



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Economía y Energía: Análisis de la Eficiencia Energética y el Rol de las Energías Renovables

ECONOMICS AND ENERGY: ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND THE ROLE OF RENEWABLE ENERGIES

Juan David Cruz-Negrete¹, Yamileth Andrade-Arango² y Andrea Vaca-López³

Para citar este artículo: Cruz-Negrete, J.D., Andrade-Arango, Y. & Vaca-López, A. (2024). Economía y energía: análisis de la eficiencia energética y el rol de las energías renovables. *Clío América*, 18(36), 100 – 114. <https://doi.org/10.21676/23897848.5616>

Recibido: julio 2 de 2024.

Aceptado: octubre 11 de 2024.

Publicado en línea: 29 de noviembre de 2024.

RESUMEN

Esta investigación tiene como propósito analizar el relacionamiento entre el Producto Interno Bruto (PIB), el Gasto en Investigación y Desarrollo (I+D), la intensidad energética y el consumo de energías renovables en 37 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) entre 2012 y 2020. Se utilizó la herramienta estadística *jamovi*, a través de las técnicas de Análisis de Componentes Principales (ACP), K-mean Clustering, Matriz de Correlaciones, entre otros. Se concluye que se conforman dos componentes: intensidad energética y consumo de renovables, y por otro lado PIB y Gasto en I+D, por lo que no se detecta un adecuado relacionamiento entre crecimiento económico y eficiencia energética; asimismo, se generaron dos clústeres, por un lado, Islandia, y el otro clúster confirmado por los restantes 36 países —destacando a Estados Unidos—. En la combinación entre componentes y clústeres, sobresalen países como Islandia, Estados Unidos, países escandinavos, Canadá, Nueva Zelanda, Reino Unido, Costa Rica, Colombia, Chile, entre otros.

Palabras clave: gestión de la innovación tecnológica de la I+D; energía alternativa; energía y macroeconomía; cambio tecnológico.

JEL: O32; Q43; Q55

ABSTRACT

The purpose of this research is to analyze the relationship between Gross Domestic Product (GDP), Research and Development (R+D) expenditure, energy intensity, and renewable energy consumption in 37 countries of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) between 2012 and 2020. The *jamovi* statistical tool was used, through the techniques of Principal Component Analysis—PCA—, K-mean Clustering, correlation matrix, among others. It is concluded that there are two components: energy intensity and consumption of renewables, and on the other hand GDP and R+D expenditure, so an adequate relationship between economic growth and energy efficiency is not detected; likewise, two clusters were generated, on the one hand, Iceland, and the other cluster confirmed by the remaining 36 countries, highlighting the United States. In the combination of components and clusters, countries such as Iceland, the United States, Scandinavian countries, Canada, New Zealand, the United Kingdom, Costa Rica, Colombia, Chile, among others, stand out.

Keywords: management of technological innovation of R+D; alternative energy; energy and macroeconomics; technological change.

¹ Universidad del Magdalena, Colombia. **Email:** jcruzn@unimagdalena.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8390-7737>

² Universidad de Manizales, Colombia. **Email:** yandrade@umanizales.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7890-788X>

³ Universidad de Manizales, Colombia. **Email:** andreavacal@umanizales.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4352-6681>

INTRODUCCIÓN

Vínculo entre economía y energía

El análisis del relacionamiento entre crecimiento económico e intensidad energética se propagó desde la revolución industrial; Biesiot y Noorman (1999) concluyeron que hay una sincronía entre el crecimiento de la producción con un aumento de las emisiones de CO₂, lo que se entiende por un mayor consumo energético de fuentes fósiles para mantener dicho crecimiento económico (PIB); complementariamente, Halicioglu (2009) indicó que este relacionamiento nocivo, contribuye al planteamiento de que a medida que se incrementa la producción económica —PIB—, se presente un mayor deterioro de la calidad del ambiente.

Para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la eficiencia energética, las políticas públicas y las estrategias innovadoras son aspectos importantes; entre algunos estudios que abordan estos elementos, se encuentra el de Giacosa y Walker (2022), quienes analizaron los esfuerzos de Nueva Escocia para disminuir su dependencia del carbón en la generación energética y así mejorar la calidad del aire mediante el aumento de la capacidad instalada de energías renovables. Asimismo, Di Domenico et al. (2023) y Wang et al. (2016) exploraron el efecto rebote energético, concluyendo que las mejoras en eficiencia energética pueden llevar a un aumento en el consumo total de energía a causa de la disminución de costos y el aumento en la demanda energética. Los últimos dos estudios referenciados subrayan la necesidad de políticas que mitiguen este efecto para lograr una verdadera reducción en el consumo de energía.

De otra parte, Harichandan *et al.* (2022) al igual que Marra y Colantonio (2023) resaltan la importancia de los regímenes sociales y técnicos y la gobernanza a diversas escalas en la transición energética. Harichandan mapea los resultados de investigaciones actuales y propone direcciones futuras, por su parte, Marra brinda evidencia sobre cómo las políticas públicas pueden impactar en la adopción de tecnologías renovables en favor de una generación más limpia de energía. Finalmente, Pata et al. (2023) analiza cómo aspectos económicos y geopolíticos, como la incertidumbre y riesgos geopolíticos, tienen implicaciones en las inversiones en energías renovables en los países del G7. En conjunto, las investigaciones ilustradas enfatizan en la necesidad de un enfoque holístico y coordinado que contemple tanto los aspectos técnicos como los socioeconómicos para una transición energética efectiva y sostenible.

El estudio de Emir y Bekun (2019), quienes complementan los aportes a la literatura en esta materia, evidenciaron que, contrariamente para el caso de Rumania hay un equilibrio mantenido en el tiempo entre crecimiento económico, intensidad energética, CO₂, y consumo de energía renovable; destacando que hay una causalidad unidireccional entre consumo energético y PIB; mientras que la relación entre intensidad energética y PIB es bidireccional. Los estudios abordados en esta sección, permiten vislumbrar tensiones y dinámicas en el relacionamiento entre economía, contaminación y consumo energético.

Relación entre economía y tecnología

Autores como Lee y Lim (2001) conciben que la inversión en ciencia y tecnología promueve la transformación de las estructuras empresariales y competitivas de los países, a través de la generación de bienes con alto valor tecnológico, lo que consecuentemente se vería reflejado en una mejora del nivel de vida de los pobladores debido al ingreso *per cápita*.

Las tecnologías convergentes, entendidas por Rozo (2020) como el conjunto de integración de tecnologías como la computación cognitiva, *Big Data*, Internet de las Cosas (IoT), ciberseguridad, Tecnologías RFID, *cloudcomputing* y otras; generan beneficios a las organizaciones como la expansión de la integración de la información, mejoran la calidad de los servicios (Silva y Rocha, 2020), aumentan la eficiencia en procesos y solidifican el respeto de los derechos humanos en toda la cadena de valor (Foro Económico Mundial, 2021);

según Heidrich et al. (2020), al usar tecnologías como *Blockchain* se mejoran prácticas responsables en la cadena de abastecimiento de las industrias.

Para obtener los beneficios que generan las tecnologías emergentes, las economías deben seguir las recomendaciones dadas por el *World Economic Forum* (2020), que instan a gobiernos, industrias y sociedad civil a implementar un enfoque planificado para el aprendizaje, entrenamiento, capacitaciones y la adquisición de competencias y aptitudes tecnológicas.

Eficiencia Energética

El estudio de la generación y consumo de la energía, y aun mejor, de la eficiencia energética es preponderante por impactos como los demostrados por Merino (2012), quien expone que, por ejemplo, las energías renovables generan 31 veces menos impactos nocivos para el ecosistema en contraste con la generación energética basada en combustibles fósiles.

Por otro lado, entre las estrategias para elevar la eficiencia energética, destaca el aprovechamiento de la biomasa; Betancur y Rodríguez (2022) informan en su estudio que la energía solar aprovechada por las plantas en su totalidad es 10 veces superior que la energía consumida como tal por la población mundial y unas 200 veces mayor que la energía consumida como alimento en el planeta; aseveraciones a contemplar, si lo que se busca es maximizar el aprovechamiento de fuentes limpias de energía. La estrategia de generación de energía a través de la biomasa no debe descuidar la exigencia de hacer medición, evaluación y control de emisiones de contaminantes producto del consumo de dicha energía; técnicas como el Análisis de Ciclo de Vida pueden implementarse en la cadena de producción energética de la biomasa, pues contempla estudios desde el origen del proceso, hasta el uso final de dicha energía (Merino, 2012), asimismo, se podría implementar la técnica de estudios de compensación económica (Velasco, 2009) en dinámicas de generación energética a partir de la biomasa.

La eficiencia energética disminuye las tensiones relacionadas con la pobreza energética, la que se entiende como los inconvenientes para el acceso a la energía, sus usos y su aprovechamiento en la vida diaria (Butler, 2022), en el propósito conjunto en combatir el flagelo de la pobreza energética, se puede hacer uso de tecnologías, tal como exponen Strielkowski et al. (2021), algunas de ellas son redes de energía peer-to-peer (P2P), Internet de la Energía (IoE), realidad aumentada, vehículos conectados de forma eléctrica (IoVc), entre otras.

Otros ejemplos y clasificaciones sobre el uso de tecnologías para la eficiencia energética son la táctica de Recuperación de Calor Residual —WHR (Oliveira et al., 2020), tecnologías interactivas requieren actuación del hombre y tecnologías para ajustar su aplicación, así como las fijas no requieren intervención humana una vez instaladas (Adua, 2020); se complementan con las tecnologías pasivas —ventilación natural, aprovechamiento de sombras, masas térmicas, sistemas de enfriamiento nocturno, orientación de edificios (Liddle y Sadorsky, 2021), y otras tecnologías para la eficiencia energética, como los enuncia Dadzie et al. (2020): Ciclo inverso AC, Sistemas de recuperación de calor energéticamente eficientes, Economizadores de aire energéticamente eficientes, Acristalamiento electrónico, Sistemas de control de iluminación, entre otros.

Impulsar inversiones en I+D significa mayor impulso a tecnologías, y potencialmente ver efectos positivos como reducción de emisiones contaminantes y disminuir la intensidad energética (Stern, 2012); un incremento en la financiación en I+D mejoraría el potencial de generación de energía con base en renovables, premisa relevante al entender que si bien la energía limpia no se compara con la capacidad de generación energética de las fuentes convencionales fósiles en la actualidad, las energías renovables son más atractivas según el análisis costo-beneficio (Abolhosseini et al., 2014), hay que contemplar los impactos positivos y negativos para el

ambiente de ambas alternativas. Abolhosseini et al. (2014) también exponen que la generación de energía de fuentes renovables —como la solar y eólica— se debe apoyar construyendo infraestructura para este tipo de generación energética, reduciendo así las presiones y dependencias fiscales que produce el esquema de fuentes fósiles, permitiendo incluso ahorros económicos para empresas y gobiernos; los gobiernos deben optar por estrategias de financiación de prácticas en calefacción, ventilación, sistemas de aires acondicionados (HVAC), iluminación y sistemas automatizados para apoyar acciones encaminadas a lograr las metas de reducción de emisiones contaminantes (Dadzie et al., 2020) y optimizar la eficiencia energética.

Abolhosseini et al. (2014) expone ejemplos adicionales sobre técnicas y prácticas que impulsan la eficiencia energética, a través de estrategias como procesos tecnificados como la Recuperación de Calor Residual —WHR—, mejoran operaciones de encendido, secado, secado por aspersión, secado sin aire, quemadores de alta eficiencia (estos dos últimos permiten ahorros de combustibles del 50 % al 60 % para quemadores regenerativos).

Todas las estrategias y recomendaciones anteriormente ilustradas, se acompañan de retos, como por ejemplo, los usuarios no tienen claridad absoluta sobre cómo utilizar correctamente las tecnologías interactivas —ejemplo, termostato, aires acondicionados, etc.— en favor del ahorro energéticos en los hogares, así, la mala manipulación de estos disminuye el impacto en el ahorro efectivo de consumo energético (Adua, 2020; U.S. Energy Information Administration (EIA), 2013); estas tecnologías deben diseñarse de tal forma que una persona común sea capaz de aprovecharlas al máximo; por ejemplo, el estudio de Hasanbeigi y Price (2012) basado en la industria textil, plantea que la mayoría de empresas textiles son pequeñas y medianas empresas, por lo que el *know-how* en lo tecnológico y en materia de eficiencia energética debe difundirse en las plantas textiles, y en el resto de sectores de la economía.

Según Tariq et al. (2022), es vital otorgar subsidios y destinar fondos desde las decisiones en políticas públicas para expandir la infraestructura tecnológica, y dinamizar el desarrollo de tecnologías verdes para la eficiencia energética.

Energías Renovables

Hay un panorama positivo en materia de energías renovables, la participación de las renovables en el *mix* energético mundial es cada vez mayor, y las protagonistas son la Unión Europea y América Latina; en 2018, las energías renovables representaron el 26 % de la producción total de electricidad; sin embargo, en un presupuesto de carbono planetario finito: un 50 % de posibilidades de limitar el calentamiento a $\leq 2^{\circ}\text{C}$ para 2050, y considerando las emisiones globales hasta 2018, entonces solo se permitiría emitir 26,19 GtCO₂/año del 2019 en adelante, lamentablemente la estimación de emisiones para el 2020 fue de $34,1 \pm 2$ GtCO₂ (British Petroleum (BP), 2019; Enerdata, 2020; Rockström et al., 2017), este párrafo arroja un panorama agrídulce, pues si bien se comprende que hay una tendencia positiva hacia la generación de energía limpia en el mundo, también se hace un llamado de urgencia para un desplazamiento pronunciado y urgente hacia la generación y consumo responsable de energías renovables, esto teniendo en cuenta que el planeta sobrepasa de manera contundente los límites de emisiones anuales.

De esta manera, se brindan luces preliminares sobre el relacionamiento entre economía, inversión en I+D (Tecnologías), eficiencia energética (intensidad energética, consumo de renovables); relaciones en algunos casos que dan cuenta de panoramas alentadores, pero en general, se reconocen fenómenos que deben ser atendidos; es por ello vital, el desarrollo de estudios que mejoren la comprensión entre estas variables.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio se utilizó la base de datos del Banco Mundial (Banco Mundial, 2021), del cual se extrajeron los datos para todos los países disponibles para cuatro variables: Intensidad Energética (Nivel de intensidad energética de la energía primaria (MJ/\$2017 PPA PIB)), Consumo de Energía Renovable (% del consumo total de energía final), PIB (US\$ corrientes), y Gasto en I+D (% del PIB); se determinó para cada variable, seleccionar las cifras desde el año 2012 hasta el 2020 —año en el cual se registraba como último año de reporte para dichas variables, para la mayoría de países.

Una vez generados los reportes de las cuatro variables indicadas, en el período temporal expresado, se filtró la base de datos para los países pertenecientes a la Cooperación y el Desarrollo Económicos - OCDE, pues era un bloque de naciones donde se evidenciaba consistencia en el reporte de resultados en las variables y los años de análisis; una vez filtrados los países aludidos quedando la selección en 37 países, se procedió a organizar los datos en una tabla integrada, la cual consta de 228 datos.

Una vez organizada la información, se utilizó el *Software* Jamovi (Jamovi, 2022), plataforma estadística para interpretación y análisis de datos cuantitativos, herramienta con la cual se obtuvieron resultados Descriptivos, Clústeres (k-mean), ACP, Matriz y Gráfica de Correlación, etc., tal como se presentan en la siguiente sección.

RESULTADOS

Los datos de relacionamiento de las cuatro variables para los 37 países permiten concebir dos componentes según el ACP (algunos estudios que usaron el método ACP para temas energéticos, son Manfren et al. (2021) sobre el uso energético en la construcción, Dietzenbacher et al. (2020) que analizó el crecimiento de energías renovables, y Kakodkar et al. (2022) sobre la variabilidad de recursos y tecnologías energéticas); uno conformado por variables de referencia económicos como lo son PIB y Gasto en I+D, y el otro confirmado por las variables de inclinación hacia la energía como lo son Intensidad Energética, y Consumo de Renovables; tal como se presenta en la Tabla 1 y la Figura 1.

Tabla 1. Cargas de los Componentes-Análisis de Componentes Principales

	Componente		Unicidad
	1	2	
Intensidad Energética	0,866		0,206
Consumo de Renovables	0,850		0,204
PIB		0,782	0,358
Gasto en I+D		0,777	0,379

Nota: Se utilizó la rotación ‘varimax’

Fuente: elaboración propia.

La Figura 1 permite observar cómo Islandia resalta en el componente que relaciona intensidad energética con consumo de renovables, y luego, con gran distancia, resaltan igualmente los países escandinavos (Finlandia, Suecia, Noruega), Canadá y Austria y Eslovenia; por su parte, Estados Unidos se ubica en la parte superior del componente que relaciona PIB con Gasto en I+D, y con mucha diferencia en ese mismo cuadrante, aparecen Corea, Israel, Japón, Alemania, Bélgica, Francia, Suiza, Australia, entre otros. Los países latinoamericanos que arroja el gráfico se ubican en la parte inferior, explicado por los bajos niveles de PIB y Gasto en I+D y la modestia pero alentadora relación entre Intensidad Energética y Consumo de Renovables, se observa a México en el cuadrante positivo entre PIB y Gasto en I+D, mientras que Colombia, Chile, Costa Rica se posicionan en

el sector positivo orientado hacia Intensidad Energética y Consumo de Renovables.

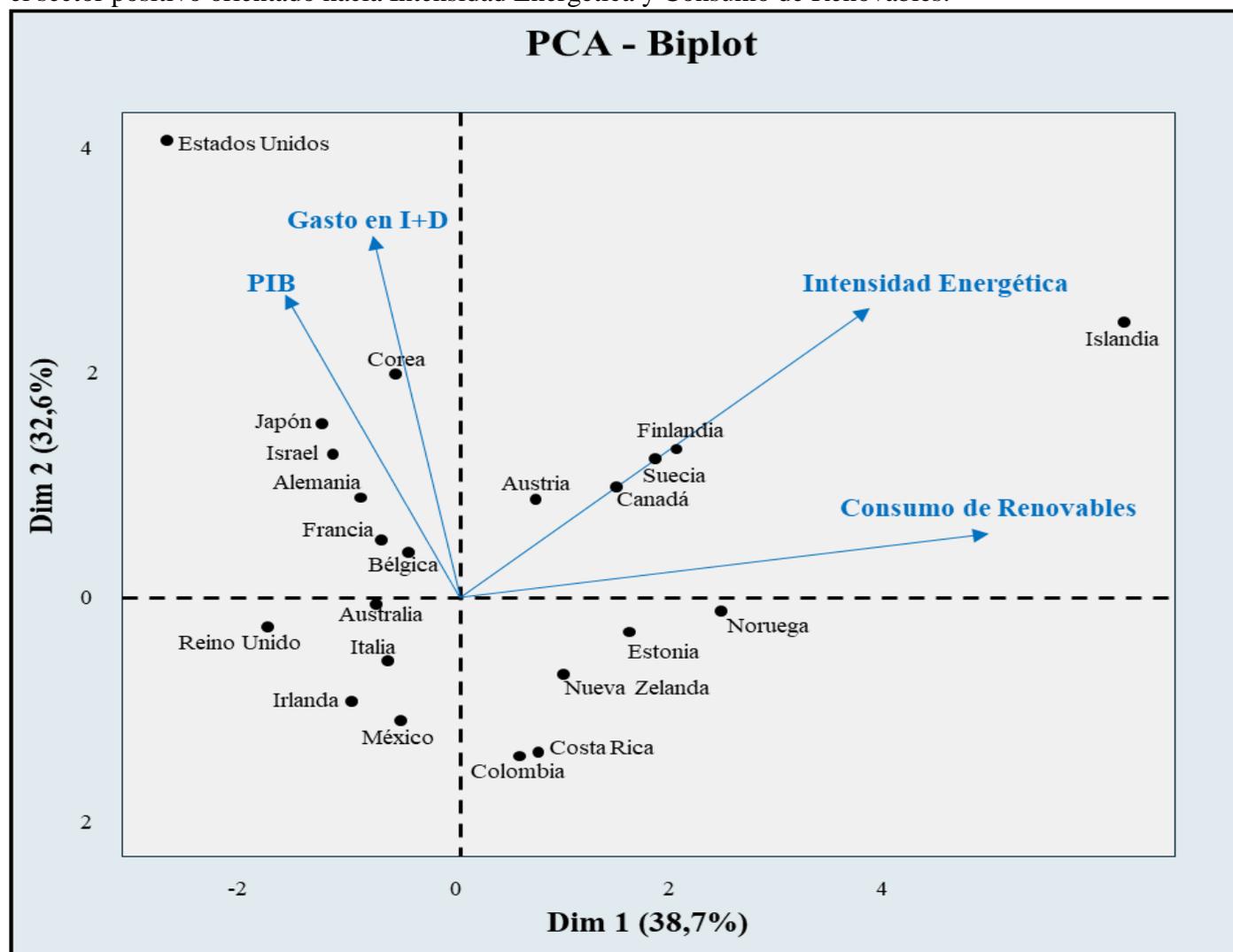


Figura 1. Clústeres de variables en el Análisis de Componentes Principales - PCA Biplot

Fuente: elaboración propia.

Es válido mencionar que los datos de este estudio, respecto a las cuatro variables analizadas, da cuenta en un 71,3 % (Tabla 2) de la varianza entre los dos componentes que generó el estudio de Análisis de Componentes Principales; lo cual significa un porcentaje amplio que explica en significancia el relacionamiento entre las variables y sus datos. El Componente 1 (conformado por Intensidad Energética y Consumo de Renovables) es el más influyente en la variabilidad de los datos.

Tabla 2. Resumen de los componentes y acumulado de la Varianza

Componente	SC Cargas	% de la Varianza	% Acumulado
1	1,52	38,0	38,0
2	1,33	33,3	71,3

Fuente: elaboración propia.

Los resultados en materia de la Matriz de Correlación (Tabla 3), permite detectar que la asociación entre los rangos de las variables Intensidad Energética y Consumo de Renovables es la más fuerte detectada (0,768), seguida por la asociación entre los rangos de las variables PIB e Intensidad Energética (0,672).

Tabla 3. Matriz de correlaciones

		Gasto en I+D	Consumo de Renovables	Intensidad Energética	PIB
Gasto en I+D	Rho de Spearman	—			
	gl	—			
	Valor p	—			
Consumo de Renovables	Rho de Spearman	-0,167	—		
	gl	35	—		
	Valor p	0,323	—		
Intensidad Energética	Rho de Spearman	0,221	0,050	—	
	gl	35	35	—	
	Valor p	0,189	0,768	—	
PIB	Rho de Spearman	0,395*	-0,521**	-0,072	—
	gl	35	35	35	—
	Valor p	0,016	0,001	0,672	—

Nota: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Fuente: elaboración propia

Los gráficos de correlación del Análisis de Componentes Principales (Figura 2), evidencia que es marcada la relación positiva entre Consumo de Renovables e Intensidad Energética, la segunda correlación positiva más pronunciada se da entre PIB y Gasto en I+D, entendiéndose esta relación, pues a mayor renta nacional, mayores posibilidades de hacer inversiones en tecnologías, innovación y desarrollo; destaca la evidente correlación negativa entre PIB y Consumo de Renovables, lo cual se entiende por la presión que tienen los aparatos productivos de los países con mayor PIB, de generar altos índices de producción y productividad, lo que se acompaña de generación de energía usualmente no renovable, para poder responder a la amplia demanda energética de sus industrias y ciudades.

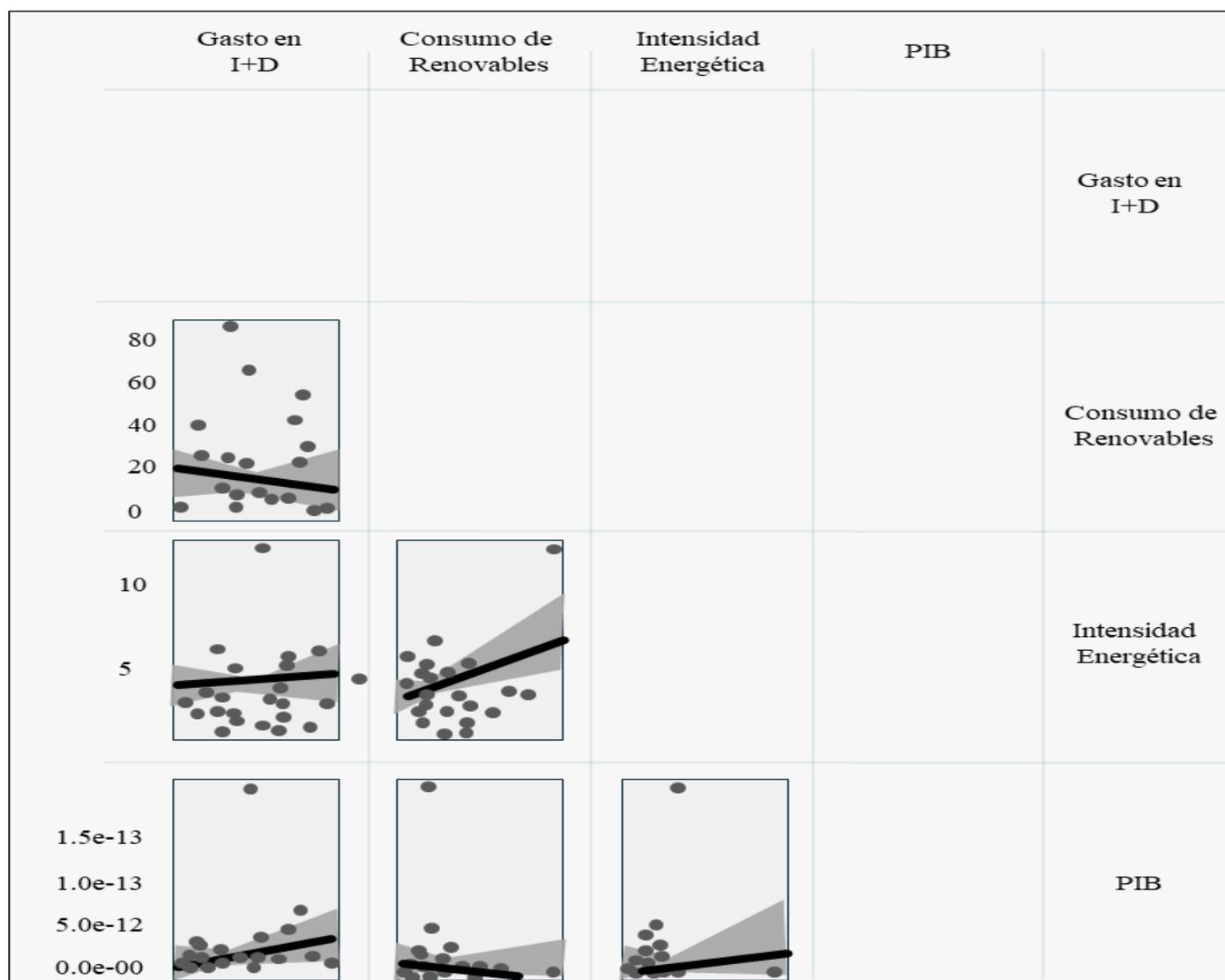


Figura 2. Gráfica de Correlaciones

Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 permite detallar que los datos de Islandia la llevan a formar en solitario uno de los dos clústeres, y el resto de las naciones conforman el segundo clúster, resaltando el caso de Estados Unidos; respecto a los Componentes, se corroboran los dos grupos: por un lado, la combinación entre Intensidad Energética y Consumo de Renovables, y por el otro, PIB y Gasto en I+D.

El dendrograma resalta a subgrupos en los clústeres, así: para el caso de Gasto en I+D, los países que mayormente dan cuenta a las variaciones en el modelo y se relacionan en subgrupos son Corea e Israel, Países Bajos y Bélgica, y Austria y Dinamarca. Para la variable PIB, los subgrupos son Estados Unidos aparte, Reino Unido, Italia y España; e Irlanda, Turquía y Luxemburgo. Respecto a la variable Consumo de Renovables, está por un lado Islandia en solitario, y las asociaciones más fuertes se encuentran entre Noruega, Suecia y Finlandia; Letonia, Costa Rica y Colombia; así como Chile y Lituania. Finalmente, para la variable de Intensidad Energética, Islandia se ubica en solitario, y las otras asociaciones se dan entre Hungría y Polonia; Estonia, Canadá y Nueva Zelanda; y Australia y República Checa.

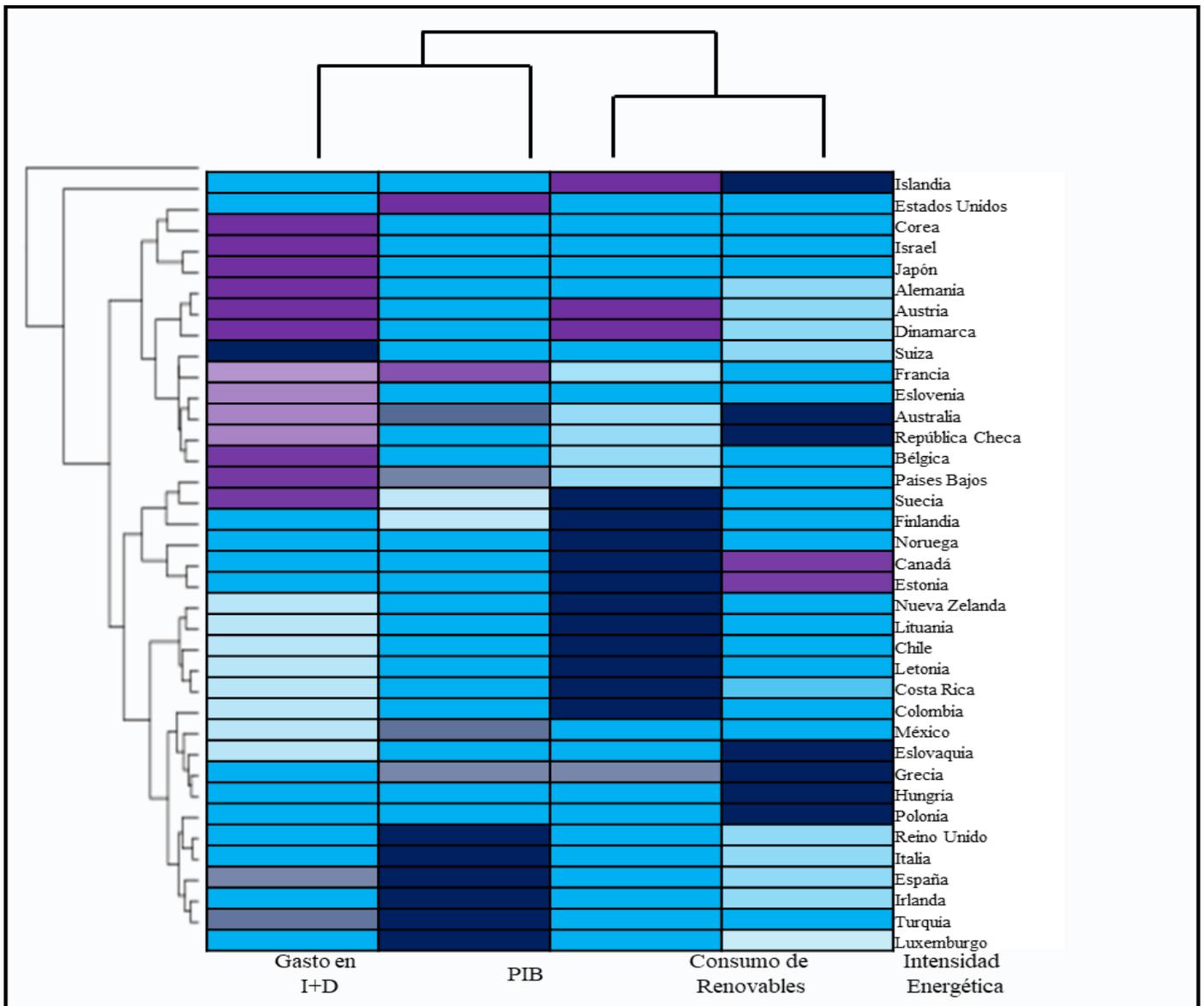


Figura 3. Mapa de calor de clústeres y componentes principales

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados mostraron dos componentes, uno de ellos compuesto por PIB y Gasto en I+D, con correlaciones negativas, por ejemplo, entre PIB y Consumo de Renovables, y una correlación negativa menos pronunciada entre Gasto en I+D y Consumo de Renovables; lo cual conecta con las conclusiones de los estudios de Ang (2008) y Soyta et al. (2007), quienes emiten un llamado de alerta sobre el peligroso relacionamiento entre crecimiento económico, contaminantes ambientales, y consumo energético. Por su parte, Licon (2023) indica que el crecimiento del PIB en Corea del Sur, país donde desarrolló la investigación— de los países debe verse reflejado en una mayor, constante y mantenida inversión en I+D, para de esta forma promover la innovación en bienes y servicios, de esta manera contribuir al PIB en sectores como la nanotecnología, biotecnología, robótica, semiconductores, electrónica, automotriz, aeroespacial, farmacéutica, energía nuclear y energía renovable.

El relacionamiento entre PIB, consumo de renovables e intensidad energética, debe contemplar escenarios cambiantes en la economía de los países; por ejemplo, un crecimiento económico lento, así como coyunturas

como bajos precios de combustibles fósiles, retrasan en su conjunto la transición de las naciones hacia el elevar la inversión en nuevas alternativas de generación energética (Liddle y Sadorsky, 2021); es un elemento a considerar en la interpretación de los resultados de este artículo, pues, algunos países que se observan con bajos impactos en materia de consumo de renovables e intensidad energética, posiblemente enfrentan las presiones por bajos crecimientos económicos, lo que les dificulta aumentar la inversión en I+D, y todo esto se refleja en barreras para construir infraestructura para la generación y consumo de energía limpia.

Todo tipo de inversión en I+D en favor de la eficiencia energética, debe ir acompañado de controles y mediciones, es así como Atik y Ünlü (2019) sugieren en su estudio 10 medidas para evaluar el impacto de la adopción tecnológica, observándose métricas relacionadas con sistemas de plataformas en línea, *software Enterprise Resource Planning* [ERP], gestión de datos administrativos en la cadena de suministro, etc. Métricas que deberían ser consideradas por los países de la OCDE y líderes empresariales, para ayudar en la detección de qué tecnologías favorecen prácticas empresariales y qué aspectos reforzar en el objetivo de ser más eficientes energéticamente.

Hay ejemplos exitosos en el relacionamiento entre tecnologías (explicado en parte por el Gasto en I+D), eficiencia energética, y reducción de contaminación, como el caso de Arabia Saudita, donde a través de procesos de desalinización por absorción (AD por sus siglas en inglés), así como destilación por membrana (MD), se consigue aumentar la eficiencia en el tratamiento energético, utilizar menos químicos y energía en las operaciones, y reducir las emisiones de CO₂ (Ghaffour et al., 2014); ejemplo a ser estudiado por los países de la OCDE con peores resultados en las cuatro variables estudiadas en este artículo.

Contrastando con la correlación negativa entre Gasto en I+D con consumo de renovables que generó este artículo, el estudio de Maolin y Yufei (2020) logró determinar, al analizar las industrias en Japón y China, que a mayor nivel tecnológico mayor será la eficiencia energética, asimismo las industrias de alta tecnología en China son más flexibles en su consumo energético, lo que significa que su eficiencia energética puede mejorar rápidamente. Esta referencia, se convierte en un caso de estudio para los países de la OCDE, a modo de obtener aprendizajes sobre cómo orientar la inversión pública en I+D y orientarla hacia la eficiencia energética de una forma más contundente.

Las tecnologías I+D en función de la eficiencia energética debería ser el derrotero, así, mejorarían los países de la OCDE su relacionamiento y correlaciones entre las cuatro variables analizadas en este artículo, es así como se referencian estudios como los de Ghaffour et al. (2014) concluyen que el uso óptimo de energía solar y geotérmica de ciclo combinado, con el fin de suministrar calor latente para operar sistemas como los de desalinización por absorción o destilación por membrana, maximiza la eficiencia operativa y aumenta la confiabilidad del sistema, todo esto gracias a la utilización exclusiva de energía renovable, lo que permite de forma holística reducir la huella de carbono operativa.

Los resultados de la Figura 1 muestran que los países con mayores niveles de PIB (Estados Unidos, Japón, Alemania, Reino Unido, Francia...) se alejan del componente relacionado con consumo de renovables e intensidad energética, comportamiento que se entiende al comprender los resultados del estudio de (Liddle y Sadorsky, 2021), quienes expusieron que los niveles de eficiencia energética entre el 2000-2014 hacen complejo prever una reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el corto plazo; en este entendido, los gobiernos y grandes industrias deben aumentar el presupuesto para impulsar la I+D orientado a las tecnologías de conservación de energía y tecnologías que faciliten el ahorro energético (Maolin y Yufei, 2020). De otro mano, el estudio de Tariq et al. (2022) concluyó que en el sur de Asia el crecimiento económico contribuye a incrementar los GEI, y para resolver este fenómeno, es necesario actualizar e implementar el uso de tecnologías con el fin de disminuir dichas emisiones, es decir, que los ingresos fiscales por el PIB deben redireccionarse en mejor medida hacia el gasto en I+D, y de esta forma, aportar a la eficiencia energética.

De acuerdo con Avrin (2018), hay intenciones políticas globales, como la manifestada por China, país que pretende reducir las emisiones de GEI en un 80 % para el 2050, lo que implicará una transición hacia fuentes energéticas renovables, lo que provocaría un incremento en un 30 % en los costos de generación energética; sin embargo, a nivel global se detectan tendencias positivas en materia de inversión para la generación de energía limpia (Gómez, 2018); para mantener dicha tendencia positiva en inversiones para los renovables y buscar reducir las emisiones de CO₂, Fersi y Chtourou (2018) manifiestan que es fundamental el apoyo de los gobiernos, laboratorios y universidades para apoyar estudios, investigaciones y financiación para reducir los costos de generación de energía de fuentes renovables, alianzas que requieren de la Triple Hélice —Estado, Universidades, Sector Privado— (Adeniyi y Adewuyi, 2019); a modo de ejemplificar, para los países del occidente africano es complejo que las industrias e infraestructura exportadora generen energía renovable por sus propios esfuerzos, es fundamental entonces, el impulso de la inversión de los gobiernos, se requiere el compromiso de todos los países, todas las industrias, toda la comunidad internacional (Kofanova, 2018), todas las contribuciones son importantes.

Estudios como el de Rockström et al. (2017) arrojan un contundente llamado a los gobiernos y empresas, exponiendo que, si no hay señales contundentes desde la política para apoyar una rápida transición energética hacia los renovables, entonces será complejo imaginar mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C, esta transición, la eficiencia energética, se logra si grandes rentas del PIB de los países, se destina a construir capacidades (I+D).

CONCLUSIÓN

Entre los hallazgos de esta investigación destaca que las variables económicas (PIB y Gasto en I+D) y las energéticas (intensidad energética y consumo de renovables) se agrupan en dos componentes distintos bajo el Análisis de Componentes Principales (ACP), indicando una falta de integración positiva entre crecimiento económico y uso sostenible de energías en los 37 países de la OCDE analizados. Islandia aparece en solitario en un clúster debido a su alto consumo de renovables e intensidad energética, por su parte, el resto de los países forman un segundo clúster, con Estados Unidos sobresaliendo por su alto PIB y Gasto en I+D. En el primer componente (intensidad energética y consumo de renovables) destacan países como Islandia, los países escandinavos (Suecia, Noruega, Finlandia), República Checa, Dinamarca, Canadá, Costa Rica y Colombia; en el segundo componente (PIB y Gasto en I+D) destacan Estados Unidos, Corea, Israel, Reino Unido, Alemania, Italia, Suiza, Luxemburgo y Países Bajos. Estos resultados hacen evidente la necesidad de políticas que dinamicen el consumo de energía renovable y mejoren la eficiencia energética, principalmente en países con alto crecimiento económico.

Esta investigación abre posibilidades para futuros estudios que aborden cómo los países líderes en eficiencia energética han logrado su posicionamiento y cómo estas estrategias pueden aplicarse en países con altos registros de su PIB y Gasto en I+D. También se podría enfocar en regiones específicas, como Latinoamérica, o internamente en un país, como Colombia, para entender la relación entre generación de PIB, inversión en I+D y generación de energía renovable. La investigación se limitó por la disponibilidad de datos hasta 2020, por lo que futuros estudios podrían analizar el periodo postpandemia y considerar variables adicionales como inversión en energía renovable y sostenibilidad económica.

Declaración sobre conflicto de interés

Los autores de este artículo manifiestan que la información expresada en el documento no afecta a ninguna de las instituciones que aportaron directa o indirectamente con la información. Cada aseveración se dio como resultado del análisis y el trabajo autónomo de los investigadores, por lo cual cada conclusión es propia de los autores.

Contribución de los autores

Juan David Cruz-Negrete, es el autor principal, se encargó de la revisión bibliográfica sobre la temática, organizar la base de datos, aplicar las herramientas a través del *software Jamovi*, preparar las versiones de documento, y el envío a la revista.

Yamilhet Andrade-Arango, y Andrea Vaca-López como coautoras, y directoras de tesis doctoral del autor principal, aportaron con la revisión de las diversas versiones del artículo, propusieron referencias y ajustes a las posturas que el autor principal redactó en el documento; apoyaron en la redacción de la introducción, discusión y análisis de resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abolhosseini, S., Heshmati, A. y Altmann, J. (2014). A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies. *IZA Discussion Paper*, 8145, 1–36. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2432429>
- Adeniyi, O. y Adewuyi, A. O. (2019). Energy consumption and sectoral trade in selected West African economies. *International Journal of Global Energy Issues*, 42(1–2), 81–125. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2019.100691>
- Adua, L. (2020). Reviewing the complexity of energy behavior: Technologies, analytical traditions, and household energy consumption data in the United States. *Energy Research and Social Science*, 59(April 2019), 101289. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101289>
- Ang, J. B. (2008). Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. *Journal of Policy Modeling*, 30(2), 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2007.04.010>
- Atik, H. y Ünlü, F. (2019). The Measurement of Industry 4.0 Performance through Industry 4.0 Index: An Empirical Investigation for Turkey and European Countries. *Procedia Computer Science*, 158, 852–860. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.123>
- Avrin, A. (2018). China's power sector decarbonization: modeling emission reduction potential, technical feasibility and cost efficiency of inter-sectoral approaches [University of California, Berkeley]. In *University of California*. <https://escholarship.org/uc/item/98384265>
- Banco Mundial. (2021). *Datos de libre acceso del Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/>
- Betancur Pérez, J. F. y Rodríguez Valencia, N. (2022). *Módulo: Eficiencia Energética*.
- Biesiot, W. y Noorman, K. J. (1999). Energy requirements of household consumption: a case study of The Netherlands. *Ecological Economics*, 28(3), 367–383. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00113-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00113-X)
- British Petroleum - BP. (2019). BP Statistical Review of World Energy Statistical Review of World. In *The Editor BP Statistical Review of World Energy: Vol. 68th editi*.
- Butler, C. (2022). *Energy Poverty, Practice, and Policy* (Palgrave Macmillan, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99432-7>
- Dadzie, J., Runeson, G. y Ding, G. (2020). Assessing determinants of sustainable upgrade of existing buildings: The case of sustainable technologies for energy efficiency. *Journal of Engineering, Design and Technology*,

18(1), 270–292. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2018-0148>

- Di Domenico, L., Raberto, M. y Safarzynska, K. (2023). Resource scarcity, circular economy and the energy rebound: A macro-evolutionary input-output model. *Energy Economics*, 128, 107155. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107155>
- Dietzenbacher, E., Kulionis, V. y Capurro, F. (2020). Measuring the effects of energy transition: A structural decomposition analysis of the change in renewable energy use between 2000 and 2014. *Applied Energy*, 258, 114040. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114040>
- Energy Information Administration - EIA. (2013). *Residential Energy Consumption Survey (RECS) 2009 Technical Documentation Summary*. <http://www.eia.gov/consumption/residential/methodology/2009/pdf/techdoc-summary010413.pdf>
- Emir, F. y Bekun, F. V. (2019). Energy intensity, carbon emissions, renewable energy, and economic growth nexus: New insights from Romania. *Energy & Environment*, 30(3), 427–443. <https://doi.org/10.1177/0958305X18793108>
- Enerdata. (2020). *Global Energy Statistical Yearbook 2020*. <https://yearbook.enerdata.net/>
- Fersi, S. y Chtourou, N. (2018). Economic analysis of investment projects in renewable energies for a sustainable energy system. *International Journal of Global Energy Issues*, 41(5–6), 323–339. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2018.097205>
- Foro Económico Mundial. (2021). *Digital Culture: The Driving Force of Digital Transformation* (Issue June). http://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Culture_Guidebook_2021.pdf
- Ghaffour, N., Lattemann, S., Missimer, T., Ng, K. C., Sinha, S. y Amy, G. (2014). Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies. *Applied Energy*, 136, 1155–1165. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.033>
- Giacosa, G. y Walker, T. R. (2022). A policy perspective on Nova Scotia's plans to reduce dependency on fossil fuels for electricity generation and improve air quality. *Cleaner Production Letters*, 3, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100017>
- Gomez Echeverri, L. (2018). Investing for rapid decarbonization in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 30, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.02.010>
- Halicioglu, F. (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy*, 37(3), 1156–1164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.012>
- Harichandan, S., Kar, S. K., Bansal, R., Mishra, S. K., Balathanigaimani, M. S. y Dash, M. (2022). Energy transition research: A bibliometric mapping of current findings and direction for future research. *Cleaner Production Letters*, 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100026>
- Hasanbeigi, A. y Price, L. (2012). A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3648–3665. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.029>
- Heidrich, F., Goncalves de Morais, D. y Blumetti Facó, J. (2020). La teoría de las opciones reales en la gestión de inversiones en la industria 4.0: un estudio de caso. *Revista De Gestão, Finanças E Contabilidade*, 10(2), 60–85.
- Jamovi. (2022). *The jamovi project* ((Version 2.3)). <https://www.jamovi.org>
- Kakodkar, R., He, G., Demirhan, C. D., Arbabzadeh, M., Baratsas, S. G., Avraamidou, S., Mallapragada, D., Miller, I., Allen, R. C., Gençer, E. y Pistikopoulos, E. N. (2022). A review of analytical and optimization methodologies for transitions in multi-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112277>
- Kofanova, O. (2018). Climate change modeling in the context of urban decarbonization strategy. *Journal of Engineering Sciences*, 5(1), H 1-H 6. [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).h1](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).h1)
- Lee, K. y Lim, C. (2001). Technological regimes, catching-up and leapfrogging: findings from the Korean industries. *Research Policy*, 30(3), 459–483. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00088-3](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00088-3)
- Licona Michel, Á. (2023). La inversión en educación e I&D y su contribución en la transformación económica de Corea del Sur. *Revista Nicolaita de Estudios Económicos*, 17(2), 31–55. <https://doi.org/10.33110/rnee.v17i2.339>
- Liddle, B. y Sadorsky, P. (2021). Energy efficiency in OECD and non-OECD countries: estimates and convergence. *Energy Efficiency*, 14(72), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09992-7>
- Manfren, M., Sibilla, M. y Tronchin, L. (2021). Energy Modelling and Analytics in the Built Environment—A Review of Their Role for Energy Transitions in the Construction Sector. *Energies*, 14(3), 679. <https://doi.org/10.3390/en14030679>
- Maolin, L. y Yufei, R. (2020). The ‘double-edged effect’ of progress in energy-biased technology on energy efficiency: A comparison between the manufacturing sector of China and Japan. *Journal of Environmental Management*, 270(110794), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110794>
- Marra, A. y Colantonio, E. (2023). On public policies in the energy transition: Evidence on the role of socio-technical regimes for renewable technologies. *Energy Economics*, 128, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107126>
- Merino, L. (2012). Energías renovables para todos. In *Iberdrola*. https://www.energias-renovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/cuaderno_GENERAL.pdf
- Oliveira, M. C., Iten, M., Cruz, P. L. y Monteiro, H. (2020). Review on Energy Efficiency Progresses, Technologies Waste Heat Recovery. *Energies*, 13(6096), 1–24.
- Pata, U. K., Alola, A. A., Erdogan, S. y Kartal, M. T. (2023). The influence of income, economic policy uncertainty, geopolitical risk, and urbanization on renewable energy investments in G7 countries. *Energy Economics*, 128,

107172. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107172>
- Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N. y Schellnhuber, H. J. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), 1269–1271. <https://doi.org/10.1126/science.aah3443>
- Rozo García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177–191. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Silva, M. y Rocha, C. (2020). Avaliação do Nível de Maturidade da Indústria 4.0: O Caso de uma Empresa Estratégica de Defesa. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies [FSRJ]*, 12(1), 31–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2020.v12i1.455>
- Soytas, U., Sari, R. y Ewing, B. T. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, 62(3–4), 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.009>
- Stern, D. I. (2012). Modeling international trends in energy efficiency. *Energy Economics*, 34(6), 2200–2208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.03.009>
- Strielkowski, W., Dvořák, M., Rovný, P., Tarkhanova, E. y Baburina, N. (2021). 5G Wireless Networks in the Future Renewable Energy Systems. *Frontiers in Energy Research*, 9(714803), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.714803>
- Tariq, G., Sun, H., Ali, I., Pasha, A. A., Khan, M. S., Rahman, M. M., Mohamed, A. y Shah, Q. (2022). Influence of green technology, green energy consumption, energy efficiency, trade, economic development and FDI on climate change in South Asia. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20432-z>
- Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. Editorial Reverté. https://www.academia.edu/45608872/Jaime_González_Velasco_Energías_Renovables_2009_ISBN_9788429179125
- Wang, Z., Han, B. y Lu, M. (2016). Measurement of energy rebound effect in households: Evidence from residential electricity consumption in Beijing, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 852–861. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.179>
- World Economic Forum. (2020). *Diversity, Equity and Inclusion 4.0: A toolkit for leaders to accelerate social progress in the future of work | World Economic Forum* (Issue June).