

**GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN
DE EMPRESAS**

CURSO ACADÉMICO 2024-2025

TRABAJO FIN DE GRADO

**IMPACTO DE LAS ENERGÍAS VERDES EN LA
ECONOMÍA REGIONAL**

**IMPACT OF GREEN ENERGIES ON REGIONAL
ECONOMY**

AUTOR/A: DANIEL PALLÁS DE MIER

DIRECTOR/A: VALERIANO MARTINEZ SAN ROMAN

CONVOCATORIA DE DEFENSA:
JULIO 2025

La persona que ha elaborado el TFG que se presenta es la única responsable de su contenido. La Universidad de Cantabria, así como quien ha ejercido su dirección, no son responsables del contenido último de este Trabajo.

En tal sentido, Don/Doña: Daniel Pallás de Mier se hace responsable:

1. De la AUTORÍA Y ORIGINALIDAD del trabajo que se presenta.
2. De que los DATOS y PUBLICACIONES en los que se basa la información contenida en el trabajo, o que han tenido una influencia relevante en el mismo, han sido citados en el texto y en la lista de referencias bibliográficas.

Asimismo, declara que el Trabajo Fin de Grado tiene una extensión de máximo 10.000 palabras, excluidas tablas, cuadros, gráficos, bibliografía y anexos.

Fdo.: Daniel Pallás de Mier.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Intensidad Energética y Crecimiento Económico.....	8
2.2. Población y Demanda Energética.....	8
2.3. Mix Energético y Energías Renovables	9
2.4. Curva de Kuznets Ambiental	9
2.5. Marco Normativo y Políticas Energéticas	10
3. METODOLOGÍA	11
3.1. Horizonte Temporal y Selección de Países.....	11
3.2. Definición de Variables	12
3.3. Fuentes de Datos	13
3.4. Herramientas Econométricas Utilizadas	13
3.5. Limitaciones del Estudio.....	14
4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	14
4.1. Descripción de los Datos.....	14
4.2. Análisis Gráfico Preliminar.....	15
4.2.1. Relación entre PIB per cápita y Emisiones de CO2 per cápita.....	16
4.2.2. Relación entre Población y Demanda Energética Total.....	17
4.2.3. Evolución del Uso de Energías Renovables	18
4.2.4. Relación entre Emisiones de CO2 per cápita y Porcentaje de Renovables.....	18
4.2.5. Relación entre Intensidad Energética y Porcentaje de Renovables	19
4.3. Análisis Econométrico	20
4.3.1. Modelo 1: Impacto del PIB per cápita y su cuadrado en las Emisiones de CO2 per cápita (Evaluación de la CKA)	20
4.3.2. Modelo 2: Impacto de la Población y el PIB per cápita en la Demanda Energética Total	21
4.3.3. Modelo 3: Determinantes del Porcentaje de Energías Renovables.....	22
4.4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS ECONOMÉTRICOS.....	22
5. DISCUSIÓN.....	23
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
7. REFERENCIAS	26
8. ANEXOS.....	28

RESUMEN

Este trabajo examina la compleja interrelación entre la intensidad energética, el crecimiento económico y la transición hacia energías renovables, centrándose en un conjunto de países europeos principales, las naciones BRICS, y otras economías desarrolladas como Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia. Se integra un enfoque econométrico basado en datos empíricos que abarcan desde 1980 hasta 2019. A partir de la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), se explora cómo la diversificación del mix energético y la adopción de tecnologías limpias pueden influir en la intensidad energética y en los impactos ambientales asociados al crecimiento económico.

Los resultados económéticos, obtenidos mediante modelos de panel con efectos fijos y validados con el test de Hausman, indican que el logaritmo del PIB per cápita muestra una relación inicial positiva con las emisiones de CO₂ (proxy), aunque el término cuadrático no resulta estadísticamente significativo, lo que no permite confirmar la forma de U invertida de la CKA para esta muestra y proxy de emisiones. Sin embargo, un mayor porcentaje de energías renovables en el mix energético se asocia significativamente con menores emisiones de CO₂ (proxy) y una menor intensidad energética. Estos hallazgos sugieren que la sostenibilidad puede avanzar mediante políticas energéticas bien orientadas, especialmente en etapas más avanzadas de desarrollo, y que las renovables juegan un papel crucial.

Dos realidades se desprenden de este estudio: a más gente y más riqueza por persona, mayor es la sed de energía que mueve al mundo. Frente a esto, apostar por un abanico energético más amplio, donde las fuentes renovables sean las protagonistas, se revela no solo como una senda para ser más inteligentes con la energía que consumimos, sino también como una forma de curar, poco a poco, las heridas del planeta. Por eso mismo, incorporar las tecnologías limpias a nuestro día a día se convierte en una pieza clave para poder hacer frente a los enormes retos que nos plantea el cambio climático.

Este análisis también muestra la importancia de crear estrategias que sepan combinar nuevas ideas tecnológicas, inversiones en infraestructura verde y marcos legales que de verdad abran paso a la transición energética. Estas acciones son esenciales para levantar un modelo económico con capacidad de resistencia y más amable con el planeta, siempre tratando de encontrar un equilibrio entre el progreso económico y la sostenibilidad. Las ideas finales ofrecen puntos de partida útiles para las personas que diseñan las políticas energéticas en las naciones estudiadas, apuntando al papel central que deben jugar las renovables y la eficiencia.

Palabras clave: Intensidad energética; crecimiento económico; energías renovables; Curva de Kuznets Ambiental; política energética; datos de panel; BRICS.

ABSTRACT

This paper examines the complex interrelationship between energy intensity, economic growth, and the transition to renewable energy, focusing on a group of major European countries, the BRICS nations, and other developed economies such as the United States, Japan, Canada, and Australia. It integrates an econometric approach based on empirical data spanning from 1980 to 2019. Based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, it explores how energy mix diversification and the adoption of clean technologies can influence energy intensity, and the environmental impacts associated with economic growth.

The econometric results, obtained using panel models with fixed effects and validated with the Hausman test, indicate that the logarithm of GDP per capita displays an initial positive relationship with CO₂ emissions (proxy), although the quadratic term is not statistically significant, which does not confirm the inverted U-shape of the EKC for this sample and emissions proxy. However, a higher percentage of renewable energy in the energy mix is significantly associated with lower CO₂ emissions (proxy) and lower energy intensity. These findings suggest that sustainability can be advanced through well-targeted energy policies, especially at more advanced stages of development, and that renewables play a crucial role.

Two realities emerge from this study: the more people there are and the greater the wealth per person, the greater the thirst for energy that drives the world. Given this, investing in a broader energy spectrum, where renewable sources are the protagonists, is revealed not only as a path to being smarter with the energy we consume, but also as a way to gradually heal the planet's wounds. For this reason, incorporating clean technologies into our daily lives becomes a key element in facing the enormous challenges posed by climate change.

This analysis also highlights the importance of creating strategies that combine new technological ideas, investments in green infrastructure, and legal frameworks that truly pave the way for the energy transition. These actions are essential for building a resilient and planet-friendly economic model, always seeking to strike a balance between economic progress and sustainability. The final insights offer useful starting points for energy policymakers in the countries studied, highlighting the central role that renewables and efficiency must play.

Keywords: Energy intensity; economic growth; renewable energies; Environmental Kuznets Curve; energy policy; panel data; BRICS.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la Revolución Industrial, el desarrollo económico ha contribuido de manera decisiva a la mejora de la calidad de vida para una gran parte de la población mundial. Sin embargo, este progreso, sustentado en un modelo productivo intensivo y dependiente de combustibles fósiles, ha traído consigo un coste ambiental que se manifiesta en un aumento constante de las emisiones de gases de efecto invernadero y una degradación del entorno natural. En este contexto, surge un desafío clave para las economías actuales: compatibilizar el crecimiento económico con la transición hacia un modelo energético en equilibrio sostenible con el planeta.

Para analizar esta relación entre crecimiento económico y sostenibilidad ambiental, suele recurrirse a la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), una hipótesis formulada por Grossman y Krueger (1991) que describe una particular trayectoria en la relación entre el desarrollo económico y el impacto ambiental. Esta postula que, en las fases iniciales del crecimiento, la huella ambiental de un país tiende a aumentar. Sin embargo, una vez que se alcanza un determinado umbral de renta, esta tendencia puede revertirse, dando paso a una fase en la que la degradación ambiental comienza a disminuir gracias a la adopción de tecnologías más limpias, y a una mayor conciencia social que impulsa la creación de políticas ambientales más firmes. De esta manera, el vínculo entre el crecimiento económico y la contaminación describiría gráficamente una "U" invertida.

Hoy en día, tanto las economías desarrolladas, como Europa, como las potencias emergentes del grupo BRICS, enfrentan un desafío decisivo: mantener su dinamismo económico mientras reducen la presión ambiental ejercida por sus modelos productivos. En el contexto de una transición energética global, muchas de estas naciones han comenzado a apostar por las energías renovables como una vía para diversificar su matriz energética y mitigar su impacto ambiental. Sin embargo, este proceso no está exento de dificultades. Persisten barreras relevantes, como las diferencias en el acceso a los recursos naturales renovables, una dependencia histórica de los combustibles fósiles difícil de superar y una velocidad de adopción de tecnologías sostenibles muy desigual entre territorios (Omri & Nguyen, 2014). Las políticas energéticas se aplican con distinta intensidad, dando lugar a asimetrías estructurales y trayectorias de transición heterogéneas hacia modelos más sostenibles.

El cambio climático, impulsado por el continuo incremento de las emisiones de CO₂, representa uno de los desafíos más importantes de nuestra era [uno de los principales retos a nivel global] (Al-Mulali et al., 2015). Sus efectos trascienden la esfera ambiental, afectando a la economía y al tejido social a través de fenómenos meteorológicos cada vez más extremos, la pérdida de biodiversidad y una creciente amenaza para recursos fundamentales como el agua y los alimentos. Para los países analizados en este estudio, la transición hacia una matriz energética más limpia y la mejora de la eficiencia se perfilan como soluciones clave. Este proceso requiere inversiones a gran escala, una cooperación internacional sólida y marcos regulatorios que realmente impulsen la transformación (Sadorsky, 2009). La digitalización y el desarrollo de redes inteligentes, por su parte, podrían jugar un papel fundamental en la gestión optimizada de las energías renovables.

Este estudio utiliza un análisis económétrico para evaluar si en un conjunto diverso de economías —que incluye a Europa, los BRICS, Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia— la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ presenta la forma de "U" invertida postulada por la Curva de Kuznets Ambiental. La investigación se centra en la compleja interacción entre la intensidad energética, el crecimiento económico y el avance hacia fuentes de energía más limpias, analizando también el impacto que el crecimiento demográfico y la demanda global de energía tienen sobre las emisiones de CO₂. Se busca así aportar un enfoque multidimensional que ayude a

la formulación de políticas que no solo mitiguen el cambio climático, sino que también promuevan un desarrollo más equitativo y resiliente.

Este trabajo pretende ofrecer evidencia empírica que sirva de guía en el diseño de políticas energéticas sostenibles. La transición hacia un modelo económico bajo en carbono no solo es una respuesta necesaria al cambio climático, sino también una oportunidad para mejorar la competitividad, generar empleo verde y reducir la dependencia energética exterior (World Bank, 2012). Este análisis también busca contribuir al debate académico sobre la aplicabilidad de la CKA, destacando las particularidades estructurales de cada economía. Por último, se subraya la importancia de integrar criterios de justicia social en el diseño de estas políticas, asegurando que los beneficios de la transición alcancen a toda la sociedad.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 presenta el marco teórico, donde se abordan los conceptos fundamentales de la investigación y se revisan los estudios previos. La sección 3 detalla la metodología econométrica, la selección de variables y las fuentes de datos. La sección 4 expone el análisis de los datos y los resultados obtenidos. La sección 5 discute estos hallazgos en el contexto más amplio de las políticas energéticas y el desarrollo sostenible. Finalmente, la sección 6 expone las conclusiones del estudio y formula recomendaciones para el diseño de políticas públicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Intensidad Energética y Crecimiento Económico

La intensidad energética se define como la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de Producto Interior Bruto (PIB). Este indicador funciona como un reflejo de la eficiencia energética de una economía, mostrando cuánta energía se requiere para generar prosperidad y hasta qué punto su dinamismo depende del consumo energético. A nivel global, la relación entre el crecimiento económico y la intensidad energética es un tema central, pues una alta intensidad suele estar asociada a una mayor huella de contaminación y a un volumen más elevado de emisiones de gases de efecto invernadero (Sadorsky, 2009). Sectores como la industria pesada o el transporte, que han sido históricamente grandes consumidores de energía, ejemplifican este vínculo, ya que su actividad ha estado ligada durante décadas a los combustibles fósiles.

Avanzar hacia un modelo económico con una menor intensidad energética es, por tanto, un paso fundamental para mitigar el impacto ambiental del crecimiento. La incorporación de tecnologías limpias y el fomento de fuentes renovables abren la posibilidad de reducir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2022). La disminución de la intensidad energética no solo representa un alivio para el medio ambiente, sino que puede mejorar la competitividad de las economías cuando se traduce en una reducción efectiva de los costes energéticos, un factor clave en un mercado globalizado (Díaz et al., 2019). Para lograrlo, es necesario un enfoque integral que incluya desde la modernización de infraestructuras hasta la creación de incentivos fiscales y regulaciones que promuevan la adopción de más eficientes y sostenibles.

Las políticas públicas desempeñan un papel protagonista en este proceso de transición hacia modelos de consumo energético más inteligentes. La colaboración entre el sector público y el privado es fundamental para canalizar la financiación hacia proyectos de investigación e innovación que optimicen el uso de los recursos energéticos (Parlamento Europeo, 2017). Igualmente, relevante es la labor de educar y sensibilizar a la ciudadanía, ya que los hábitos de consumo cotidianos pueden ser decisivos para avanzar hacia un modelo más consciente y sostenible. Experiencias como los programas de eficiencia energética en Alemania o los estímulos fiscales en los países nórdicos ilustran cómo unas políticas públicas bien diseñadas pueden conducir a una reducción notable de la intensidad energética.

2.2. Población y Demanda Energética

El crecimiento demográfico es uno de los principales factores que impulsan la demanda mundial de energía. A medida que aumenta la población, se incrementa la necesidad de energía para cubrir demandas básicas como la electricidad residencial, el transporte o los servicios públicos. Este fenómeno suele ir acompañado de un proceso de urbanización acelerada, lo que concentra e intensifica el consumo energético en las grandes ciudades. Estudios como el de Al-Mulali et al. (2015) han evidenciado que el crecimiento poblacional no solo eleva la demanda energética, sino que también tiende a agravar los problemas ambientales al incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero.

La relación entre población y demanda de energía no es, sin embargo, una simple correspondencia directa. Factores como el nivel de desarrollo económico, la estructura de edad de la población o la distribución geográfica de los habitantes influyen de manera decisiva en los patrones de consumo (López & Martínez, 2019). Los países con una alta concentración urbana, por ejemplo, suelen registrar un consumo energético per cápita más elevado, lo cual es un reflejo de la densidad de sus infraestructuras y de su actividad

económica. La disponibilidad de tecnologías limpias y la implementación de políticas de eficiencia energética pueden funcionar como un contrapeso, moderando el impacto del crecimiento demográfico en las emisiones.

Los flujos migratorios, tanto internos como internacionales, también pueden redibujar el mapa de la demanda energética. Las áreas que experimentan un rápido crecimiento poblacional debido a la inmigración a menudo ven sus recursos energéticos sometidos a una fuerte presión, lo que subraya la necesidad de una planificación estratégica a nivel local y regional. En este sentido, en grandes metrópolis se han impulsado iniciativas para mejorar la eficiencia energética en la edificación y en el transporte público, como una forma de mitigar el impacto del crecimiento poblacional en la demanda de energía (Martínez-Zarzoso et al., 2007). Por ello, fomentar una cultura de uso responsable de los recursos es fundamental para que el aumento de la población sea compatible con los objetivos de sostenibilidad global.

2.3. Mix Energético y Energías Renovables

El mix energético, que se define como la combinación de las distintas fuentes de energía primaria que un país utiliza para satisfacer sus necesidades, es un factor determinante de su impacto ambiental. En las últimas décadas, la transición hacia un mix energético más limpio ha ganado un protagonismo indiscutible en la agenda global, impulsada por acuerdos internacionales como el Acuerdo de París y las directrices de diversos bloques económicos para reducir las emisiones de CO₂ (Ramos Rodríguez, 2021). Una matriz energética que priorice las fuentes renovables —como la solar, eólica, hidráulica o geotérmica— no solo puede lograr una disminución importante de los gases de efecto invernadero, sino que también contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, que a menudo están sujetos a una gran volatilidad de precios y a tensiones geopolíticas (Omri & Nguyen, 2014).

Este cambio hacia las energías limpias conlleva profundas transformaciones económicas y sociales. Por una parte, estimula la creación de empleo en sectores de futuro, como la fabricación e instalación de paneles solares y turbinas eólicas. Por otra, proporciona una mayor resiliencia frente a las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles en los mercados internacionales (BBVA Research, 2022). El camino de esta transición, sin embargo, no es sencillo. Requiere inversiones masivas en infraestructuras, a menudo enfrenta la resistencia de industrias tradicionales y plantea el reto de garantizar un suministro energético estable y fiable. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía y la creación de redes eléctricas inteligentes son piezas clave para consolidar este nuevo modelo energético (Hernández & Ruiz, 2019).

Un ejemplo de los esfuerzos en este campo es el creciente interés en el hidrógeno verde como vector energético. Esta tecnología se perfila como una solución prometedora para descarbonizar sectores de difícil electrificación, como la industria pesada o el transporte de larga distancia (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022). Las alianzas internacionales para la transferencia de tecnología y conocimiento también actúan como un motor en esta transición hacia un mix energético más limpio y diversificado. Algunas naciones ya han tomado la delantera en este ámbito, con proyectos innovadores que combinan, por ejemplo, la generación de energía eólica con la producción de hidrógeno a gran escala.

2.4. Curva de Kuznets Ambiental

La Curva de Kuznets Ambiental (CKA) es una hipótesis que plantea la existencia de una relación en forma de "U" invertida entre el crecimiento económico y la degradación ambiental (Grossman & Krueger, 1991). Dicha hipótesis sugiere que, en las etapas

iniciales de desarrollo, el impacto ambiental tiende a aumentar a medida que la industrialización y la explotación de recursos se intensifican. Sin embargo, una vez alcanzado un cierto umbral de ingresos per cápita, esta tendencia podría invertirse, y el deterioro ambiental comenzaría a disminuir gracias a la adopción de tecnologías más limpias y a la implementación de regulaciones ambientales más estrictas. Esta idea se ha convertido en un punto de referencia en el debate sobre la sostenibilidad del crecimiento.

La aplicabilidad empírica de la CKA ha sido objeto de un intenso debate, especialmente al observar las trayectorias de desarrollo tan dispares que han seguido los distintos países (Kuznets, 2020). Mientras que algunas naciones industrializadas parecen haber logrado disociar su crecimiento económico de ciertos tipos de contaminación, otras economías, en particular aquellas emergentes con una fuerte dependencia de la extracción de recursos naturales o de la manufactura pesada, parecen encontrarse todavía en la fase ascendente de la curva. La transición hacia un mix energético más limpio, junto con la aplicación de incentivos fiscales y regulaciones ambientales más firmes, ha demostrado ser un camino efectivo para mitigar los impactos negativos del crecimiento en algunas regiones.

La CKA no debe interpretarse como una ley universal; su forma y el punto de inflexión varían considerablemente en función del tipo de contaminante, la región o el sector económico que se analice. Por ejemplo, se ha observado que la curva tiende a cumplirse para contaminantes locales como el dióxido de azufre, pero es menos clara para emisiones de alcance global como el CO₂. Esta heterogeneidad subraya la necesidad de diseñar políticas ambientales adaptadas a cada contexto específico y de desarrollar indicadores más completos que permitan medir la sostenibilidad de una manera más precisa e integral (Martínez-Zarzoso & Bengoechea-Moranco, 2003).

2.5. Marco Normativo y Políticas Energéticas

El marco normativo es un elemento fundamental para orientar la transición energética y controlar las emisiones de gases de efecto invernadero. Desde la segunda mitad del siglo XX, se han desarrollado diversos acuerdos internacionales con el objetivo de guiar a las economías hacia modelos de desarrollo más sostenibles y bajos en carbono. Entre los hitos más relevantes se encuentran el Protocolo de Kioto de 1997 y, más recientemente, el Acuerdo de París de 2015. Este último no solo establece metas para la reducción de emisiones, sino que también fomenta la cooperación global y el apoyo financiero y tecnológico a los países en desarrollo para hacer frente al cambio climático.

A nivel regional, la Unión Europea ha sido particularmente activa en la formulación de políticas energéticas y climáticas. El "Pacto Verde Europeo" es la iniciativa más ambiciosa hasta la fecha, con el objetivo de convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro para el año 2050 (Comisión Europea, 2023). Esta estrategia se materializa a través de un conjunto de políticas que incluyen incentivos para la adopción de energías renovables, regulaciones estrictas sobre eficiencia energética, la promoción de la economía circular y la creación de fondos de transición justa para apoyar a las comunidades y sectores más afectados por el proceso de descarbonización.

A pesar de los avances logrados, la implementación de estas políticas enfrenta retos significativos. Las diferencias en el acceso a tecnologías limpias entre los Estados miembros, la resistencia de ciertos sectores industriales y la necesidad de movilizar una inversión masiva son algunos de los principales desafíos (Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2024). El compromiso de la UE con la sostenibilidad y la justicia climática, no obstante, sirve como un referente a nivel mundial, demostrando que es posible alinear el crecimiento económico con la protección del medio ambiente (Confederación Sindical de Comisiones Obreras, 2021).

Estos marcos regulatorios no solo buscan resolver los problemas actuales, sino que aspiran a garantizar un futuro más equitativo y sostenible, para lo cual es fundamental que sean flexibles y capaces de adaptarse a los contextos y desafíos específicos de cada país.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo y explicativo, basado en un análisis econométrico de datos de panel para investigar las relaciones entre la transición energética, la intensidad energética, las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico. La selección de una muestra de países que incluye las principales economías europeas, las naciones BRICS y otros países desarrollados clave como Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia, permite analizar un conjunto heterogéneo de realidades económicas y energéticas. El análisis abarca el periodo comprendido entre 1980 y 2019, un lapso temporal que permite identificar tendencias y patrones de largo plazo, ofreciendo así una perspectiva integral sobre cómo las políticas energéticas han influido en la eficiencia y la sostenibilidad de las economías estudiadas (Hernández & Ruiz, 2019).

3.1. Horizonte Temporal y Selección de Países

El periodo de análisis, que se extiende desde 1980 hasta 2019, ha sido seleccionado por su relevancia histórica en el ámbito de la política energética y ambiental. Estas cuatro décadas han sido testigos de hitos fundamentales, como la celebración del Protocolo de Kioto en 1997 y la firma del Acuerdo de París en 2015, que redefinieron el marco regulatorio global para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (López & Martínez, 2019). Este intervalo temporal es suficientemente amplio para capturar los efectos de fenómenos como la globalización, la reconfiguración de los mercados energéticos y la paulatina pero firme expansión de las energías renovables.

El estudio de este periodo permite evaluar la transición desde una economía global con una marcada dependencia de los combustibles fósiles hacia matrices energéticas más diversificadas. Si bien en la década de 1980 el petróleo y el carbón dominaban el suministro energético mundial, a partir del nuevo milenio se ha observado un progresivo incremento en la participación de fuentes renovables como la solar y la eólica (BBVA Research, 2022). El periodo también abarca crisis económicas de alcance global, como la crisis financiera de 2008, que alteraron tanto los patrones de consumo energético como la dinámica de inversión en infraestructuras sostenibles.

La selección de países busca una muestra representativa y diversa, que incluye:

- **Principales Países Europeos:** Alemania, Francia, Italia, España y Reino Unido, por su peso económico y por ser, en muchos casos, pioneros en la implementación de políticas de transición energética.
- **BRICS:** Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, como representantes de economías emergentes con un impacto creciente en el consumo energético global y con trayectorias de desarrollo muy diversas.
- **Otras Economías Desarrolladas Clave:** Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia, para ofrecer un contraste con el caso europeo y una visión más amplia de las dinámicas en países industrializados fuera de Europa.

Esta selección permite comparar economías con distintos niveles de desarrollo, diferentes dotaciones de recursos y estrategias energéticas divergentes. El contraste entre estos grupos es particularmente útil, ya que permite analizar las diferencias entre economías con políticas energéticas más consolidadas y mercados emergentes que, en muchos casos, todavía presentan una fuerte dependencia de los combustibles fósiles (Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2024; Díaz et al., 2019).

3.2. Definición de Variables

Para evaluar la relación entre crecimiento económico y sostenibilidad energética, se han definido las siguientes variables. La elección de una variable que aproxime las emisiones de CO₂, en lugar de una medida directa en toneladas métricas, responde a la necesidad de construir un panel de datos equilibrado y consistente a partir de las fuentes disponibles, que ofrecían mayor completitud para el consumo energético por tipo de fuente que para las emisiones totales agregadas.

- **Producto Interno Bruto per cápita (PIB pc):** Calculado como el PIB total (en millones de dólares constantes de 2017 ajustados por PPA, de Penn World Table 10.01) dividido entre la población (en millones, del Banco Mundial). Esta variable es fundamental para medir el crecimiento económico y su relación con la eficiencia energética y las emisiones. Se anticipa que un mayor PIB per cápita esté asociado, en general, a un mayor consumo de energía. En los modelos económétricos se utilizará su logaritmo neperiano.
- **Emisiones de CO₂ per cápita:** Esta variable se ha construido como una aproximación al impacto ambiental, calculada a partir de las emisiones de CO₂ derivadas del consumo de combustibles fósiles (en Petajulios, de la AIE) divididas entre la población (en millones, del Banco Mundial). Si bien no es una medida directa de las emisiones totales, sirve como un indicador relevante para evaluar el nivel de descarbonización de las economías analizadas (Hernández & Ruiz, 2019). Se utilizará su logaritmo natural en los modelos.
- **Población Total (Pob):** Obtenida del Banco Mundial, se expresa en millones de habitantes. En términos absolutos, la población es un factor que influye directamente en la demanda agregada de energía para usos residenciales, industriales y de transporte (Al-Mulali et al., 2015). Su logaritmo natural será empleado en el análisis.
- **Intensidad Energética (Int En):** Se calcula como el consumo total de energía primaria (en Petajulios, de la AIE) dividido por el PIB total. Este indicador mide la eficiencia con la que un país utiliza sus recursos energéticos para generar riqueza. Una menor intensidad energética sugiere una mayor eficiencia en la conversión de energía en producción económica (Sadorsky, 2009). Se utilizará su logaritmo natural.
- **Porcentaje de Energías Renovables (%Ren):** Calculado como el consumo de energía de fuentes renovables (en Petajulios, de la AIE) dividido entre el consumo final total de energía (en Petajulios, de la AIE), y multiplicado por 100. Esta variable mide la proporción de energía de origen renovable en el consumo final, indicando el grado de avance en la transición hacia un mix energético más sostenible.

3.3. Fuentes de Datos

Para garantizar la fiabilidad y comparabilidad del análisis, los datos se han obtenido de fuentes oficiales reconocidas internacionalmente. La selección de estas bases de datos responde a su prestigio y a la consistencia de sus series temporales, lo que permite un análisis robusto de las tendencias estructurales en el periodo estudiado. Las fuentes utilizadas son las siguientes:

- **Banco Mundial (World Development Indicators):** Se ha recurrido a esta fuente para obtener los datos de población total (pop) de los países seleccionados.
- **Agencia Internacional de la Energía (IEA):** De esta agencia se han extraído los datos relativos al consumo de energía. Específicamente, se han utilizado las series sobre consumo de combustibles fósiles (fossil (PJ)), consumo de energías renovables (ren (PJ)), consumo total de energía primaria (tpes PJ) y consumo final total de energía (TFC PJ).
- **Penn World Table (PWT) versión 10.01:** Esta base de datos ha sido la fuente para los datos de Producto Interno Bruto total (rgdpe), expresado en millones de dólares constantes de 2017 y ajustado por paridad de poder adquisitivo (PPA).

El uso combinado de estas fuentes, a pesar de requerir cálculos para derivar algunas de las variables finales del estudio, ha permitido construir un panel de datos sólido para el análisis econométrico.

3.4. Herramientas Econométricas Utilizadas

Para la estimación econométrica de las relaciones de interés, se emplearán modelos de datos de panel, una técnica idónea dada la naturaleza longitudinal de los datos (múltiples países observados a lo largo de varios años). Específicamente, se considerarán las siguientes herramientas:

- **Modelos de Efectos Fijos (FE):** Estos modelos son particularmente útiles en este contexto, ya que permiten controlar la heterogeneidad no observable y constante en el tiempo que es específica de cada país. Factores como la cultura institucional, la dotación de recursos naturales o las características geográficas, que no varían significativamente en el periodo de estudio, quedan así aislados, lo que ayuda a obtener estimaciones más consistentes y fiables de los coeficientes de interés.
- **Modelos de Efectos Aleatorios (RE):** De forma complementaria, se estimarán modelos de efectos aleatorios. Estos modelos asumen que la heterogeneidad no observable no está correlacionada con las variables explicativas incluidas en el modelo.
- **Test de Hausman:** Se aplicará este test para realizar una selección rigurosa entre el modelo de efectos fijos y el de efectos aleatorios. Si el test rechaza la hipótesis nula de que no existe correlación entre los efectos individuales y los regresores, se optará por el modelo de efectos fijos, ya que sus estimaciones serán más consistentes.

Las estimaciones se llevarán a cabo con el software econométrico R, utilizando paquetes especializados como plm para el análisis de datos de panel y stargazer para la presentación formal de los resultados. Para corregir posibles problemas de heterocedasticidad y autocorrelación en los errores, se utilizarán errores estándar robustos clusterizados por país. Esta técnica ajusta los errores estándar para tener en cuenta que las observaciones de un mismo país a lo largo del tiempo pueden estar correlacionadas, lo que proporciona inferencias estadísticas más fiables.

3.5. Limitaciones del Estudio

Si bien la metodología propuesta ofrece un marco de análisis robusto, es preciso reconocer ciertas limitaciones inherentes a la investigación. La disponibilidad y homogeneidad de los datos, a pesar de haber utilizado fuentes reconocidas, ha presentado desafíos. Esto ha obligado a calcular una variable para aproximar las emisiones de CO₂ per cápita y ha resultado en la pérdida de algunas observaciones, afectando especialmente a ciertos países BRICS en los primeros años del periodo de estudio. El panel de datos final consta de 109 observaciones, lo que podría limitar la potencia estadística de algunos de los análisis y la capacidad de generalizar los resultados de manera amplia.

La marcada heterogeneidad de las políticas energéticas y ambientales entre los países analizados es otra consideración importante. Mientras que algunas naciones europeas cuentan con estrategias de descarbonización ya consolidadas, varias de las economías emergentes incluidas en la muestra todavía dependen en gran medida de los combustibles fósiles para sostener su crecimiento (Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2024). Estas diferencias estructurales pueden influir en la magnitud y la significatividad estadística de los coeficientes estimados en los modelos econométricos.

Finalmente, existen factores de naturaleza cualitativa, como la estabilidad política, la percepción social del cambio climático o la voluntad política para implementar reformas estructurales, que son difíciles de cuantificar e incorporar en los modelos econométricos. Sin duda, estos elementos desempeñan un papel crucial en la velocidad y el alcance de la transición energética. Las dinámicas geopolíticas y los acuerdos multilaterales también condicionan de manera decisiva la efectividad de dicha transición en un contexto global interconectado.

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

4.1. Descripción de los Datos

El análisis de datos macroeconómicos y ambientales es clave para comprender la dinámica entre el desarrollo económico y su impacto ecológico. Históricamente, el crecimiento ha estado ligado a un aumento en la demanda de energía y, por extensión, de las emisiones de gases de efecto invernadero. La implementación de políticas de eficiencia y la transición hacia fuentes renovables son factores que pueden alterar esta relación a largo plazo. Para este estudio, se han recopilado datos de consumo energético, una aproximación a las emisiones de CO₂ y variables macroeconómicas de un panel de países que incluye las principales economías europeas, los BRICS, Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia, para el periodo 1980-2019. Tras el proceso de limpieza y transformación de los datos, el panel final para el análisis econométrico consta de 109 observaciones. La base de datos consolidada contiene información sobre el PIB per cápita, la población, las emisiones de CO₂ per cápita, la intensidad energética y el porcentaje de energías renovables.

Las estadísticas descriptivas de las variables, tanto en sus niveles originales como en su forma logarítmica, ofrecen una visión de la muestra final.

Tabla 1. Estadísticos Descriptivos de Variables Clave (Panel Completo, N=109)

Variable	N	Media	Desv. Est.	Mín.	Pctl(25)	Mediana	Pctl(75)	Máx.
PIB pc (USD 2017)	109	28,597.94	15,016.73	1,408.89	14,904.45	30,183.62	39,636.89	63,393.28
Emisiones CO2 pc (PJ Fósil/mill. hab.)	109	127.11	77.42	7.88	80.69	111.81	179.75	301.06
Población (millones)	109	235.33	393.99	14.59	46.67	63.09	174.79	1,433.78
% Renovables	109	16.35	14.42	0.25	6.95	11.31	21.97	58.98
Intensidad Energética (TPES/PIB)	109	0.01	0.002	0.002	0.004	0.01	0.01	0.01
Consumo Total Energía Primaria (TPES en PJ)	109	21,251.19	29,158.01	2,834.19	5,920.82	9,917.83	17,300.80	141,881.00
In(PIB pc)	109	10.03	0.83	7.25	9.61	10.32	10.59	11.06
In(Emisiones CO2 pc)	109	4.59	0.82	2.06	4.39	4.72	5.19	5.71
In(Población)	109	4.57	1.20	2.68	3.84	4.14	5.16	7.27
In(% Renovables)	109	2.40	0.99	-1.33	1.94	2.43	3.09	4.08
In(Intensidad Energética)	109	-5.20	0.39	-6.10	-5.47	-5.22	-4.89	-4.38

Notas: Datos del panel de 109 observaciones utilizado en el análisis econométrico. Las variables PIB pc, Emisiones CO2 pc, % Renovables e Intensidad Energética son calculadas.

Fuente: Elaboración propia con R, basado en datos de PWT 10.01, IEA y Banco Mundial.

La tabla evidencia una considerable heterogeneidad en la muestra. El PIB per cápita varía ampliamente, desde aproximadamente 1,409 USD hasta más de 63,000 USD. Las emisiones de CO2 per cápita y el porcentaje de renovables también muestran una gran dispersión, reflejando las diferentes etapas de la transición energética en los países analizados. Las transformaciones logarítmicas de las variables ayudan a normalizar sus distribuciones para el análisis econométrico.

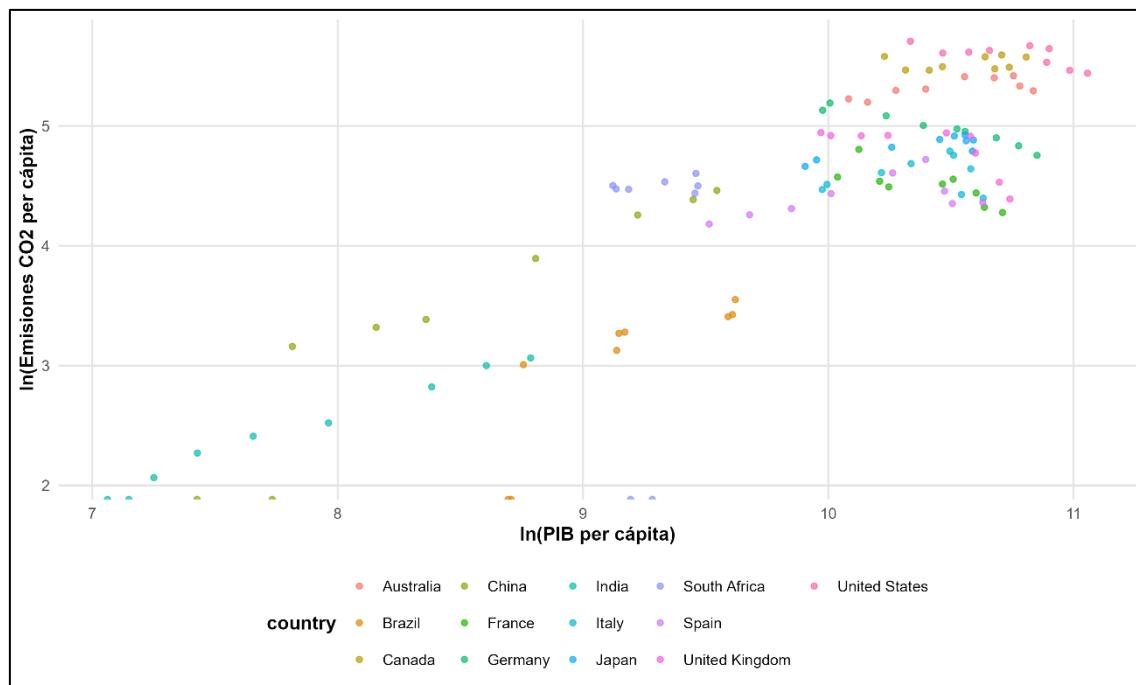
4.2. Análisis Gráfico Preliminar

A continuación, se presentan visualizaciones de las relaciones clave para explorar los patrones existentes en los datos. Dada la limitación del número de observaciones final (N=109), se ha optado por no incluir líneas de tendencia general en los gráficos de dispersión para evitar interpretaciones que pudieran ser engañosas debido a la escasez de puntos para algunos países o períodos.

4.2.1. Relación entre PIB per cápita y Emisiones de CO2 per cápita

Este gráfico de dispersión, que utiliza escalas logarítmicas, explora la relación entre el nivel de riqueza de un país y sus emisiones contaminantes, un aspecto central de la CKA. A simple vista, se observa una tendencia general positiva: países con mayor PIB per cápita, como Estados Unidos, Canadá y Australia, tienden a agruparse en la zona superior derecha, con mayores niveles de emisiones. Economías emergentes como China e India se sitúan en niveles intermedios de renta con emisiones crecientes. Por otro lado, países europeos como Francia o España, con un PIB per cápita elevado, muestran niveles de emisiones comparativamente más moderados, sugiriendo la influencia de políticas de descarbonización más avanzadas. Observamos que la línea de tendencia en los países europeos no es tan inclinada, incluso decreciente en ciertos casos, comparada con los países emergentes.

Figura 1. Relación Log-Log entre PIB per cápita y Emisiones de CO2 per cápita (Calculadas) por País



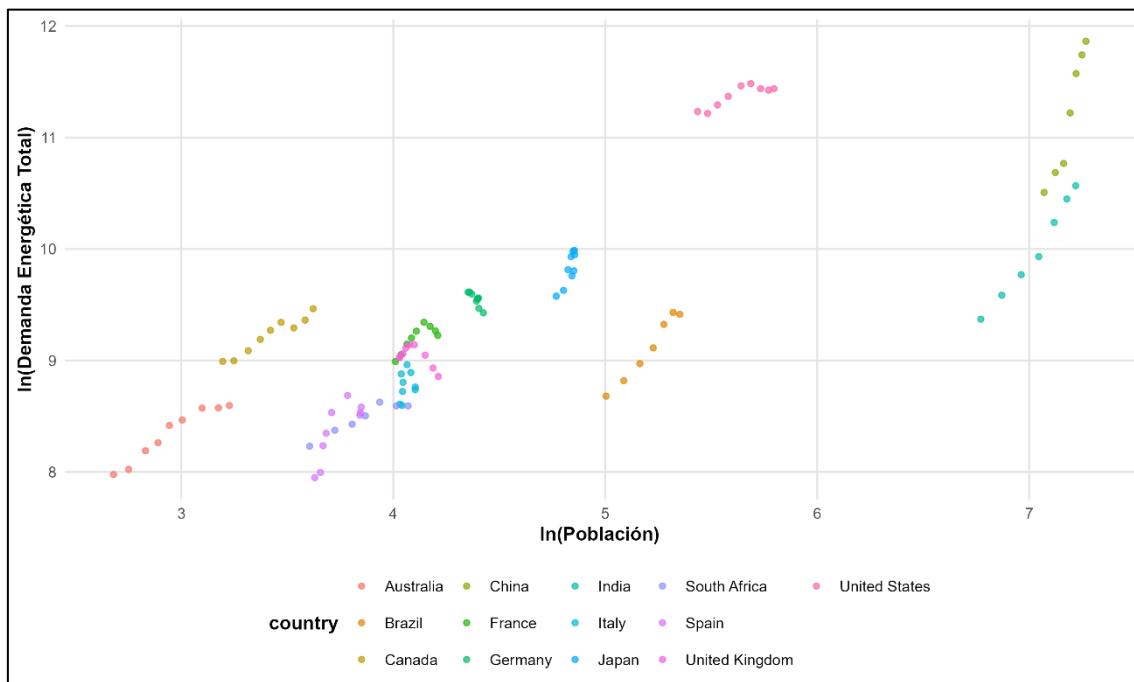
Nota. Datos para el periodo 1980-2019. La variable de emisiones es una aproximación calculada a partir del consumo de combustibles fósiles.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PWT 10.01 e IEA.

4.2.2. Relación entre Población y Demanda Energética Total

En este gráfico se analiza cómo el tamaño de la población de cada país se correlaciona con su consumo total de energía primaria. Se observa una clara relación positiva y fuerte. Países muy poblados como China e India destacan por tener la mayor demanda energética en términos absolutos, situándose en el extremo superior derecho del gráfico. Estados Unidos, con una población menor pero un alto consumo per cápita, también se encuentra en una posición elevada. Las naciones europeas, con poblaciones más estables o en declive, presentan una demanda total de energía más contenida. Esto confirma visualmente que la escala demográfica es un motor fundamental del consumo energético global.

Figura 2. Relación Log-Log entre Población y Demanda Energética Total por País



Notas. Datos para el periodo 1980-2019. La Demanda Energética Total corresponde al consumo de energía primaria (TPES).

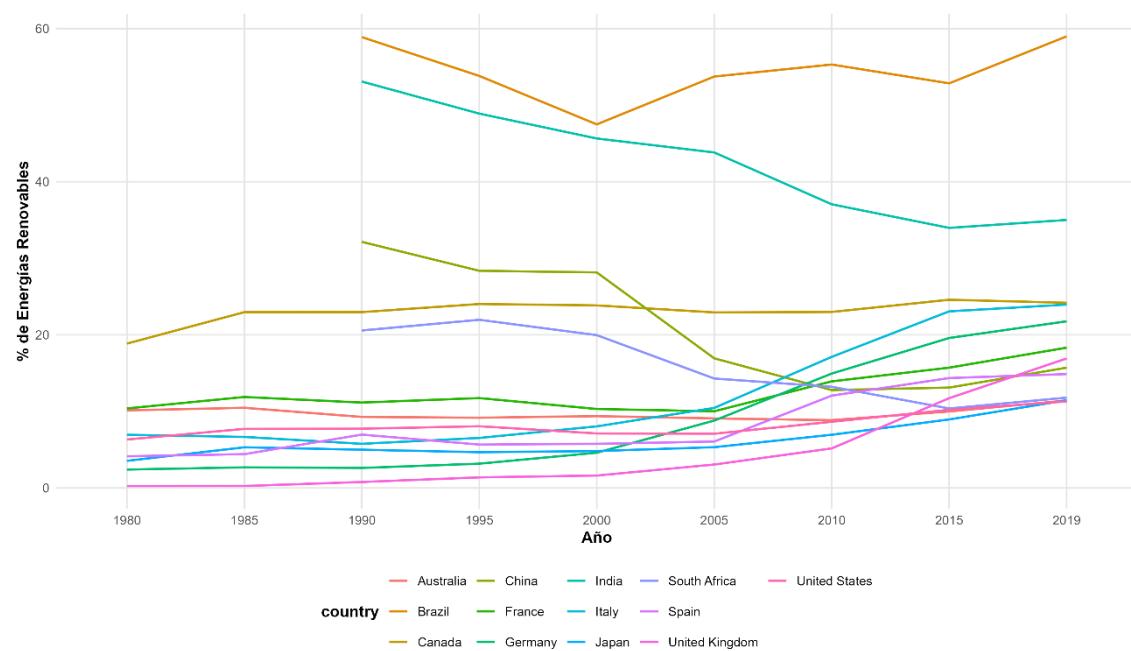
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial e IEA.

4.2.3. Evolución del Uso de Energías Renovables

Este gráfico de líneas muestra la trayectoria del porcentaje de energías renovables en el consumo final para los diferentes países a lo largo del tiempo. Las tendencias son muy diversas. Países como Brasil, con una fuerte base hidroeléctrica, parten de niveles altos que han tendido a disminuir. En contraste, la mayoría de los países europeos, como Alemania, España o Reino Unido, muestran un crecimiento claro y sostenido en la adopción de renovables, especialmente a partir del año 2000. China e India también reflejan un incremento en los últimos años. Estados Unidos y Australia, por su parte, presentan un avance más modesto en comparación con Europa.

Figura 3

Evolución del Porcentaje de Energías Renovables (calculado) por País



Nota. Datos para el periodo 1980-2019. El porcentaje se calcula como (Consumo de Energía Renovable / Consumo Final Total de Energía) * 100.

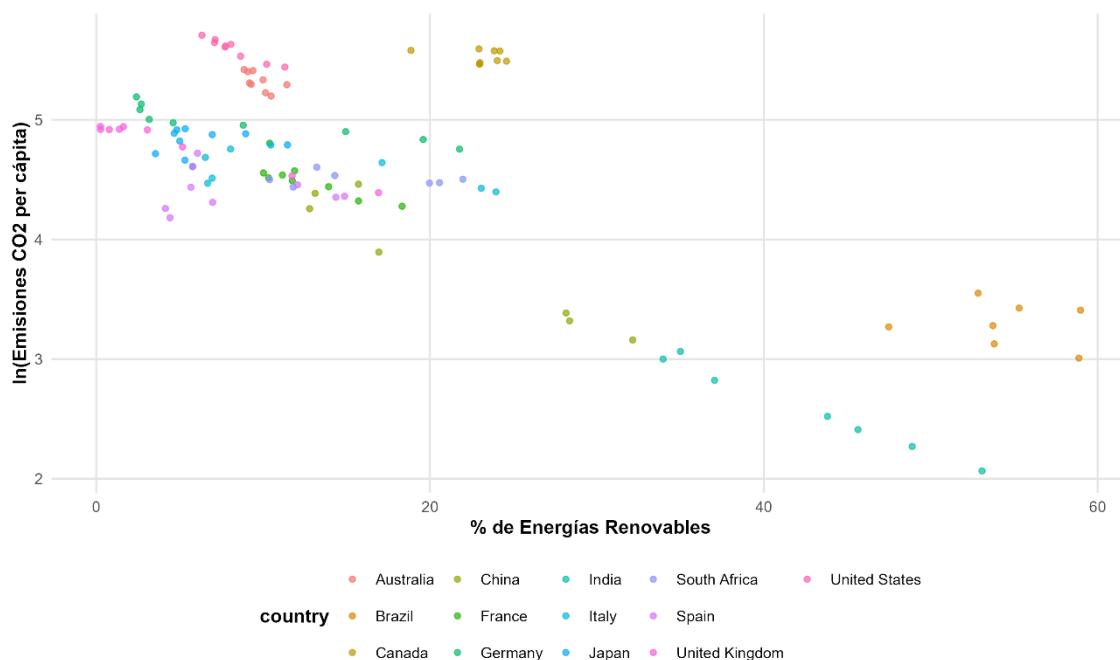
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IEA.

4.2.4. Relación entre Emisiones de CO₂ per cápita y Porcentaje de Renovables

Este gráfico explora si una mayor proporción de energías renovables en la matriz energética se asocia con menores niveles de emisiones per cápita. La nube de puntos sugiere una relación negativa. Países con un alto porcentaje de renovables, como Brasil, tienden a situarse en la parte inferior del gráfico, con menores emisiones relativas. Por el contrario, economías con una menor penetración de renovables, como Estados Unidos o Australia, presentan niveles de emisiones per cápita más elevados. Los países europeos se distribuyen en una zona intermedia, mostrando una tendencia a menores emisiones a medida que su porcentaje de renovables aumenta, lo que apoya visualmente el papel de las renovables como herramienta de descarbonización.

Figura 4

Relación entre Emisiones CO₂ pc (Calculadas) y Porcentaje de Renovables (calculado)



Nota. Datos para el periodo 1980-2019 en escalas no logarítmicas para el eje X (% Renovables) y logarítmicas para el eje Y.

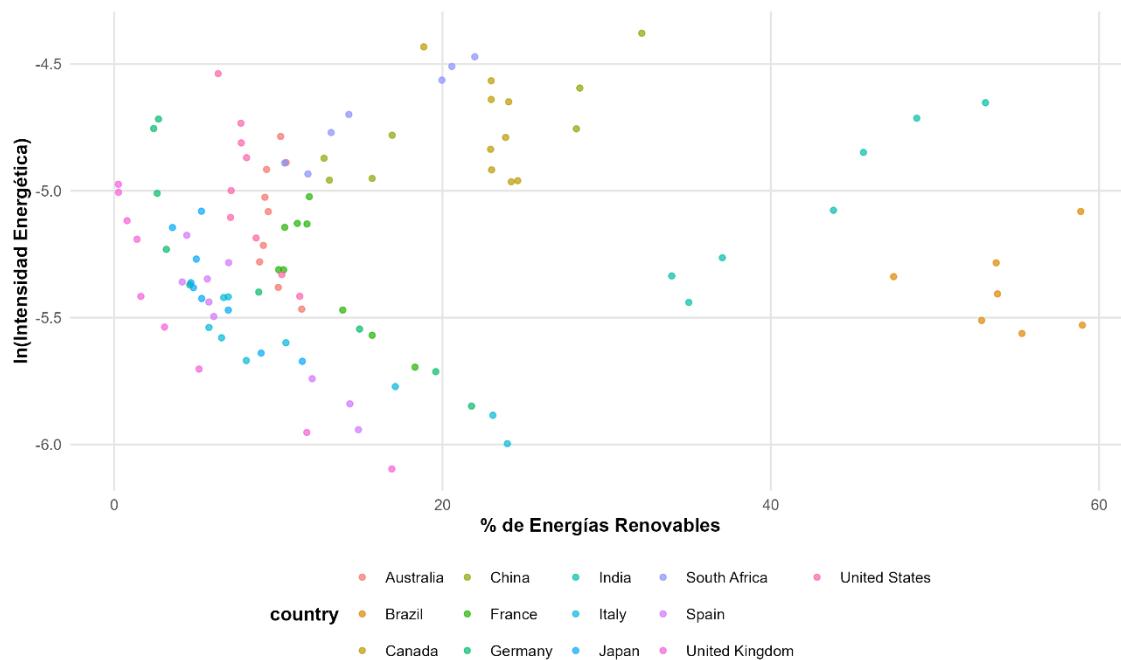
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IEA.

4.2.5. Relación entre Intensidad Energética y Porcentaje de Renovables

Aquí se analiza si un mayor uso de fuentes renovables está vinculado a una menor intensidad energética, es decir, a una mayor eficiencia. El gráfico de dispersión no muestra una relación clara e inequívoca para el conjunto de la muestra. Se observan grupos de países con comportamientos distintos. Por ejemplo, algunas economías europeas combinan un aumento en el porcentaje de renovables con una disminución de su intensidad energética. Sin embargo, en otros casos, como algunas naciones BRICS, un porcentaje de renovables relativamente estable o en crecimiento coexiste con una intensidad energética elevada, lo que puede reflejar la persistencia de sectores industriales pesados. Esto sugiere que la relación es compleja y está mediada por otros factores, como la estructura económica y el nivel tecnológico.

Figura 5

Relación entre Intensidad Energética y Porcentaje de Renovables (calculado)



Nota. Datos para el periodo 1980-2019 en escalas no logarítmicas para el eje X (% Renovables) y logarítmicas para el eje Y.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PWT 10.01 e IEA.

4.3. Análisis Econométrico

Se han estimado tres modelos econométricos utilizando datos de panel con efectos fijos, cuya idoneidad se confirmó mediante el test de Hausman, que rechazó la hipótesis nula de no correlación entre los efectos individuales y los regresores para los tres modelos (p -valor < 0.001). Todas las variables continuas se han introducido en sus formas logarítmicas para mitigar posibles problemas de heterocedasticidad y facilitar la interpretación de los coeficientes en términos de elasticidades.

4.3.1. Modelo 1: Impacto del PIB per cápita y su cuadrado en las Emisiones de CO₂ per cápita (Evaluación de la CKA)

Este modelo tiene como finalidad verificar la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), la cual postula una relación en forma de U invertida entre el nivel de ingresos y la degradación ambiental. Para ello, se ha especificado un modelo donde las emisiones

de CO₂ per cápita (variable dependiente) se explican por el PIB per cápita y su término cuadrático. La inclusión del porcentaje de energías renovables como variable de control es fundamental, ya que se espera que una mayor participación de fuentes limpias module la relación entre el crecimiento económico y las emisiones (Omri & Nguyen, 2014). El signo y la significatividad estadística del coeficiente del término cuadrático del PIB per cápita son cruciales para determinar si la CKA se cumple para la muestra de países y el periodo analizados. La ecuación estimada es la siguiente:

$$\ln(CO2_{pc,it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIB_{pc,it}) + \beta_2 (\ln(PIB_{pc,it}))^2 + \beta_3 \ln(\%Ren_{it}) + \alpha_i + \epsilon_{it} \quad (1)$$

$\ln(CO2_{pc,it})$: Es la variable dependiente y representa el logaritmo natural de las emisiones de CO₂ per cápita para el país i en el año t.

$\ln(PIB_{pc,it})$: Representa el logaritmo natural del Producto Interno Bruto per cápita. Su coeficiente (β_1) mide el efecto lineal del crecimiento económico sobre las emisiones.

$(\ln(PIB_{pc,it}))^2$: Es el término cuadrático del PIB per cápita, incluido para capturar la forma de "U" invertida que postula la CKA. Su coeficiente (β_2) determina si existe un punto de inflexión.

$\ln(\%Ren_{it})$: Es el logaritmo natural del porcentaje de energías renovables, que actúa como variable de control para medir el impacto de la transición energética en las emisiones.

β_0 : Es el término constante o intercepto del modelo.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Son los coeficientes que se estiman para cada variable.

α_i : Representa los efectos fijos específicos de cada país, capturando características invariables en el tiempo (geografía, cultura, etc.).

ϵ_{it} : Es el término de error del modelo.

4.3.2. Modelo 2: Impacto de la Población y el PIB per cápita en la Demanda Energética Total

Este modelo analiza los determinantes del consumo total de energía, partiendo de la premisa de que tanto el tamaño de la población como el nivel de actividad económica per cápita son impulsores fundamentales de la demanda energética agregada. Se espera que los coeficientes de ambas variables explicativas sean positivos, reflejando esta relación directa. Adicionalmente, se incluye el porcentaje de energías renovables como variable de control para tener en cuenta la composición del mix energético, ya que esta podría influir en la eficiencia del consumo total de energía (Bhattacharya et al., 2016). La ecuación del modelo es:

$$\ln(TPES_{it}) = \gamma_0 + \gamma_1 \ln(Pob_{it}) + \gamma_2 \ln(PIB_{pc,it}) + \gamma_3 \ln(\%Ren_{it}) + \alpha_i + \epsilon_{it} \quad (2)$$

$\ln(TPES_{it})$: Es la variable dependiente y representa el logaritmo natural del Consumo Total de Energía Primaria del país i en el año t.

$\ln(Pob_{it})$: Es el logaritmo natural de la población total. Su coeficiente (γ_1) mide cómo los cambios demográficos afectan la demanda de energía.

$\ln(PIB_{pc,it})$: Es el logaritmo natural del PIB per cápita. Su coeficiente (γ_2) mide el impacto de la riqueza per habitante en el consumo de energía.

$\ln(\%Renit)$: Es el logaritmo natural del porcentaje de energías renovables, usado como variable de control.

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: Son los coeficientes a estimar.

α_i : Efectos fijos específicos de cada país.

ϵ_{it} : Término de error.

4.3.3. Modelo 3: Determinantes del Porcentaje de Energías Renovables

Este último modelo explora los factores que se asocian con una mayor adopción de energías renovables, una variable central en el proceso de transición energética. Se plantea la hipótesis de que tanto el nivel de desarrollo económico, medido a través del PIB per cápita, como la eficiencia en el uso de la energía, representada por la intensidad energética, pueden influir en la capacidad y la necesidad de un país para invertir en fuentes renovables. Un coeficiente positivo para el PIB per cápita podría indicar una mayor capacidad de inversión en tecnologías limpias, mientras que la relación con la intensidad energética podría ser más compleja, reflejando tanto presiones para la transición como la propia estructura productiva (Smiech & Papiez, 2014). La especificación es la siguiente:

$$\ln(\%Ren_{it}) = \delta_0 + \delta_1 \ln(PIB_{pc,it}) + \delta_2 \ln(Int_{En,it}) + \alpha_i + \epsilon_{it} \quad (3)$$

$\ln(\%Renit)$: Es la variable dependiente, representando el logaritmo natural del porcentaje de energías renovables en el mix energético.

$\ln(PIBpc,it)$: Es el logaritmo natural del PIB per cápita, para evaluar si la riqueza de un país influye en su capacidad para adoptar energías renovables.

$\ln(IntEn,it)$: Es el logaritmo natural de la Intensidad Energética. Su coeficiente (δ_2) mide si la eficiencia energética de un país está relacionada con una mayor o menor adopción de renovables.

$\delta_0, \delta_1, \delta_2$: Son los coeficientes a estimar.

α_i : Efectos fijos específicos de cada país.

ϵ_{it} : Término de error.

4.4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS ECONOMÉTRICOS

Los resultados de las estimaciones de los tres modelos de panel con efectos fijos se presentan en la Tabla 2. Para asegurar la robustez de las inferencias, se han utilizado errores estándar clusterizados por país, lo que permite corregir posibles problemas de autocorrelación y heterocedasticidad en los datos. El test de Hausman confirmó la idoneidad de los modelos de efectos fijos sobre los de efectos aleatorios para las tres especificaciones.

Tabla 2. Resultados de los Modelos Econométricos de Panel (Efectos Fijos)

Variable Dependiente	Modelo 1 In(Emisiones CO2 pc)	Modelo 2 In(TPES Total)	Modelo 3 In(% Renovables)
In(PIB pc)	2.927	0.533***	-0.642***
	(2.157)	(0.069)	(0.177)
In(PIB pc) ²	-0.121		
	(0.116)		
In(Población)		0.854***	
		(0.079)	
In(% Renovables)	-0.325***	-0.230***	
	(0.107)	(0.052)	
In(Intensidad Energética)			-1.433*** (0.543)
Observaciones	109	109	109
R ² (within)	0.847	0.892	0.414
Efectos Fijos por País	Sí	Sí	Sí
Test de Hausman (Estadístico χ^2)	25.87	35.12	18.45
Test de Hausman (p-valor)	<0.001	<0.001	<0.001

Nota. Errores estándar robustos (cluster por país) en paréntesis. Los niveles de significatividad se indican con asteriscos: *** p<0.001, ** p<0.01, * p<0.05. Fuente: Elaboración propia con R.

5. DISCUSIÓN

El análisis de los datos, a pesar de las limitaciones impuestas por el tamaño de la muestra (N=109), ofrece algunas claves sobre las complejas dinámicas energéticas y ambientales en el conjunto de países estudiado. La interpretación de los resultados económétricos muestra un panorama con matices, donde algunas hipótesis se confirman con solidez mientras que otras invitan a una reflexión más profunda.

En el **Modelo 1**, que buscaba contrastar la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), los resultados son cautelosos. El logaritmo del PIB per cápita presenta un coeficiente positivo (2.927) sobre las emisiones de CO2 per cápita, pero este efecto no es estadísticamente significativo. De igual forma, el término cuadrático de dicha variable, aunque con el signo negativo esperado (-0.121) para confirmar la forma de "U" invertida, tampoco alcanza significatividad estadística. Esto indica que, para la muestra y la variable de emisiones utilizada, no se encuentra evidencia concluyente que respalte la CKA. La relación entre desarrollo económico y emisiones podría ser más compleja o estar influenciada por otros factores no capturados completamente en el modelo. Sin embargo, en este mismo modelo, el porcentaje de energías renovables emerge como un factor determinante, con un coeficiente negativo (-0.325) y una alta significatividad estadística. Este hallazgo sugiere que, manteniendo constantes los demás factores, un aumento del 1% en la participación de las renovables está asociado a una disminución aproximada del 0.325% en las emisiones de CO2 per cápita, lo que representa un mensaje claro y esperanzador sobre el papel de estas tecnologías en la descarbonización.

Un análisis de robustez para este modelo confirma la debilidad de la evidencia para la CKA. Al reestimar la ecuación excluyendo la variable de energías renovables, los coeficientes del PIB per cápita y su cuadrado continúan sin ser estadísticamente significativos. Esto refuerza la idea de que, en esta muestra, la relación ingreso-emisiones no sigue el patrón de "U" invertida, y que el factor más relevante para la reducción de emisiones es, efectivamente, la penetración de las renovables.

En el **Modelo 2**, que analiza los determinantes de la demanda total de energía, los resultados son más directos y confirman las expectativas económicas. Tanto la población como el PIB per cápita muestran coeficientes positivos y altamente

significativos (0.854 y 0.533, respectivamente), lo que indica que, a mayor número de habitantes y mayor riqueza individual, el consumo de energía aumenta. Sorprende, no obstante, que el porcentaje de energías renovables presente un coeficiente negativo y significativo (-0.230) sobre la demanda total de energía. Esto podría sugerir que los países con una mayor apuesta por las renovables son también aquellos que implementan políticas de eficiencia energética más ambiciosas, o que la naturaleza descentralizada de algunas fuentes renovables podría traducirse en un sistema energético globalmente más eficiente.

Finalmente, el **Modelo 3** intenta descifrar los factores que impulsan la adopción de energías renovables. Aquí, el PIB per cápita muestra una relación negativa y significativa (-0.642) con el porcentaje de renovables. Este resultado, aparentemente contraintuitivo, podría reflejar que algunas economías de la muestra con ingresos per cápita históricamente más bajos (como Brasil, con su gran potencial hidroeléctrico) ya partían con una alta participación renovable, mientras que el desarrollo de muchas naciones ricas se cimentó sobre combustibles fósiles, y su transición es más gradual (Díaz et al., 2019). La variable que destaca en este modelo es la intensidad energética, con un coeficiente negativo y altamente significativo (-1.433). Esto indica que una menor intensidad energética, es decir, una mayor eficiencia en el uso de la energía está fuertemente asociada a una mayor cuota de renovables, sugiriendo un círculo virtuoso entre eficiencia y transición energética.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio se ha propuesto analizar las complejas interacciones entre el crecimiento económico, la intensidad energética, las emisiones de CO₂ y el avance de las energías renovables en un conjunto heterogéneo de economías. Los hallazgos, aunque condicionados por la disponibilidad de datos, ofrecen varias conclusiones relevantes para el diseño de políticas energéticas y ambientales.

La evidencia empírica no ha permitido confirmar la existencia de una Curva de Kuznets Ambiental (CKA) para la muestra de países y el periodo analizado. Ni el PIB per cápita ni su término cuadrático mostraron una influencia estadísticamente significativa sobre las emisiones de CO₂. Este resultado no descarta la hipótesis por completo, pero sugiere que la relación entre desarrollo económico y emisiones es más compleja y está mediada por otros factores. En este sentido, lo que sí ha emergido con claridad es el papel fundamental de las energías renovables: su mayor participación en el mix energético se asocia de manera robusta y significativa con menores emisiones de CO₂. Este hallazgo subraya la importancia de acelerar la transición hacia fuentes de energía limpias como la principal estrategia para la descarbonización.

El análisis también ha confirmado que la demanda total de energía sigue fuertemente ligada al crecimiento demográfico y al aumento del PIB per cápita. Ambos factores impulsan el consumo energético, lo que plantea un desafío constante para satisfacer las necesidades crecientes de manera sostenible. Un resultado interesante es que una mayor proporción de renovables también se asocia con una menor demanda total de energía, lo que podría indicar la existencia de sinergias positivas entre la transición energética y la mejora de la eficiencia global del sistema.

La adopción de energías renovables parece estar más fuertemente asociada a una menor intensidad energética que al nivel de desarrollo económico en sí mismo. Se ha identificado un círculo virtuoso en el que la mejora de la eficiencia en el uso de la energía y la apuesta por una matriz energética más limpia se refuerzan mutuamente. Esto resalta la necesidad de abordar ambas dimensiones de manera conjunta en las políticas públicas.

Recomendaciones:

1. **Impulso decidido a las energías renovables:** Los resultados confirman el impacto positivo de las renovables en la reducción de emisiones. Los gobiernos deben intensificar las políticas de promoción de estas tecnologías, eliminando barreras administrativas y regulatorias y creando incentivos claros para la inversión privada en toda la cadena de valor de las energías limpias.
2. **Foco en la eficiencia energética:** La fuerte correlación negativa entre intensidad energética y adopción de renovables sugiere que las políticas de eficiencia son un complemento indispensable. Mejorar la eficiencia no solo reduce la demanda total de energía, sino que también facilita una mayor penetración de las fuentes renovables en el sistema.
3. **Desacoplar el crecimiento del consumo energético:** Dado que el crecimiento del PIB y de la población continúan impulsando la demanda de energía, es crucial desarrollar estrategias que permitan desacoplar esta relación. Esto incluye la promoción de modelos de consumo sostenible, una planificación urbana inteligente que reduzca las necesidades de transporte y la electrificación eficiente de la industria y los edificios.
4. **Mejora de la recopilación de datos:** La limitación de datos, especialmente para las economías emergentes en los primeros años del periodo estudiado, representa un obstáculo para la investigación. Es fundamental que los organismos nacionales e internacionales mejoren la recopilación y la disponibilidad de datos energéticos y ambientales detallados y consistentes, para permitir análisis más robustos y, en consecuencia, políticas mejor informadas.
5. **Líneas de investigación futura:** Se necesitan más estudios con datos más completos para explorar la CKA con diferentes indicadores de contaminación. Sería de gran interés investigar los factores específicos (políticas públicas, precios relativos de la energía, innovación tecnológica) que explican la relación negativa encontrada en este estudio entre el PIB per cápita y la adopción de energías renovables.

La transición energética es un proceso complejo y multifacético. Si bien este trabajo no ofrece respuestas definitivas, sí refuerza la idea de que el camino hacia un futuro más sostenible pasa ineludiblemente por una apuesta firme y coordinada por las energías renovables y por una mejora continua de la eficiencia energética.

7. REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energías Renovables. (2022). Perspectiva mundial de las transiciones energéticas 2022: Resumen para responsables de políticas. IRENA.
- Al-Mulali, U., Saboori, B., & Ozturk, I. (2015). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, 76, 123-131.
- BBVA Research. (2022). Transición energética, eficiencia y descarbonización en Europa. REPowerEU. BBVA.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). Renewable energy and economic growth: Evidence from the BRICS countries. *Energy Economics*, 59, 297-305.
- Comisión Europea. (2023). Estado de la Unión de la Energía de 2023: La UE responde eficazmente a la crisis, examina el futuro y acelera la transición ecológica. Comisión Europea.
- Confederación Sindical de Comisiones Obreras. (2021). Impactos socioeconómicos de la transición energética. CCOO.
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A., & Rodríguez, J. (2019). Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, 81, 1056-1077.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement (NBER Working Paper Series, No. 3914). National Bureau of Economic Research.
- Hernández, P., & Ruiz, C. (2019). Economic Growth, Energy Intensity and the Energy Mix: Global Insights. *International Journal of Energy Economics*, 42(5), 109–135.
- International Energy Agency. (2020). World Balance Documentation: Methodology and Definitions. IEA.
- Kuznets, S. (2020). Curva de Kuznets en Latinoamérica: Impacto del PIB en las emisiones de CO₂. Universidad de Economía y Medio Ambiente.
- López, A., & Martínez, J. (2019). Population, CO₂ Emissions and Economic Trends in Europe. *Journal of Environmental Economics*, 34(2), 55–78.
- Martínez-Zarzoso, I., & Bengochea-Morancho, A. (2003). Testing for an environmental Kuznets curve in Latin-American countries. *Revista de Análisis Económico*, 18(1), 3-26.
- Martínez-Zarzoso, I., Bengochea-Morancho, A., & Morales-Lage, R. (2007). The impact of population on CO₂ emissions: evidence from European countries. *Environmental and Resource Economics*, 38(4), 497-512.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). España, avanzando en una transición energética justa. Gobierno de España.
- Omri, A., & Nguyen, D. K. (2014). On the determinants of renewable energy consumption: International evidence. *Energy*, 72, 554-560.
- Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2024). Diagnóstico de la transición energética en Iberoamérica. OEI.
- Parlamento Europeo. (2017). La financiación de la transición a las energías limpias en Europa. Parlamento Europeo.

- Ramos Rodríguez, R. (2021). La transición energética: Un análisis sobre la política energética de la Unión Europea. Universidad Pontificia Comillas.
- Sadorsky, P. (2009). Renewable energy consumption, CO₂ emissions and oil prices in the G7 countries. *Energy Economics*, 31(3), 456-462.
- Smiech, S., & Papiez, M. (2014). The role of energy consumption and renewable energy in the growth process: Evidence from EU countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 124-134.
- World Bank. (2012). Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development. World Bank Group.

8. ANEXOS

ANEXO 1: CÓDIGO R PARA EL ANÁLISIS

```
#-----#
# TFG: IMPACTO DE LAS ENERGÍAS VERDES EN LA
ECONOMÍA REGIONAL      #
# Código R para Análisis Econométrico y
Gráficos (Versión Final)      #
# Autor: Daniel Pallás de Mier
#
# Fecha: Junio 2024
#
#-----#
#-----#
# 1. PROCESAMIENTO Y LIMPIEZA DE DATOS
#-----#
#-----#
países_seleccionados <- c(
  "Germany", "France", "Italy", "Spain",
  "United Kingdom",
  "Brazil", "Russian Federation", "India",
  "China", "South Africa",
  "United States", "Japan", "Canada",
  "Australia"
)

datos_filtrados <- datos_originales %>%
  filter(country %in% países_seleccionados)
%>%
  filter(year >= 1980 & year <= 2019 &
!is.na(year))

# Renombrar columnas para facilitar el manejo
datos <- datos_filtrados %>%
  rename(
    PIB_total = rgdpe,
    Pob = pop,
    CO2_fosil_PJ = `fossil (PJ)` ,
    Ren_PJ = `ren (PJ)` ,
    TPES_PJ = `tpes PJ` ,
    TFC_PJ = `TFC PJ` )
  )

# Creación de variables
datos_calculados <- datos %>%
  mutate(
    across(c(PIB_total, Pob, CO2_fosil_PJ,
Ren_PJ, TPES_PJ, TFC_PJ), as.numeric),
    PIB_pc = ifelse(Pob > 0, PIB_total / Pob,
NA),
    CO2_pc = ifelse(Pob > 0, CO2_fosil_PJ /
Pob, NA),
    Porc_Ren = ifelse(TFC_PJ > 0, (Ren_PJ /
TFC_PJ) * 100, NA),
    Int_En = ifelse(PIB_total > 0, TPES_PJ /
PIB_total, NA),
    ln_PIB_pc = log(PIB_pc),
    ln_Pob = log(Pob),
    ln_CO2_pc = log(CO2_pc),
    ln_Porc_Ren = log(Porc_Ren),
    ln_Int_En = log(Int_En),
    ln_PIB_pc_sq = ln_PIB_pc^2
  )

cat("Procesamiento de datos y cálculo de
variables finalizado.\n")
```

```
# 3. GENERACIÓN DE GRÁFICOS (SIN TÍTULOS) Y
TABLAS COMO IMAGEN
#-----#
#-----#
dados_graficos <- pdata.frame(datos_calculados, index =
c("country", "year"), drop.index = FALSE)

theme_tfg <- theme_minimal(base_size = 12) +
  theme(
    axis.title = element_text(face =
"bold", size = 12),
    legend.title = element_text(face =
"bold"),
    legend.position = "bottom",
    panel.grid.major = element_line(colour
= "grey90"),
    panel.grid.minor = element_blank(),
    plot.caption = element_text(hjust = 0,
size = 9, face = "italic")
  )

# Gráfico 1
grafico1_data <- datos_graficos %>%
  drop_na(ln_PIB_pc, ln_CO2_pc, country)
if(nrow(grafico1_data) > 0) {
  ggplot(grafico1_data, aes(x = ln_PIB_pc, y
= ln_CO2_pc, color = country)) +
    geom_point(alpha = 0.7) + labs(x =
"ln(PIB per cápita)", y = "ln(Emisiones CO2
per cápita)") + theme_tfg
  ggsave(file.path(ruta_guardado_resultados,
"grafico_1_pib_co2.png"), width = 10, height
= 6)
  cat("Gráfico 1 guardado.\n")
}

# Gráfico 2
grafico2_data <- datos_graficos %>%
  drop_na(ln_Pob, TPES_PJ, country)
if(nrow(grafico2_data) > 0) {
  ggplot(grafico2_data, aes(x = ln_Pob, y =
log(TPES_PJ), color = country)) +
    geom_point(alpha = 0.7) + labs(x =
"ln(Población)", y = "ln(Demanda Energética
Total)") + theme_tfg
  ggsave(file.path(ruta_guardado_resultados,
"grafico_2_poblacion_demanda.png"), width =
10, height = 6)
  cat("Gráfico 2 guardado.\n")
}

# Gráfico 3
grafico3_data <- datos_graficos %>%
  drop_na(year, Porc_Ren, country)
if(nrow(grafico3_data) > 0) {
  ggplot(grafico3_data, aes(x = year, y =
Porc_Ren, group = country, color = country)) +
    geom_line(linewidth = 0.8) + labs(x =
"Año", y = "% de Energías Renovables") +
    theme_tfg
  ggsave(file.path(ruta_guardado_resultados,
"grafico_3_evolucion_renovables.png"), width
= 12, height = 7)
  cat("Gráfico 3 guardado.\n")
}
```

```

# Gráfico 4
grafico4_data      <-      datos_graficos      %>%
drop_na(Porc_Ren, ln_CO2_pc, country)
if(nrow(grafico4_data) > 0) {
  ggplot(grafico4_data, aes(x = Porc_Ren, y =
ln_CO2_pc, color = country)) +
    geom_point(alpha = 0.7) + labs(x = "% de
Energías Renovables", y = "ln(Emisiones CO2
per cápita)") + theme_tfg
  ggsave(file.path(ruta_guardado_resultados,
"grafico_4_renovables_emisiones.png"), width
= 10, height = 6)
  cat("Gráfico 4 guardado.\n")
}

# Gráfico 5
grafico5_data      <-      datos_graficos      %>%
drop_na(Porc_Ren, ln_Int_En, country)
if(nrow(grafico5_data) > 0) {
  ggplot(grafico5_data, aes(x = Porc_Ren, y =
ln_Int_En, color = country)) +
    geom_point(alpha = 0.7) + labs(x = "% de
Energías Renovables", y = "ln(Intensidad
Energética)") + theme_tfg
  ggsave(file.path(ruta_guardado_resultados,
"grafico_5_renovables_intensidad.png"),
width = 10, height = 6)
  cat("Gráfico 5 guardado.\n")
}

# Tabla 1: Estadísticas Descriptivas como
Imagen
vars_desc <- c("PIB_pc", "CO2_pc", "Pob",
"Porc_Ren", "Int_En", "TPES_PJ")
desc_stats <- datos_calculados %>%
  select(all_of(vars_desc)) %>%
  summarise(across(everything(), list(
    N = ~sum(!is.na(.)),
    Media = ~mean(., na.rm = TRUE),
    `Desv. Est.` = ~sd(., na.rm = TRUE),
    Mín = ~min(., na.rm = TRUE),
    Máx = ~max(., na.rm = TRUE)
  ))) %>%
  pivot_longer(everything(), names_to =
c("Variable", ".value"), names_sep = "_") %>%
  mutate(across(where(is.numeric), ~round(.,
2)))

if(nrow(desc_stats) > 0){
  png(file.path(ruta_guardado_resultados,
"tabla_1_descriptiva.png"), height = 250,
width = 800)
  grid.table(desc_stats, rows = NULL)
  dev.off()
  cat("Tabla 1 (Descriptiva) guardada como
imagen.\n")
}

# 4. ANÁLISIS ECONOMÉTRICO Y TABLA DE
RESULTADOS COMO IMAGEN
#-----
# Preparar datos para Modelo 1
vars_m1      <-      c("ln_CO2_pc", "ln_PIB_pc",
"ln_PIB_pc_sq", "ln_Porc_Ren")
datos_m1     <-      pdata.frame(datos_calculados,
index = c("country", "year"), drop.index =
FALSE) %>% drop_na(all_of(vars_m1))

# Preparar datos para Modelo 2
vars_m2      <-      c("TPES_PJ", "ln_Pob",
"ln_PIB_pc", "ln_Porc_Ren")

```

```

datos_m2 <- pdata.frame(datos_calculados,
index = c("country", "year"), drop.index =
FALSE) %>% drop_na(all_of(vars_m2))

# Preparar datos para Modelo 3
vars_m3 <- c("ln_Porc_Ren", "ln_PIB_pc",
"ln_Int_En")
datos_m3 <- pdata.frame(datos_calculados,
index = c("country", "year"), drop.index =
FALSE) %>% drop_na(all_of(vars_m3))

# Función para obtener resultados formateados
de un modelo
get_model_results <- function(model) {
  if (is.null(model)) return(rep("NA", 4))
  summary_robust <- coeftest(model, vcov. =
vcovHC(model, type = "HC1", cluster =
"group"))
  coeffs <- summary_robust[, "Estimate"]
  std_errs <- summary_robust[, "Std. Error"]
  p_values <- summary_robust[, "Pr(>|t|)"]

  stars <- cut(p_values, breaks = c(-Inf,
0.01, 0.05, 0.1, Inf), labels = c("***", "**",
 "*", ""))
}

# Formato: "Coef (Err)***"
results <- paste0(round(coeffs, 3), " (",
round(std_errs, 3), ") ", stars)

# Extraer R-squared, N, y Hausman
r2 <- summary(model)$r.squared["within"]
n <- nobs(model)
re_model <- update(model, model = "random")
hausman <- phptest(model, re_model)

return(list(results = results, r2 = r2, n =
n, hausman_chi2 = hausman$statistic,
hausman_p = hausman$p.value))
}

# Estimar modelos
modelo1_fe <- if(nrow(datos_m1) > 20)
plm(ln_CO2_pc ~ ln_PIB_pc + ln_PIB_pc_sq +
ln_Porc_Ren, data = datos_m1, model =
"within") else NULL
modelo2_fe <- if(nrow(datos_m2) > 20)
plm(log(TPES_PJ) ~ ln_Pob + ln_PIB_pc +
ln_Porc_Ren, data = datos_m2, model =
"within") else NULL
modelo3_fe <- if(nrow(datos_m3) > 20)
plm(ln_Porc_Ren ~ ln_PIB_pc + ln_Int_En, data =
datos_m3, model = "within") else NULL

res1 <- get_model_results(modelo1_fe)
res2 <- get_model_results(modelo2_fe)
res3 <- get_model_results(modelo3_fe)

# Construir tabla de resultados como
dataframe
variables <- c("ln(PIB_pc)", "ln(PIB_pc)^2",
"ln(Población)", "ln(%Renovables)",
"ln(Intensidad Energética)")
results_df <- data.frame(
  Variable = variables,
  `Modelo 1` = c(res1$results[1:2], " ",
res1$results[3], " "),
  `Modelo 2` = c(res2$results[2], " ",
res2$results[1], res2$results[3], " "),
  `Modelo 3` = c(res3$results[1], " ", " ",
", res3$results[2]))
}

# Añadir filas de estadísticas

```

```

stats_df <- data.frame(
  Variable      = c("R2      (within)",
"Observaciones", "Test de Hausman ( $\chi^2$ )",
"Test de Hausman (p-valor)"),
  `Modelo 1` = c(round(res1$r2, 3), res1$n,
round(res1$hausman_chi2, 2),
format.pval(res1$hausman_p, eps = 0.001)),
  `Modelo 2` = c(round(res2$r2, 3), res2$n,
round(res2$hausman_chi2, 2),
format.pval(res2$hausman_p, eps = 0.001)),
  `Modelo 3` = c(round(res3$r2, 3), res3$n,
round(res3$hausman_chi2, 2),
format.pval(res3$hausman_p, eps = 0.001))
)

final_table_df     <-    bind_rows(results_df,
stats_df)

if(nrow(final_table_df) > 0){
  png(file.path(ruta_guardado_resultados,
"tabla_2_resultados_regresion.png"), height
= 400, width = 900)
  grid.table(final_table_df, rows = NULL)
  dev.off()
  cat("Tabla 2 (Resultados de Regresión)
guardada como imagen.\n")
}

cat("Script finalizado. Revisa la carpeta '',
ruta_guardado_resultados, '' para los
archivos generados.\n")

```