vez alcanzado cierto umbral de ingresos, resultando en una curva con forma de U invertida. La evidencia empírica reciente ofrece apoyo mixto a esta hipótesis. Por un lado, estudios como el de Moutinho et al. (2024) han encontrado patrones consistentes con la EKC al analizar el impacto de las energías renovables en las emisiones de CO₂ en diversos contextos nacionales. Sus análisis, que emplearon técnicas de frontera estocástica, demostraron que el punto de inflexión de la curva varía significativamente según el nivel tecnológico y la estructura industrial de cada economía. De igual manera, Luo y Sun, (2024) al analizar datos de las economías del G20, los resultados indicaron que la eficiencia energética redujo la huella ecológica y que la EKC es válida, la eficiencia energética conduce a una reducción del consumo de combustibles fósiles, disminuyendo así la presión ecológica.

Por otro lado, investigaciones como las de Tchatchet-Tchouto et al. (2024) en países nórdicos cuestionan la universalidad de la EKC. Su estudio longitudinal (2005-2019) reveló que incluso economías avanzadas con altos niveles de ingreso per cápita pueden mantener trayectorias ambientales problemáticas, particularmente cuando su crecimiento se basa en modelos intensivos en recursos naturales. Estos hallazgos sugieren que el mero crecimiento económico no garantiza necesariamente mejoras ambientales, sino que estas dependen crucialmente de las políticas específicas implementadas y de la estructura productiva de cada país. Resultados similares fueron reportados por Stern (2016), quien encontró que muchos países desarrollados continúan mostrando aumentos en sus emisiones absolutas de CO₂ a pesar de haber alcanzado los supuestos umbrales de ingreso predichos por la EKC.

Estas discrepancias han generado importantes debates metodológicos en la literatura reciente. Stern (2004, 2016) y Wagner (2008) han cuestionado tanto los fundamentos teóricos como los resultados empíricos de la hipótesis de la EKC, señalando limitaciones fundamentales en los modelos tradicionales. Una crítica particularmente relevante apunta a que muchos estudios han subestimado problemas metodológicos clave, incluyendo la heterogeneidad no observada entre países, los quiebres estructurales en las series temporales y los efectos de dependencia espacial (Atwi et al., 2018). Estos problemas pueden llevar a conclusiones erróneas cuando no son adecuadamente considerados en los análisis. Por ejemplo, Atwi et al. (2018) demostraron que, al controlar por heterogeneidad no observada y dependencia espacial en un panel de 182 países, muchos de los supuestos puntos de inflexión de la EKC perdían significación estadística.

Estas limitaciones metodológicas han impulsado el desarrollo de enfoques analíticos más sofisticados. Wang (2011) propuso el uso de técnicas no paramétricas, como splines polinomiales adaptativos, que permiten capturar relaciones no lineales complejas sin imponer formas funcionales predeterminadas. Estos métodos han revelado que la relación entre ingreso y calidad ambiental puede adoptar formas mucho más variadas que la simple U invertida postulada por la EKC tradicional. Paralelamente, los avances en técnicas de panel dinámico han permitido abordar mejor, problemas de endogeneidad y causalidad inversa, que frecuentemente afectan los estudios en este campo (Halkos & Polemis, 2017).

La aplicación de técnicas de Análisis Envolvente de Datos (DEA) ha representado otro avance metodológico significativo. Arora et al. (2025) demostraron el potencial de estas metodologías al analizar la eficiencia ambiental de diferentes países utilizando un innovador enfoque de meta-frontera. Su estudio, que consideró múltiples inputs y outputs ambientales simultáneamente, reveló patrones interesantes: tanto países de altos ingresos (como Suecia y Suiza) como algunos de bajos ingresos (como Bangladesh y Etiopía) alcanzaron altos niveles de eficiencia ambiental, mientras que muchas economías de ingresos medios (particularmente en América Latina y Europa del Este) mostraron desempeños notablemente peores. Estos resultados sugieren que la relación entre nivel de desarrollo y desempeño ambiental es más compleja que lo predicho por modelos lineales simples.

En ese mismo sentido IEA (2024) y OECD (2024) destacan que la adopción de tecnologías verdes no es el único mecanismo ni suficiente para garantizar eficiencia, por lo que es necesario desarrollar capacidades de absorción locales, fortalecer la gobernanza de la innovación y alinear incentivos públicos y privados para cerrar las brechas tecnológicas identificadas en el presente estudio.

Estos hallazgos han sido complementados por estudios de caso específicos que examinan patrones subnacionales y sectoriales. Camioto y Pulita (2022) aplicaron técnicas DEA para comparar el desempeño ambiental de diversas economías emergentes, encontrando notables diferencias entre países como India, China y Brasil. Sus resultados indican que factores institucionales (como la calidad de la gobernanza ambiental) y tecnológicos (como la capacidad de absorción de tecnologías limpias) juegan roles tan importantes como el nivel de ingreso per cápita en determinar los resultados ambientales. A través de la metodología DEA-SMB y el enfoque del Índice de Productividad de Malmquist Tachea, et al (2021) realizan un estudio de los determinantes de la eficiencia energética en 14 países productores de petróleo de África durante el período 2010-2017 donde los resultados demuestran que la liberalización del comercio y la población influyeron positivamente en la eficiencia energética de los países africanos productores de petróleo. Sin embargo, no existe una relación en forma de U entre la eficiencia energética y el PIB, lo que sugiere que la eficiencia energética no mejora con el crecimiento económico.

En la misma línea, Wei et al. (2024) realizaron un análisis sectorial detallado en China, revelando que incluso dentro de una misma economía nacional pueden coexistir industrias con patrones radicalmente distintos de desempeño ambiental.

Los estudios a nivel subnacional han aportado evidencias particularmente valiosas para entender estas complejidades. Rosa (2022) analizó las diferencias ambientales entre los 27 estados brasileños, demostrando que regiones con niveles similares de desarrollo económico pueden presentar trayectorias ambientales marcadamente diferentes según sus estructuras productivas y marcos regulatorios. Por ejemplo, estados con fuerte especialización en

agricultura intensiva mostraron patrones de degradación ambiental significativamente mayores que estados con similar nivel de ingreso, pero economías más diversificadas. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar factores locales e institucionales en el análisis de la relación economía-medio ambiente.

Los debates actuales en la literatura reflejan una creciente sofisticación en la comprensión de estas interacciones complejas. Por un lado, persiste la discusión fundamental sobre la posibilidad de reconciliar crecimiento económico y sostenibilidad ambiental, con posiciones que van desde el optimismo tecnológico (que enfatiza el potencial de la innovación para desacoplar crecimiento y degradación ambiental) hasta perspectivas más escépticas que argumentan la necesidad de cambios estructurales profundos en los patrones de producción y consumo (Jackson, 2016). Por otro lado, los avances metodológicos continúan transformando el campo, con una creciente integración de técnicas avanzadas como el análisis de redes, los modelos multinivel y los enfoques de sistemas complejos.

Un desarrollo particularmente promisorio es la creciente disponibilidad y uso de datos ambientales de alta resolución espacial y temporal. Los estudios que aprovechan estas nuevas fuentes de datos están permitiendo análisis más precisos de las dinámicas locales y sus interacciones con factores macroeconómicos (Buntaine et al., 2021). Paralelamente, la integración de perspectivas interdisciplinarias (combinando insights de la economía, la ecología, las ciencias políticas y la sociología) está enriqueciendo significativamente la comprensión de estos fenómenos complejos.

Finalmente, es importante destacar que la literatura reciente está prestando creciente atención a las dimensiones distributivas y de justicia ambiental. Estudios como los de Boyce (2018) y Mohai et al. (2009) han demostrado que los impactos ambientales del desarrollo económico están distribuidos de manera altamente desigual, afectando desproporcionadamente a poblaciones vulnerables y comunidades marginadas. Esta línea de investigación está ampliando el alcance tradicional de los estudios economía-medio ambiente, incorporando consideraciones sobre equidad intergeneracional, justicia espacial y derechos ambientales.

En síntesis, la revisión de la literatura revela un campo de estudio dinámico y en constante evolución, donde persisten importantes debates teóricos y metodológicos. Mientras algunos autores enfatizan la existencia de patrones generalizables en la relación entre economía y medio ambiente, otros destacan la importancia de los contextos específicos y la necesidad de enfoques analíticos más sofisticados. Lo que emerge claramente es que el desafío de conciliar desarrollo económico y sostenibilidad ambiental requiere aproximaciones cada vez más matizadas, interdisciplinarias y sensibles a las particularidades de cada contexto geográfico, institucional y temporal.

Los acuerdos internacionales más recientes han reforzado la necesidad de acelerar la transición energética y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos. En la Conferencia de las Partes (COP29, 2024) se subrayó que el cumplimiento de los compromisos climáticos no puede lograrse únicamente mediante metas de mitigación, sino que exige una transformación estructural de los sistemas energéticos, productivos y financieros. Asimismo, se destacó la urgencia de incrementar la participación de energías renovables en la matriz energética global y de adoptar métricas más precisas para evaluar la eficiencia, incorporando dimensiones de equidad intergeneracional y resiliencia climática.

De manera complementaria, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015) constituyen un marco normativo global que orienta las políticas y la investigación en torno al nexo entre energía, medio ambiente y desarrollo económico. En particular, el ODS 7 plantea la necesidad de garantizar el acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, mientras que el ODS 13 llama a tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La literatura reciente coincide en que los avances en eficiencia energética no solo contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también son un mecanismo transversal para alcanzar múltiples ODS, al incidir en la productividad económica, la innovación tecnológica y la justicia ambiental.

2. Metodología

El análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) es un método determinista y no paramétrico, dado que no requiere la especificación de una forma funcional predefinida. En este enfoque, toda desviación respecto a la frontera de eficiencia se interpreta como un

indicador de ineficiencia. Esta técnica evalúa el desempeño relativo de las unidades de toma de decisiones (DMU), clasificándolas en eficientes e ineficientes, y estableciendo metas de optimización para las últimas con base en los resultados de las primeras. Así, el DEA funciona como un mecanismo de *benchmarking*, utilizando exclusivamente datos observables de las unidades analizadas, sin requerir supuestos teóricos adicionales (Navarro, 2005).

Las DMU, en este caso las economías, en diferentes industrias, sectores y/o regiones enfrentan diferentes oportunidades de producción (O'Donnell et al., 2008). Técnicamente, toman decisiones desde diferentes conjuntos de las posibles combinaciones de *inputs* y *outputs*. Esto se conoce como conjuntos tecnológicos, los cuales difieren por las disparidades en la disponibilidad de capital físico, humano y financiero; la infraestructura económica del lugar donde se encuentran; y cualquier otra característica del ambiente físico, social y económico donde se realiza la producción.

Estas diferencias han llevado a que las investigaciones de eficiencia se estimen mediante fronteras de producción separadas para diferentes grupos, en este caso, economías. Por ejemplo, McMillan y Chan (2006) calcularon fronteras separadas para un estudio de universidades en Canadá, donde O'Donnell y Van der Westhuizen (2002) realizaron cálculos similares para un estudio de bancos en Sudáfrica, entre otros.

Gracias a los fundamentos para el estudio de la eficiencia propuestos por Farrell (1957), esta puede medirse a través de dos metodologías: la estimación de fronteras estocásticas, que implica el uso de econometría, y las mediciones DEA, que recurren al *benchmarking* y a algoritmos de programación lineal.

La programación lineal constituye una herramienta fundamental en el estudio de la gestión óptima de recursos al interior de las organizaciones. Este método revolucionó la teoría de la producción, destacándose principalmente por su aplicabilidad computacional. Entre sus características esenciales se encuentran (Pinzón, 2003):

- Presencia de múltiples limitaciones o condiciones restrictivas.

- Estabilidad en los niveles productivos y en los costos de los factores, que permite representaciones gráficas lineales tanto de las restricciones presupuestarias como de las curvas de isocosto.
- Existencia de escalas de producción constantes y combinaciones tecnológicamente fijas entre insumos, lo que genera trayectorias de expansión lineal desde el origen.

Conceptualmente, la programación lineal representa un subconjunto particular dentro de la programación matemática, caracterizado por la linealidad de todas sus funciones componentes. Presenta invariablemente una función objetivo lineal (ya sea de maximización o minimización) sujeta a un conjunto de limitaciones igualmente lineales. Las variables involucradas, de naturaleza continua y por tanto susceptibles de adoptar valores fraccionarios, están restringidas al dominio de los números no negativos. Cabe destacar que su implementación exige un conocimiento preciso de todos los parámetros y recursos considerados en el modelo (Serra, 2004).

El análisis de eficiencia se realiza mediante la construcción de una metafrontera de referencia, conceptualizada como la envolvente de un conjunto tecnológico no restringido. Este enfoque requiere previamente la definición de fronteras grupales, las cuales representan los límites de conjuntos tecnológicos condicionados por factores contextuales como limitaciones infraestructurales y características específicas del ambiente productivo (O'Donnell et al., 2010). La metafrontera engloba así todas las fronteras grupales existentes.

Desde esta perspectiva analítica, los índices de eficiencia obtenidos mediante la metafrontera admiten una descomposición bifactorial:

1. Eficiencia intragrupo: Cuantifica la distancia entre un punto *input-output* particular y su frontera grupal correspondiente (equivalente a la eficiencia técnica convencional en DEA).
2. Brecha tecnológica: Mide la disparidad existente entre la frontera grupal y la metafrontera global.

Se ha seleccionado un modelo de frontera no paramétrica de carácter determinista, en el cual las unidades consideradas eficientes son las que delimitan y configuran la frontera de

referencia. Por ende, no requiere la especificación de una forma funcional para la frontera, ni de la existencia de un término de perturbación es por ello por lo que se le considere determinística, de este modo este tipo de fronteras para la medición de la eficiencia permiten una gran flexibilidad operativa.

El enfoque DEA permite incorporar diferentes supuestos sobre rendimientos de escala. Entre las especificaciones más utilizadas destacan los modelos de rendimientos constantes (CRS) y variables (VRS) a escala. Para determinar la especificación más apropiada en este estudio, se implementará un procedimiento comparativo que evalúe ambos enfoques, donde el criterio de selección se basará en:

1. El grado de concordancia entre los resultados obtenidos: cuando exista alta consistencia entre ambas estimaciones, se optará por el modelo CRS por su mayor parsimonia.
2. La presencia de divergencias significativas: en cuyo caso se preferirá el modelo VRS por su mayor flexibilidad para capturar variaciones en la eficiencia escalar (Mohammady, 2006 citado en Zamora, 2017).

La decisión de utilizar un modelo de rendimientos constantes a escalas o CRS considera sigue la recomendación del trabajo de Fare *et al* (1994) donde sostienen que el índice de productividad de Malmquist debe basarse para la medición del cambio de productividad en la distancia relativa de las funciones definidas respecto a la caracterización tecnológica por lo que un modelo CRS provee un resultado más preciso.

Así mismo, Grifell y Lovell (1995) señalan que al utilizar modelos VRS en el tipo de modelo propuesto no se obtiene una medida precisa de cambio en la productividad, debido a que se bajo ese supuesto se omiten las contribuciones de economías de escala en el cambio de productividad, lo cual es un componente esencial del análisis.

De tal manera que para el análisis se proponen dos modelos uno de tipo estático CRS y otro dinámico CRS, que a continuación se presentan:

a) Modelo estático CRS con orientación *output*:

$$\begin{aligned}
 & \text{maximizar}_{\phi_{it}, \lambda_{it}} \phi_{it} \\
 \text{Sujeto a:} & \\
 & \phi_{it} y_{it} - y' \lambda_{it} \leq 0, \\
 & X \lambda_{it} - x_{it} \leq 0, \\
 & j' \lambda_{it} = 1 \text{ y} \\
 & \lambda_{it} \geq 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

y_{it} es la cantidad de *output* para la i aduana en el t periodo;

x_{it} es el vector $N \times 1$ de la cantidad *input* para la i aduana en el t periodo;

y es el vector $L_k T \times 1$ de la cantidad *output* para todas L_k aduanas en todos los T periodos;

X es la matriz $N \times L_k T$ de la cantidad *input* para todas L_k aduanas en todos los T periodos;

j es un vector $L_k T \times 1$ de unos;

λ_{it} es un vector $L_k T \times 1$ de pesos; y

ϕ_{it} es un valor escalar.

b) Modelo dinámico CRS orientación *output*:

Para calcular y descomponer la productividad de la aduana k' entre t y $t + 1$, se necesitan resolver seis diferentes problemas de programación lineal: $D^t(x^t, y^t)$, $D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$, $D^I(x^t, y^t)/D^t(x^t, y^t)$, $D^I(x^{t+1}, y^{t+1})/D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$, $D^G(x^t, y^t)/D^I(x^t, y^t)$ y $D^G(x^{t+1}, y^{t+1})/D^I(x^{t+1}, y^{t+1})$. Suponiendo que la distancia de la función *output* es el recíproco de la medida de eficiencia técnica de Farrell (1957) basada en el *output*.

En este sentido se calculan las funciones de distancia *output* para $k' \in R_j$ en cada periodo del tiempo $s = t, t + 1$,

$$[D^S(x^{k',s}, y^{k',s})]^{-1} = \text{maximizar } \phi_c^{k',s}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in R_j} \lambda^k y_m^{k,s} \geq \phi_c^{k',s} y_m^{k',s}, \quad m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{k \in R_j} \lambda^k x_n^{k,s} \leq x_n^{k',s}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$z^{k,s} \geq 0, \quad (2)$$

donde: λ^k es una variable de intensidad que indica en qué intensidad una actividad en particular puede ser empleada en la producción.

Con la solución a la ecuación (2) como $\hat{\phi}_c^{k',s}$, las funciones de distancia intertemporal $D^I(x^{k',s}, y^{k',s})/D^{k',s}(x^{k',s}, y^{k',s}), s = t, t + 1$ son calculadas de la siguiente manera:

$$[D^I(x^{k',s}, y^{k',s})/D^{k',s}(x^{k',s}, y^{k',s})]^{-1} = \text{maximizar } \phi_l^{k'}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in R_j, s \in \tau} \lambda^{k,s} y_m^{k,s} \geq \phi_l^{k'} \hat{\phi}_c^{k',s} y_m^{k',s}, \quad m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{k \in R_j, s \in \tau} \lambda^{k,s} x_n^{k,s} \leq x_n^{k',s}, \quad n = 1, \dots, N,$$

$$z^{k,s} \geq 0 \quad \tau = \{1, 2, \dots, T\}. \quad (3)$$

La ecuación (3) involucra todas las observaciones en todos los periodos dentro de un grupo R_j específico.

Por otro lado, en contraste con la ecuación (2) y (3), la función de distancia global involucra todas las observaciones, todos los periodos en todos los grupos. Con la solución a la ecuación (3) como $\hat{\phi}_l^{k'}$, las funciones de distancia global $D^G(x^{k',s}, y^{k',s})/D^I(x^{k',s}, y^{k',s}), s = t, t + 1$ son calculadas de la siguiente manera:

$$[D^G(x^{k',s}, y^{k',s})/D^{k',s}(x^{k',s}, y^{k',s})]^{-1} = \text{maximizar } \phi_G^{k'}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in R, s \in \tau} z^{k,s} y_m^{k,s} \geq \phi_G^{k'} \hat{\phi}_I^{k'} y_m^{k',s}, \quad m = 1, \dots, M$$

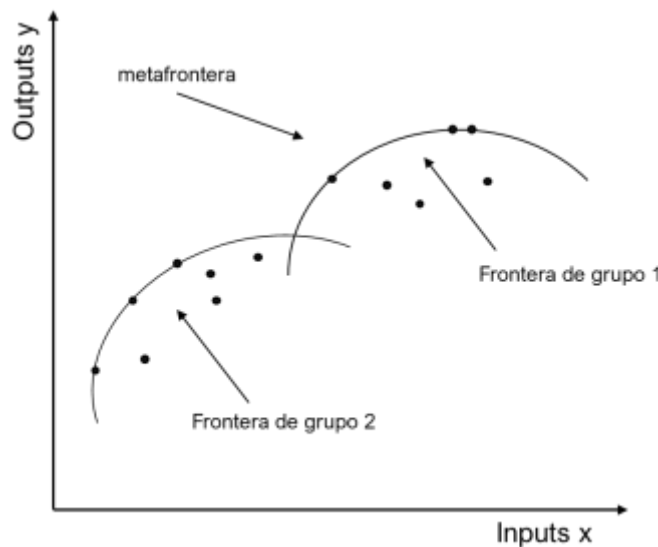
$$\sum_{k \in R, s \in \tau} z^{k,s} x_n^{k,s} \geq x_n^{k',s}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$z^{k,s} \geq 0, R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_J, \quad \tau = \{1, 2, \dots, T\}. \quad (4)$$

Las soluciones óptimas de las ecuaciones (2) y (3) se emplean en el cálculo y descomposición del índice de productividad metafrontera, lo cual se representa de manera gráfica como se observa en la figura 1.

Figura 1

Modelo de la función de meta-frontera



Nota: Elaboración propia con base en (Melo, 2015).

2.1. Área de estudio y selección de variables

Las economías objeto de análisis de la presente investigación conforman el Foro de Cooperación Económica Asia Pacífico, considerando 17 de las 21 economías debido a la disponibilidad de datos, divididas en dos grupos acorde a su grado de industrialización acorde con la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (2019), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Economías de APEC por grado de industrialización

Economías industrializadas	Economías en desarrollo
Australia	Brunéi Darussalam
Canadá	Chile
Hong Kong (China)	Federación de Rusia
Japón	Filipinas
Nueva Zelanda	Indonesia
República de Corea	Malasia
República Popular de China	México
Singapur	Papúa Nueva Guinea
Estados Unidos	Perú
	Tailandia
	Taiwán
	Vietnam

Nota: Datos obtenidos de (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (2019)).

El estudio busca examinar los vínculos entre el desarrollo económico, el uso de fuentes energéticas (renovables y no renovables) y su impacto en la generación de contaminantes. Para este análisis, se emplearon datos oficiales extraídos de los *World Development Indicators* (WDI), disponibles en las plataformas estadísticas del Banco Mundial (2024). A continuación (ver tabla 2), se detallan las variables seleccionadas para la modelización.

Tabla 2

Variables del modelo

Inputs	Outputs	Badoutputs
Formación bruta de capital fijo	Producto Interno Bruto per cápita	Emisiones de CO ₂
Fuerza laboral		
Consumo de energía fósil		
Consumo de energía renovable		

Nota: Datos obtenidos de (Banco Mundial, 2024)

Prueba de colinealidad y robustez del modelo

Con el propósito de reforzar la robustez y estabilidad del modelo DEA metafrontera, se realizó un análisis exploratorio de colinealidad entre los insumos seleccionados: formación bruta de capital fijo, fuerza laboral, consumo de energía fósil, Producto Interno Bruto, emisiones de CO₂ y consumo de energía renovable. Para ello, se calcularon los factores de inflación de la varianza (VIF).

Los resultados (véase Anexo 1) muestran que los coeficientes de correlación entre insumos son moderados ($r < 0.10$) y que todos los valores VIF se mantienen por debajo de 10, lo cual indica que no existen problemas significativos de multicolinealidad. En consecuencia, los insumos pueden considerarse estadísticamente independientes, garantizando la estabilidad de las medidas de eficiencia obtenidas y la solidez de la metafrontera estimada.

3. Resultados

Se realizó un análisis estático para el periodo seleccionado. La Tabla 3 muestra los resultados del análisis DEA metafrontera para la medición de la eficiencia, presentando los resultados por grupo de las principales economías de la región Asia-Pacífico.

En la Tabla 3 se observa que destacan algunas economías desarrolladas por su eficiencia dentro de su grupo (economías Grupo 1) respecto a las variables analizadas. Las economías de Corea, Estados Unidos, Hong Kong, Nueva Zelanda y Singapur obtuvieron valores de 1 (eficiencia máxima) y, por lo tanto, se consideraron como modelos de referencia para las demás unidades de este grupo. Por otro lado, en el Grupo 2, compuesto por economías en desarrollo de APEC, Brunéi Darussalam, Chile, Rusia, Malasia y Perú fueron las que alcanzaron valores de eficiencia dentro de su grupo.

Tabla 3

Resultados por grupos de análisis

Economías Grupo 1	Frontera grupos	Economías Grupo 2	Frontera grupos
Australia	0.887324	Brunéi Darussalam	1
Canadá	0.959747	Chile	1
China	0.500961	Federación de Rusia	1
Corea, República de	1	Filipinas	0.658649
Estados Unidos	1	Indonesia	0.981035
Hong Kong	1	Malasia	1
Japón	0.693696	México	0.514043
Nueva Zelandia	1	Perú	1
Singapur	1	Tailandia	0.964971

Nota: Los resultados muestran un valor de 1 en las economías eficientes y un valor < 1 en las economías no eficientes. Los resultados se dividen por grupo acorde a su grado de industrialización (véase tabla 1).

Sin embargo, al examinar los resultados de la metafrontera, que se encuentran vertidos en la cuarta columna de la tabla 4 son las economías de Corea, Estados Unidos, Hong Kong, Nueva Zelandia, Singapur, Brunéi Darussalam, y Perú las que lograron valores 1 de eficiencia, posicionándose como líderes en la metafrontera. En tanto que, Chile, Rusia y Malasia que mostraron valores de eficiencia en su grupo al ser analizados en la metafrontera no mostraron un desempeño óptimo.

Tabla 4

Resultados de Metafrontera

NO	Economías	Grupo de pertenecía	Eficiencia Metafrontera	Radio de rezago tecnológico
1	Australia	1	0.887324	1
2	Brunéi Darussalam	2	1	1
3	Canadá	1	0.959747	1
4	Chile	2	0.584778	0.584778
5	China	1	0.500448	0.998976
6	Corea, República de	1	1	1
7	Estados Unidos	1	1	1
8	Federación de Rusia	2	0.532241	0.532241
9	Filipinas	2	0.622441	0.945027
10	Hong Kong,	1	1	1
11	Indonesia	2	0.547091	0.557667
12	Japón	1	0.693696	1
13	Malasia	2	0.537346	0.537346
14	México	2	0.509117	0.990417
15	Nueva Zelandia	1	1	1
16	Perú	2	1	1
17	Singapur	1	1	1
18	Tailandia	2	0.564077	0.584553

Nota: La tercer columna muestra el grupo de pertinencia, la cuarta el grado de eficiencia de metafrontera donde los resultados muestran un valor de 1 en las economías eficientes y un valor < 1 en las economías no eficientes y la última columna muestra los resultados de radio de rezago tecnológico donde el valor de 1 muestra que no existe rezago tecnológico.

Otro indicador relevante derivado del análisis de metafrontera es el *radio de rezago tecnológico*, que cuantifica la brecha en innovación para un grupo específico, comparando la tecnología disponible para dichas economías con la tecnología existente en toda la industria. De tal manera que, es la medida de la brecha tecnológica entre cada una de las economías respecto de frontera de producción eficiente, por lo que permite evaluar la eficiencia tecnológica y determinar en qué medida cada economía está o no aprovechando al máximo sus recursos e insumos, lo que puede indicar un rezago tecnológico.

Un valor de 1 indica que, independientemente de su eficiencia en la metafrontera, las economías están implementando la tecnología disponible —en este caso, para la mejora ambiental—, lo que podría sugerir un incremento futuro en su eficiencia. Por el contrario, un valor inferior a 1 señalaría un posible rezago tecnológico respecto a otras economías.

Los resultados (Tabla 4) muestran que las economías con valor de 1 en el radio de rezago tecnológico fueron: Australia, Brunéi Darussalam, Canadá, Corea, Estados Unidos, Hong Kong, Japón, Nueva Zelanda, Perú y Singapur; es decir son las economías que están a la vanguardia tecnológica respecto de su frontera y las variables analizadas. En contraste, Rusia y Malasia presentaron los mayores rezagos tecnológicos.

Los resultados del modelo DEA metafrontera permiten identificar economías con desempeños destacados en términos de eficiencia global. Entre estos casos, resulta interesante el desempeño de Nueva Zelanda y Brunéi Darussalam, las cuales alcanzaron valores máximos tanto en la frontera grupal como en la metafrontera, este desempeño puede atribuirse a una combinación de factores como son políticas energéticas consistentes combinado a sus ventajas geográficas, ya que la matriz energética del país se caracteriza por una elevada participación de energías renovables (particularmente hidroeléctrica y geotérmica) que representa el 31.04%. Adicionalmente, el país ha implementado instrumentos de política climática como el esquema de comercio de emisiones (NZ ETS) y el *Electricity Industry Act*, que promueven la transición energética y la eficiencia en el uso de recursos.

En el caso de Brunéi Darussalam pese a que históricamente ha sido una economía basada en hidrocarburos ha logrado posicionarse como eficiente en la metafrontera mediante la implementación de medidas de eficiencia energética en su sector petrolero y el impulso a

proyectos de energías solar y biocombustibles, en el marco de la *Brunei National Climate Change Policy*. Cabe señalar que su escala territorial y tamaño poblacional facilita una gestión centralizada de la transición energética, minimizando los costos de coordinación y permitiendo una adopción tecnológica más rápida y estandarizada.

Por otra parte se observa que economías como Malasia presentan un alto crecimiento en renovables pero a la par un bajo desempeño en la metafrontera (0.537) y un rezago tecnológico significativo (0.537), lo cual puede explicarse por dos factores: 1) limitaciones en la integración de las energías renovables de manera sistémica, es decir, acompañadas de un sistema de distribución y almacenamiento que vaya acompañado con la capacitación laboral que permita operar y mantener dichos sistemas, y 2) fragmentación regulatoria puesto que, Malasia carece de una política energética integral que articule incentivos fiscales, estándares de eficiencia industrial y mecanismos de monitoreo continuo debilita la gobernanza del sector y limita las sinergias entre fuentes renovables y reducción de emisiones.

Estos resultados sugieren que, más allá de la expansión cuantitativa de las energías renovables, se requieren inversiones estratégicas en infraestructura de red, formación técnica y coordinación interinstitucional para transformar la adopción tecnológica en ganancias sustantivas de eficiencia energética y ambiental.

4. Discusión

Mientras Moutinho et al. (2024) validan la EKC en economías avanzadas, el análisis realizado muestra que Estados Unidos y Australia — pese a su alta eficiencia— mantienen elevadas emisiones per cápita (Tabla 2). Esto cuestiona la universalidad de la EKC y sugiere que la eficiencia técnica no siempre se traduce en sostenibilidad ambiental, coincidiendo con las críticas de Stern (2016) sobre los límites del PIB como indicador de desempeño ecológico.

Resalta el caso de China puesto que ilustra la dicotomía entre crecimiento económico y sostenibilidad, ya que, aunque mostró mejoras en consumo de renovables (+1.58%), sigue siendo el mayor emisor de CO₂ en APEC. Esto respalda a Wagner (2008), quien argumenta

que los modelos tradicionales subestiman cómo economías exportadoras externalizan su huella ambiental mediante cadenas globales de suministro.

Dentro de las implicaciones para la teoría de la eficiencia energética que se desprende del presente trabajo destacan dos: 1. El éxito de las economías city-states (Hong Kong, Singapur) sugiere que la escala reducida y la especialización en servicios facilitan la eficiencia, apoyando a O'Donnell et al. (2008). Sin embargo, esto no es replicable en economías continentales como Canadá o Rusia, donde la diversidad geográfica y productiva complica la estandarización, y 2. El rezago tecnológico de Malasia (0.53) contradice su alto crecimiento en renovables (+55.9%). Esto indica que la mera adopción de tecnologías verdes no garantiza eficiencia si no va acompañada de capacitación laboral e infraestructura, una brecha señalada por Tachea et al. (2021) en contextos africanos.

Cabe señalar que la metodología empleada no considera variables institucionales como, por ejemplo: corrupción o calidad regulatoria, clave según Dasgupta et al. (2002) para explicar diferencias en eficiencia. Países como México podrían verse penalizados en el modelo por factores ajenos a su capacidad técnica.

Sin embargo, la metodología DEA metafrontera con *badoutputs* demuestra ser útil para comparar economías heterogéneas, ampliando estudios previos (Camimoto & Pulita, 2022). Además, provee un marco cuantitativo para evaluar compromisos climáticos del APEC bajo el Acuerdo de París.

Adicionalmente, los resultados del modelo no solo permiten identificar economías líderes en eficiencia, sino que también ofrecen una base valiosa para diseñar mecanismos de cooperación tecnológica y transferencia de mejores prácticas dentro de APEC. Las economías que mostraron mayor eficiencia como lo fueron Corea, Estados Unidos, Singapur, Hong Kong, Nueva Zelandia, Brunéi Darussalam y Perú, pueden servir como referentes para aquellas con menores desempeños, siempre que se consideren sus contextos estructurales y tecnológicos específicos.

En el caso de Corea, los resultados de eficiencia pueden atribuirse en gran medida a la implementación de políticas sólidas de investigación y desarrollo en energías limpias, complementadas con incentivos fiscales y esquemas de colaboración público-privada

orientados al desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético y redes inteligentes. Dichas experiencias podrían ser adaptadas por economías en desarrollo con perfiles industriales similares, como es el caso de México o Malasia, mediante programas de capacitación técnica y mecanismos de financiamiento compartido.

Perú, por su parte, constituye un caso destacable al ser la única economía en desarrollo que alcanzó eficiencia máxima en la metafrontera. Este resultado parece asociarse a su significativa participación de fuentes hidroeléctricas, así como a políticas locales de sostenibilidad que han facilitado la integración de energías renovables en zonas rurales y de difícil acceso. Esto podría servir de benchmarking para economías como Chile o Indonesia, que enfrentan el desafío de conciliar el crecimiento económico con la reducción de emisiones en contextos geográficamente diversos.

Asimismo, las economías de tipo *city-state*, como Singapur y Hong Kong, han optimizado su desempeño mediante la digitalización de sistemas energéticos y la regulación estricta de emisiones en sectores logísticos y financieros. Si bien su escala territorial limita la replicabilidad directa en economías continentales como Rusia o Australia, sus avances en gestión urbana baja en carbono y transporte sostenible pueden inspirar reformas regulatorias en grandes metrópolis de otros países miembro.

Finalmente, los valores inferiores a 1 en el indicador de rezago tecnológico — observados en economías como Malasia, Rusia y Chile— evidencian que la mera incorporación de tecnologías verdes resulta insuficiente sin el desarrollo paralelo de capacidades locales en operación y mantenimiento. En este contexto, iniciativas de intercambio técnico facilitadas por los mecanismos de cooperación del APEC, como programas de pasantías especializadas o redes de expertos, podrían acelerar significativamente la curva de aprendizaje tecnológico.

Con base en los hallazgos del estudio, se sugiere que los responsables de política energética en el ámbito APEC consideren: (i) establecer metas mínimas de inversión en investigación y desarrollo de tecnologías limpias; (ii) diseñar mecanismos de financiamiento verde dirigidos específicamente a economías con mayor rezago tecnológico; y (iii) promover consorcios de innovación que faciliten la transferencia de conocimiento en eficiencia

energética y reducción de emisiones. Estas acciones, derivadas directamente del análisis de eficiencia realizado, refuerzan el papel del APEC como plataforma idónea para impulsar una transición energética inclusiva y basada en evidencia empírica.

5. Conclusiones

La metodología DEA metafrontera permite observar dos tipos de eficiencia: una respecto del universo en su totalidad (eficiencia de metafrontera) y la segunda entre grupos con características similares (eficiencia de grupos), lo que permitió identificar cuáles economías de las que conforman APEC son eficientes respecto a la relación existente entre el crecimiento económico, el consumo de energías renovables, el consumo de energías fósiles y las emisiones de dióxido de carbono.

Del primer análisis obtenido de las fronteras de grupos, son Corea, Estados Unidos, Hong Kong, Nueva Zelanda y Singapur las economías que resultan eficientes según las variables utilizadas; en contraste del segundo grupo son las economías de Brunéi Darussalam, Chile, Rusia, Malasia y Perú. Esto denota que al hacer el análisis seccionado se encontrarán DMU que no necesariamente son eficientes en la metafrontera, es decir, al compararse con otras economías más diversas. Por lo que la metodología resulta muy útil al realizar trabajos con grupos de economías heterogéneas como las que conforman el Foro APEC. Esto también sugiere que, aunque implementan tecnologías adecuadas a sus contextos, persisten brechas tecnológicas y estructurales que limitan su desempeño frente a estándares internacionales (Arora et al., 2025). La excepción fue Perú, que alcanzó eficiencia máxima en ambos análisis, posiblemente debido a su matriz energética diversificada y políticas locales de sostenibilidad (Rosa, 2022).

Las economías tienen la obligación, acorde con los diferentes convenios firmados como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, de generar políticas e informar de manera periódica sobre dichas medidas para mitigar el cambio climático. No obstante, pese a la firma y ratificación de estos acuerdos, los resultados del presente análisis muestran que es necesario

seguir impulsando políticas que tengan un impacto real en el cambio climático que hoy enfrentamos de manera global.

Particularmente, los compromisos adquiridos por las economías de APEC han marcado precedentes y esfuerzos que en los próximos años dictarán el destino del mundo en lo que respecta al impacto del cambio climático en nuestra sociedad, especialmente las iniciativas que lleven a cabo China y Estados Unidos, por lo que el uso de energías renovables resulta imperante entre las medidas que tendrán un impacto positivo en el medio ambiente sin descuidar el crecimiento económico de las sociedades.

Referencias

- Ali, E. B., Opoku-Mensah, E., Ofori, E. K., & Agbozo, E. (2023). Load capacity factor and carbon emissions: Assessing environmental quality among MINT nations through technology, debt, and green energy. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139282>
- Arora, N., Sharma, D., & Talwar, S. J. (2025). A sustainable measure of efficiency performance and validity of Environmental Kuznets Curve – An intercountry Data Envelopment Analysis approach. *Journal of Economic and Administrative Sciences*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/JEAS-07-2024-0256>
- Atwi, S., Barberán, R., & Angulo, G. (2018). CO₂ Kuznets curve revisited: From cross-sections to panel data models. *Investigaciones Regionales — Journal of Regional Research*, 40, 169-196. <https://hdl.handle.net/10017/33482>
- Banco Mundial. (2024). *Datos de libre acceso del Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/>
- Camoto, F. C., & Pulita, A. C. (2022). Efficiency evaluation of sustainable development in BRICS and G7 countries: a Data Envelopment Analysis approach. *Gestão & Produção*, 29, e022. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e022>
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: Implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389, 19-37.

- Chen, Y., & Lee, C. C. (2022). Energy efficiency and economic growth: A meta-analysis of emerging economies. *Energy Economics*, 112, 106073. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106073>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- COP29. (2024). *Decisions adopted by the Conference of the Parties at its twenty-ninth session*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/>
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., & Wheeler, D. (2002). Confronting the environmental Kuznets curve. *Journal of Economic Perspectives*, 16(1), 147-168. <https://doi.org/10.1257/0895330027157>
- Deacon, R. T., & Norman, C. S. (2006). Does the environmental Kuznets curve describe how individual countries behave? *Land Economics*, 82(2), 291-315. <https://doi.org/10.3368/le.82.2.291>
- Eckstein, D., Künzel, V., & Schäfer, L. (2021). *Índice de riesgo climático global 2021: ¿Quiénes sufren más a causa de los eventos climáticos extremos?* Germanwatch. <https://www.germanwatch.org/en/19777>
- Fare, R., S. Grosskopf, M. Norris and Z. Zhang (1994). Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries. *American Economic Review*, 84:1, 66-83.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 120(3), 253-281.
- Grifell-Tatjé, E., and C. A. K. Lovell (1995). A Note on the Malmquist Productivity Index. *Economics Letters*, 47, 169-175.
- International Energy Agency. (2024). *Clean energy innovation: Tracking progress and framing policies*. IEA. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>
- Luo, H., & Sun, Y. (2024). The impact of energy efficiency on ecological footprint in the presence of EKC: Evidence from G20 countries. *Energy*, 304, 132081. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132081>.

- McMillan, M. L., & Chan, W. H. (2006). Eficiencia universitaria: una comparación y consolidación de resultados de métodos estocásticos y no estocásticos. *Economía de la Educación*, 14 (1), 1-30.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *Los límites del crecimiento: Informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Melo-Becerra, L. (2015). *Eficiencia técnica de los hogares con producción agropecuaria en Colombia* (Documento de Trabajo sobre Economía Regional) [Working paper]. Banco de la República de Colombia. <https://www.banrep.gov.co/docum/123>
- Mesarovic, M., & Pestel, E. (1975). *La humanidad en la encrucijada: Segundo informe del Club de Roma*. Fondo de Cultura Económica.
- Moutinho, V., Leitão, J., & Henriques, B. (2024). Examining the behaviour of the Kuznets curve under economic policy uncertainty conditions using the stochastic frontier analysis: Evidence from 11 selected countries. In T. Devezas, J. Leitão, A. Sarygulov, D. J. LePoire, & B. Khusainov (Eds.), *Global energy transition and sustainable development challenges* (Vol. 1, pp. [insert page numbers if available]). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67583-6_3
- Navarro, C. L. (2005). *La eficiencia del sector eléctrico en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- O'Donnell, C.J., Rao, D.S.P. and Battese, G.E. (2008). Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technologies ratios. *Empirical Economics*, 34, 231-255.
- O'Donnell, C. J., & Van der Westhuizen, G. (2002). Regional comparisons of banking performance in South Africa. *South African Journal of Economics*, 70(3), 224-240. <https://doi.org/10.1111/j.1813-6982.2002.tb01301.x>
- O'Donnell, C. J., 2010. Measuring and decomposing agricultural productivity and profitability change, *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, Australian Agricultural and Resource Economics Society, 54(4), 1-34.
- OECD. (2024). *Eco-innovation and sustainability: Policy trends and indicators*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/3a48b6a2-en>

- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2019). *Informe sobre el desarrollo industrial 2020: La industrialización en la era digital* [Resumen]. <https://www.unido.org/>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: Turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465-484. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000259>
- Pinzón, M. J. (2003). *Medición de eficiencia técnica relativa en hospitales públicos de baja complejidad mediante la metodología Data Envelopment Analysis (DEA)* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana].
- Rosa, S. S. (2022). Evidência da curva de Kuznets ambiental no Brasil. *Revista Estudo & Debate*, 29(3). <https://doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v29i3a2022.3147>
- Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental quality and development: Is there a Kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147-162. <https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1031>
- Serra, D. (2004) *Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones*. España: Ediciones
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- Stern, D., Common, M., & Barbier, E. (1996). Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development*, 24(7), 1151-1160. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(96\)00032-0](https://doi.org/10.1016/0305-750X(96)00032-0)
- Stern, N. (2016). Economics: Current climate models are grossly misleading. *Nature*, 530(7590), 407-409. <https://doi.org/10.1038/530407a>
- Tachega, M. A., Yao, X., Liu, Y., Ahmed, D., Li, H., & Mintah, C. (2021). Energy efficiency evaluation of oil producing economies in Africa: DEA, Malmquist and multiple regression approaches. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100025>
- Tchapchet-Tchouto, J. E., Duthil, G., Meyet Tchouapi, R., et al. (2024). The Environmental Kuznets Curve under Norden "Green Deal" and action plans in Nordic European

- countries. *Journal of the Knowledge Economy*, 15, 16969-17002. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-01744-z>
- Terán-Pérez, B. M., Herrera Ríos, A. Y., & Becerra Pérez, L. A. (2025). Perspectivas sobre la curva de Kuznets ambiental en América: un enfoque de panel estático para el período 2010-2020. *Revista Vértice Universitario*, 27(96). <https://doi.org/10.36792/rvu.v27i96.206>
- UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), (2022). *Annual report 2022*. <https://unfccc.int/annualreport>
- Wagner, M. (2008). The carbon Kuznets curve: A cloudy picture emitted by bad econometrics? *Resource and Energy Economics*, 30(3), 388-408. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2008.01.001>
- Wang, L. (2011). A nonparametric analysis on the environmental Kuznets curve. *Environmetrics*, 22(3), 420-430. <https://doi.org/10.1002/env.1060>
- World Development. (2003). *Special issue on climate change and development*. http://www.mct.gov.br/upd_blob/0014/14197.pdf
- Yi-Ming Wei, Zhimin Huang, D'Maris Coffman, Hua Liao & Ke Wang. (2024) Production optimisation in carbon reduction engineering management. *International Journal of Production Research* 62:18, pages 6445-6448.
- Zamora Torres, A. I. (2017). La eficiencia de las aduanas de la región APEC: Un análisis del modelo DEA Malmquist. *México y la Cuenca del Pacífico*, 6(18), 17-36.

Anexo 1

Compromisos efectuados y ratificados por las economías de APEC en acuerdos climáticos

Economías de APEC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático		Protocolo de Kioto	
	<i>Fecha de la firma</i>	<i>Fecha de la Ratificación</i>	<i>Fecha de la firma</i>	<i>Fecha de la Ratificación</i>
Australia	4/6/1992	30/12/1994	29/4/1998	
Brunéi Darussalam	...	7/8/2007	...	...
Canadá	12/6/1992	4/12/1992	29/4/1998	17/12/2002
Chile	13/6/1992	22/12/1994	17/6/1998	26/8/2002
China	11/6/1992	5/1/1993	29/5/1998	30/8/2002
Corea del Sur	13/6/1992	14/12/1993	25/9/1998	8/11/2002
Estados Unidos	12/6/1992	15/10/1992	12/11/1998	
Filipinas	12/6/1992	2/8/1994	15/4/1998	20/11/2003
Indonesia	5/6/1992	23/8/1994	13/7/1998	3/12/2004
Japón	13/6/1992	28/5/1993	28/4/1998	4/6/2002
Malasia	9/6/1993	13/7/1994	12/3/1999	4/9/2002
México	13/6/1992	11/3/1993	9/6/1998	7/9/2000
Nueva Zelanda	4/6/1992	16/9/1993	22/5/1998	19/12/2002
Papúa Nueva Guinea	13/6/1992	16/3/1993	2/3/1999	28/3/2002
Perú	12/6/1992	7/6/1993	13/11/1998	12/9/2002
Rusia	13/6/1992	28/12/1994	11/3/1999	18/11/2004
Singapur	13/6/1992	29/5/1997		12/4/2004
Tailandia	12/6/1992	28/12/1994	2/2/1998	28/8/2002
Vietnam	11/6/1992	16/11/1994	3/12/1998	25/9/2002

Nota: Elaboración propia con datos de (UNFCCC, 2003)

Anexo 2

Emissiones de CO₂. Consumo de energías renovables y su crecimiento promedio

Economías de APEC	Emisiones de CO ₂ (kt)		Crecimiento promedio anual (%)	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)		Crecimiento promedio anual (%)	Consumo de energía renovable (% del consumo total de energía final)		Crecimiento promedio anual (%)
	2015	2018		2015	2018		2015	2018	
Australia	375970	386620	2.83	15.79	15.48	-1.97	9.32	9.65	3.54
Brunéi Darussalam	5980	77140	19.40	14.41	16.64	15.49	0.01	0.01	-26.85
Canadá	558800	574400	2.79	15.65	15.50	-0.99	22.64	22.18	-2.03
China	9830430	10313460	4.91	4.56	4.62	1.39	25.07	25.46	1.58
Chile	6780	7230	6.64	7.12	7.35	3.20	12.25	13.12	7.17
Corea, República de	606510	630870	4.02	11.89	12.22	2.82	2.74	3.18	16.03
Estados Unidos	4982790	4981300	-0.03	15.54	15.24	-1.90	9.03	10.11	11.88
Filipinas	113670	142240	25.13	1.11	1.33	19.81	25.87	23.22	-10.23
Indonesia	490840	583110	18.80	1.90	2.18	14.68	26.95	20.86	-22.59
Japón	1181500	1106150	-6.38	9.29	8.74	-5.92	6.32	7.39	16.83
Malasia	232550	239620	3.04	7.68	7.60	-1.07	3.41	5.31	55.90
México	472590	472140	-0.10	3.88	3.74	-3.53	9.19	9.63	4.70
Nueva Zelandia	32190	32210	0.06	6.98	6.57	-5.88	31.16	31.04	-0.39
Papua Nueva Guinea	6430	7460	16.02	0.79	0.87	9.30	50.68	49.55	-2.22
Perú	53820	54280	0.85	1.77	1.70	-3.93	27.44	27.90	1.67
Rusia	1557530	1607550	3.21	10.81	11.13	2.94	3.20	3.18	-0.62
Singapur	45500	47360	4.09	8.22	8.40	2.17	0.65	0.73	12.74
Tailandia	263080	257860	-1.98	3.83	3.71	-2.99	22.65	23.72	4.73
Vietnam	209200	257860	23.26	2.26	2.70	19.56	30.72	23.49	-23.53

Nota. kt = kilotonnes; t = toneladas métricas. Crecimiento anual calculado con base en datos del Banco Mundial (2024). Elaboración propia con datos del Banco Mundial (2024).

Anexo 3

Prueba de colinealidad

Variable	VIF	1/VIF
Emisiones CO2	2.6	0.384214
PIB Pc	2.31	0.432764
Consumo de energía fósil	2.08	0.480952
Fuerza laboral	1.93	0.518571
Formación bruta de capital	1.43	0.697965
Mean VIF	2.07	

Nota: Elaboración propia en STATA 18 SE.