



**UNIVERSIDAD  
PANAMERICANA**

**Universidad Panamericana  
Escuela de Gobierno y Economía  
Posgrado**

**Relación dinámica entre el desarrollo humano, la producción de electricidad  
renovable y no renovable, contaminación ambiental y crecimiento  
económico para México.**

Autor: **Vanessa Maggiore Gómez Asencio**

Grado por el que se opta: Doctora en Economía y Regulación Energéticas

Director de la tesis: Dr. Adán Díaz Hernández

Ciudad de México, a 16 de enero de 2023

## **Agradecimientos**

Primero que nada, doy gracias a Dios, por haber iluminado mi mente y alimentado mi espíritu en cada paso que doy hacia mi desarrollo profesional y como ser humano. La presente tesis doctoral, es resultado de largas jornadas de lectura, esfuerzo y dedicación por parte de la autora y director de tesis. Sin duda, la culminación de este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo desinteresado y genuino de todas y cada una de las personas que a continuación citaré, quienes fueron de gran soporte en los numerosos momentos de angustia, desesperación y crisis existenciales que se presentaron durante todo este proceso.

Agradezco hoy y siempre a mi mamá, porque a pesar de no entender en completitud los retos personales que me he puesto, nunca dudas en apoyarme y siempre estás ahí en los momentos más complicados con tu paciencia y ternura para motivarme a seguir adelante. A mi hermano Rolando, los primeros tres años de este gran proyecto lo vivimos juntos. Hermano, valoro todas y cada una de las veces (especialmente los fines de semana) que te fuiste a encerrar a tu cuarto, para dejarme a mi sola la sala de estar y comedor para dedicarme a mi doctorado. Hasta el día de hoy no sé por qué necesitaba casi todo el departamento para estudiar, escribir y leer, creo que era más fácil yo encerrarme en mi cuarto, pero muchas gracias nunca cuestionarme, por tu paciencia y respeto.

A todos mis tíos (especialmente Nahima, Julio, Juan), quienes siempre han creído en mí y nunca han dudado de mi potencial. A mi exjefe, Emilio Báez, gracias por toda tu paciencia y apoyo con los permisos para lograr entregar a tiempo mis avances de investigación. A mis queridos primos y amigos, gracias por todas las porras hacia mi persona y las incansables veces que me preguntaban ¿Cómo va la tesis? ¿Cuándo terminas? Sin estas preguntas del “millón de dólares” no me hubiera apurado tanto.

Un agradecimiento muy especial, a Don Pedro Joaquín Coldwell, quién además de inducirme al mundo energético, gracias a su visión y liderazgo como cabeza del sector en el periodo 2012-2018 impulsó los fondos sectoriales CONACYT-SENER para promover la investigación y formación de capital humano en materia energética, y que de manera conjunta con la Universidad Panamericana pude concursar y obtener una beca y así la oportunidad de realizar el presente programa doctoral.

Finalmente, me agradezco a mí misma por no haber quitado el dedo del renglón y morir en la raya, como siempre. Una vez más me demuestro, que lo que importa en la vida no es cuantas veces te caes sino cuantas veces te paras para lograr tus

objetivos. Este logro, se lo dedico a mi papá, Jorge Rolando Gómez Carillo, que en paz descanse, tus valores y enseñanzas viven en mis acciones diarias. Se que te sentirías muy orgulloso de mí, así como yo lo estoy ahora de mí misma. Te quiero papá.

## **RESUMEN**

La energía, es un elemento central para el desarrollo de un país, particularmente, el acceso a la energía eléctrica, la cual juega un papel importante como impulsora del progreso humano. Sin embargo, en los países en donde el acceso a la electricidad está casi garantizado, los desafíos del sector tienen que ver no solo con la calidad y costo, sino también y no menos importante con el impacto ambiental. No obstante, la discusión sobre este tema es limitada. En México, desarrollar políticas públicas adecuadas requiere caracterizar el impacto de la generación de electricidad en el desarrollo humano. El presente estudio investiga la relación causal de Granger de largo y corto plazo entre la generación de electricidad renovable y no renovable, el crecimiento económico y las emisiones de dióxido de carbono en el desarrollo humano en el caso de México en el periodo de 1985 al 2021, utilizando un modelo autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL), que permite analizar la cointegración. Asimismo, se calibra un modelo vectorial de corrección de errores (VECM) para evaluar la causalidad.

El procedimiento de cointegración revela al menos una relación de equilibrio a largo plazo entre el producto interno bruto real (PIB), la generación de electricidad renovable (GREN), la generación de electricidad no renovable (GNREN), las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el índice de desarrollo humano (IDH). Con la excepción del PIB y la GREN, las respectivas estimaciones de los coeficientes a largo plazo son positivas y estadísticamente significativas. Los resultados del modelo VECM indican causalidad unidireccional del IDH a la GREN en sentido negativo en el corto plazo. Los resultados también indican una causalidad unidireccional que va del PIB, GNREN y  $\text{CO}_2$  al IDH en el largo plazo, validando la hipótesis de crecimiento para México. Estos hallazgos novedosos ayudarían a los hacedores de políticas públicas a comprender mejor el papel de las energías renovables y el crecimiento económico en el proceso de desarrollo humano en México. Sin embargo, se necesita más discusión para caracterizar la desigualdad energética a través de la distribución en el ingreso, lo cual es un desafío para que el gobierno cumpla con los objetivos de desarrollo sostenible.

## **ABSTRACT**

Energy is a central element for the development of a country, particularly access to electricity, which plays an important role as a driver of economic growth and human progress. However, in countries where access to electricity is almost guaranteed, the sector's challenges must deal not only with quality and cost, but also, and no less important, with environmental impact. Nevertheless, discussion on this topic is limited. In Mexico, developing adequate policies requires characterizing the impact of electricity generation on human development. This study investigates the short-

run and long-run Granger-causality relationship between renewable and non-renewable electricity generation, economic growth, and carbon emissions in the human development in the case of Mexico from 1985-2021, within an autoregressive distributed lag (ARDL) framework for cointegration. Indeed, a vector error correction model (VECM) is calibrated for causality assessment. Cointegration test reveals a long-run equilibrium relationship between real gross domestic product (GDP), renewable electricity generation (GREN), non-renewable electricity generation (GNREN), carbon emissions (CO<sub>2</sub>), and human development index (HDI). Except for GDP and GREN, the respective long-run coefficient estimates are positive and statistically significant. The results from the VECM indicate unidirectional causality from HDI to GREN in a negative sense in the short-run. The results also indicate unidirectional causality between GDP, GNREN and CO<sub>2</sub> to HDI, validating the growth hypothesis for Mexico in the long-run. These novel findings would help policymakers and government officials to better understand the role of renewable energy and economic growth in the human development process in México. However, more discussion is needed to characterize the disparity of income distribution and energy, which is a challenge for the government to meet sustainable development goals.

**KEY WORDS:**

Mexico, renewable and non-renewable electricity generation, human development index, carbon emissions, economic growth, Granger causality, sustainability, energy transition.

## ÍNDICE

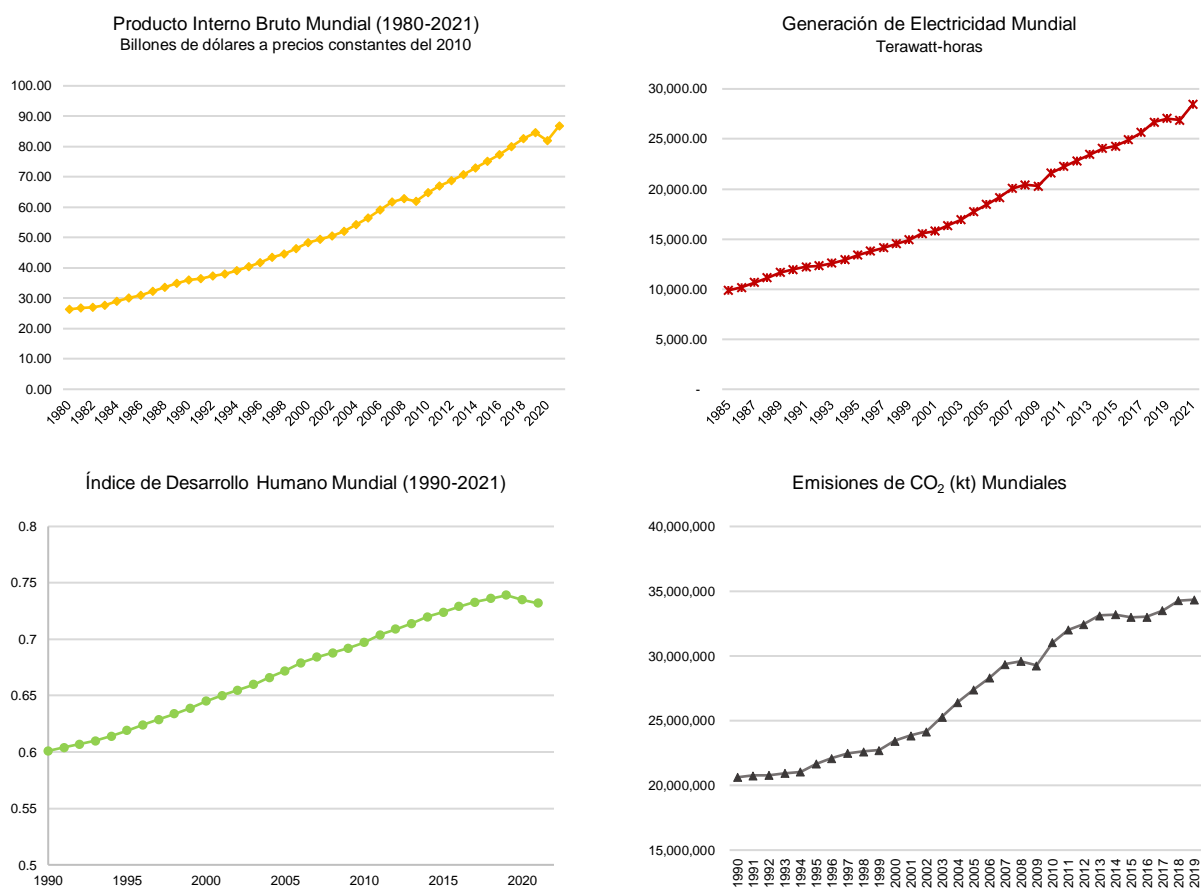
<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1. Fundamentos del proyecto de investigación .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Identificación del problema.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Pregunta de investigación.....</b>	<b>18</b>
1.2.1. Pregunta general. ....	18
1.2.2. Preguntas específicas. ....	18
<b>1.3. Justificación .....</b>	<b>19</b>
<b>1.4. Objetivos de la investigación.....</b>	<b>20</b>
1.4.1. Objetivo general.....	20
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
<b>1.5. Hipótesis de investigación .....</b>	<b>21</b>
<b>1.6. Delimitación del problema y elección de variables .....</b>	<b>21</b>
1.6.1. Índice de Desarrollo Humano como <i>proxy</i> de la dimensión social. ....	21
1.6.2. Producto Interno Bruto como <i>proxy</i> de la dimensión económica.....	22
1.6.3. Emisiones de CO <sub>2</sub> como <i>proxy</i> de la contaminación ambiental.....	22
1.6.4. Generación de electricidad como <i>proxy</i> del sector energético. ....	22
<b>1.7. Aportaciones .....</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo 2. Estado del arte sobre el nexo energía y desarrollo humano .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. Antecedentes teóricos .....</b>	<b>27</b>
2.1.1. Principales líneas de investigación del nexo energía-medioambiente-crecimiento. ....	28
2.1.2. Vínculo entre desarrollo humano y la energía. ....	30
<b>2.2. Relación entre electricidad y desarrollo humano .....</b>	<b>31</b>
2.2.1. Análisis fundamentados en la medición de correlación. ....	31
2.2.2. Análisis vía modelos econométricos. ....	32
2.2.3. Nexo entre las energías renovables y el desarrollo. ....	37
<b>2.3. Hipótesis sobre el nexo crecimiento y energía .....</b>	<b>39</b>
<b>2.4. Revisión literaria para la economía mexicana.....</b>	<b>42</b>
<b>Capítulo 3. Contexto general del parque eléctrico en México.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1. Consumo de energía .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2. Matriz Energética .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3. Acceso a la electricidad.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4. Matriz Eléctrica .....</b>	<b>64</b>
<b>Capítulo 4. Marco metodológico .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Propiedades de las series de tiempo.....</b>	<b>70</b>
4.1.1. Carácter autorregresivo de series de tiempo.....	70

4.1.2. Concepto de series estacionarias y no estacionarias. ....	71
4.1.3. Tendencia, ciclos y estacionalidad en datos de series de tiempo. ....	73
<b>4.2. Determinación de la estacionariedad en las series de tiempo.....</b>	<b>74</b>
4.2.1. Proceso estocástico de raíz unitaria. ....	76
4.2.2. Cambios estructurales en series de tiempo.....	82
<b>4.3. Métodos para el análisis de series de tiempo .....</b>	<b>83</b>
4.3.1. Marco teórico para la selección de la metodología. ....	84
4.3.2. Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS).....	86
4.3.3. Modelo de Vectores Autorregresivos (VAR). ....	87
4.3.4. Prueba de Cointegración.....	88
4.3.5. Modelo de Corrección de Errores (ECM).....	90
4.3.6. Modelo Autorregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL). ....	91
4.3.7. Prueba de Causalidad. ....	100
<b>4.4. Pruebas de diagnóstico para modelos de series de tiempo .....</b>	<b>101</b>
4.4.1. Bondad de Ajuste.....	101
4.4.2. Pruebas de Diagnóstico.....	102
<b>Capítulo 5. Especificación del Modelo .....</b>	<b>103</b>
5.1 Selección de la base de datos y descripción de las variables .....	103
5.2. Cointegración.....	106
5.3. Causalidad.....	107
<b>Capítulo 6. Resultados empíricos y discusión.....</b>	<b>109</b>
6.1. Análisis exploratorio de los datos .....	109
<b>6.2. Resultados de las pruebas de raíces unitarias con cambios estructurales.....</b>	<b>112</b>
6.2.1. Identificación de cambios estructurales. ....	113
6.2.2. Pruebas de raíces unitarias.....	115
<b>6.3. Análisis de Cointegración .....</b>	<b>117</b>
6.3.1. Cointegración por procedimiento de Johansen. ....	118
6.3.2. Cointegración por modelo ARDL y prueba de límites F. ....	120
6.3.3. Construcción de un ECM para ver la velocidad de ajuste y resultados de corto plazo.....	124
<b>6.4. Resultados de las pruebas de Causalidad.....</b>	<b>131</b>
6.4.1. Análisis Funciones Impulso – Respuesta. ....	137
<b>Conclusiones e implicaciones de política pública .....</b>	<b>140</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>145</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>171</b>

## Introducción

En las últimas cuatro décadas muchas economías emergentes y en desarrollo han experimentado un rápido incremento en sus ingresos y al mismo tiempo se han enfrentado con el reto de abastecer una demanda creciente de energía para satisfacer sus necesidades diarias. En la **Figura I.1.** se pueden observar los principales indicadores relativos al crecimiento económico, energía, desarrollo social y contaminación y su evolución a nivel mundial. Sin embargo, con miras a alcanzar un cierto nivel de bienestar social, este desarrollo también ha venido acompañado por una creciente contaminación ambiental.

**Figura I.1.**  
*Principales indicadores de evolución mundial.*



*Nota.* Información del Banco Mundial para los indicadores de Producto Interno Bruto y Emisiones de CO<sub>2</sub>, se utilizó el *BP statistical review* a junio 2022. Para graficar la generación de electricidad y el puntaje histórico del índice de desarrollo humano con información del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas.

Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, ha surgido un consenso internacional sobre la necesidad de abordar simultáneamente las preocupaciones sobre la seguridad energética y el cambio climático. A medida que ha aumentado la evidencia científica sobre los orígenes y el posible efecto destructivo de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), los responsables políticos de todo el mundo han estado diseñando políticas destinadas a avanzar hacia una economía baja en carbono. Dada su contribución al problema, el sector energético es clave para la solución. No obstante, alcanzar el doble objetivo de garantizar la seguridad energética y mitigar las emisiones de GEI no es tarea fácil (Melgar, 2010).

Además, la energía no solo juega un papel importante en temas medioambientales, sino también en temas como la erradicación de la pobreza, el mejoramiento a la educación, la reducción de la mortalidad y el acceso a atención médica, entre muchos otros aspectos asociados con la calidad de vida de la sociedad. El Banco Mundial ha descrito a la energía como «el hilo» que une el crecimiento económico, la equidad social y la sostenibilidad ambiental. Dado el papel relevante del sector energético en el bienestar social, aunado al telón de fondo de una crisis energética mundial y el empeoramiento de la emergencia climática, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) está intensificando su trabajo en materia de energía para apoyar a los países en la consecución de una transición energética justa, ayudándoles a avanzar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al tiempo que abordan la crisis climática.

Por tal motivo, la política energética requiere una planificación a largo plazo y conlleva decisiones que tendrán efecto en las próximas décadas, mientras que las estrategias de mitigación conllevan un sentido de urgencia y un grado de incertidumbre que choca con el objetivo a corto plazo de garantizar la disponibilidad de recursos energéticos a nivel mundial a precios más competitivos. En ese sentido, los problemas del cambio climático, los asuntos de seguridad energética y las preocupaciones económicas han convergido, impulsando la necesidad de resolver la ecuación de las "3E" (medioambiente "*environment*", economía y energía) a través de un cambio de paradigma en la forma en que se produce y consume la energía. Esta es la fuerza subyacente detrás del concepto de transición energética (Melgar, 2010). La transición energética ofrece una oportunidad para lograr simultáneamente los objetivos de seguridad energética, reducir las emisiones de GEI y promover el desarrollo tanto económico como social. No obstante, se tendría que hacer la pregunta ¿esta transición se está realizando de manera sostenible?, es decir, evaluar si considera las tres dimensiones del desarrollo sostenible: ambiental, social y económica.

La relación entre el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO<sub>2</sub>, se ha investigado tanto en países desarrollados como en desarrollo. A la fecha existe una vasta literatura que ha examinado la relación de causalidad entre el nexo energía-crecimiento-contaminación, sin llegar aún a un consenso o conclusión aplicable para todos los países, ya que estos estudios se han realizado a países con diferentes estructuras económicas y distintas metodologías para analizar el mismo problema, se han elegido distintas variables de estudio, periodos de tiempo, entre otros; más aún, esta literatura se acota cuando se trata de analizar este nexo por el lado de la producción (generación) de electricidad y se vuelve todavía más escasa cuando se trata de analizar dicha variable de manera seccionada, es decir, por fuentes de energía renovable y no renovable, así como el problema de cuantificar su interrelación con el desarrollo humano.

Tal es el caso de México, país productor y exportador de petróleo, que ha entrado en la fase natural de madurez debido a que su principal campo petrolero, Cantarell, está disminuyendo rápidamente su producción. El caso de México nos permite explorar a fondo los dilemas que enfrenta una economía emergente en su búsqueda de pasar a una economía baja en carbono en un intento por alcanzar sus metas de crecimiento económico y cumplir con sus responsabilidades internacionales como camino hacia el desarrollo sostenible.

Dado esto, se vuelve relevante realizar un estudio de cointegración y causalidad para México, ya que a pesar de que existen algunos estudios que analizan este nexo a nivel país, son muy pocos los que lo abordan por el lado de la producción de electricidad (considerada como energía moderna) y, más aún, al momento de redactar estas líneas no existe un estudio que analice esta relación diferenciada por fuentes de energía renovables y no renovables considerando su impacto en el desarrollo humano. Este último aspecto constituye una aportación novedosa al conocimiento sobre la evidencia empírica existente.

Resulta imprescindible conocer el sentido de causalidad (si la hubiere) entre la generación de electricidad (renovable y no renovable), el crecimiento económico, la contaminación ambiental y su impacto en la calidad de vida, medida con el índice del desarrollo humano para México. Los hallazgos obtenidos constituyen evidencia valiosa para rediseñar y direccionar las políticas públicas del sector.

Es por esto, que el objetivo de este trabajo es **analizar el impacto de la producción de electricidad por fuentes de energía renovable y no renovable en el desarrollo humano en México y su relación con las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico durante el periodo 1985-2021**. Considerando que la generación de electricidad contribuye a la mejora de los ingresos, lo que favorece

el acceso a la salud y la educación, se argumenta en este trabajo que la producción de electricidad es beneficiosa para el desarrollo humano.

El presente proyecto de investigación se encuentra dividido en 5 capítulos, en el capítulo 1 se abordan los fundamentos del estudio que incluyen el planteamiento del problema, el objetivo y preguntas de la investigación, así como la hipótesis planteada y las principales aportaciones.

En el capítulo 2, se presenta el estado del arte sobre el nexo electricidad, crecimiento, desarrollo social y contaminación ambiental. Al respecto, se realiza una discusión detallada sobre las diferentes corrientes de pensamiento sobre el papel de la energía como un componente esencial para el *bienestar social*. Además, se expone una revisión literaria empírica sobre este nexo en México. En el capítulo 3 se presenta el marco teórico que sirve como fundamento para analizar las propiedades de las series de tiempo y los diferentes métodos econométricos para su modelación.

En el capítulo 4 se presenta una descripción de las variables seleccionadas para el estudio, así como la metodología apropiada y definición de los modelos econométricos en el análisis de cointegración y causalidad. En el capítulo 5 se presentan los principales resultados estadísticos, interpretaciones y hallazgos del análisis. Finalmente, se incluyen las conclusiones de esta investigación, complementadas con implicaciones de política pública para el sector energético en México.

## Capítulo 1. Fundamentos del proyecto de investigación

### 1.1. Identificación del problema

La desigualdad en el desarrollo humano sigue siendo una preocupación importante para el mundo. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) emite, cada año, reportes a nivel global, regional e incluso nacional sobre este tema. El (PNUD, 2020) trabaja en seis soluciones emblemáticas: pobreza, gobernanza, resiliencia, medio ambiente, energía y género; estas permiten focalizar las funciones y responsabilidades en el espectro completo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Dichas soluciones transversales reflejan los principales factores que impulsan al mundo hacia un futuro más seguro y justo.

Para el (PNUD, 2015), la desigualdad en el desarrollo humano está influenciada por los menos favorecidos (personas que no pueden cubrir sus necesidades básicas) y los más favorecidos (las acciones humanas dentro de nuestra sociedad). Un desafío central del desarrollo sostenible es mantener el progreso en los estándares de vida de las personas en todas partes, especialmente para aquellos que hoy en día son los más desfavorecidos, sin poner en peligro aún más nuestro entorno natural compartido. Sin embargo, esto se puede lograr en la medida en que la tecnología avanza y los costos disminuyen: las fuentes de energía renovables y económicas ahora pueden brindar luz durante la noche y energía durante el día incluso a las comunidades de bajos ingresos y más remotas.

En efecto, respecto la privación de necesidades (los menos favorecidos), el (PNUDb, 2015) reconoció que la privación de energía es uno de los obstáculos para alcanzar los ODS al 2030. En cuanto a la acción humana en la sociedad, las Conferencias de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP) años 2015, 2019, 2021 y 2022 destacaron el vínculo entre la energía y el medioambiente. Es por eso, que independientemente del tipo de población (menos favorecidos o más favorecida) que se trate, el papel de la energía juega un rol crucial en la reducción de la desigualdad y en el medioambiente.

Para (Karekezi, McDade, Boardman, & Kimani, 2012), la inaccesibilidad a los servicios básicos de energía contribuye a mantener a las personas pobres en un círculo vicioso de pobreza y, por lo tanto, obstaculiza el desarrollo humano. Esta opinión también cuenta con el respaldo de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, 2017). Para esta institución, el acceso a los servicios energéticos, en general, y modernos<sup>1</sup>, en particular, es fundamental para

---

<sup>1</sup> Por servicio energético moderno nos referimos a la electricidad.

la erradicación de la pobreza, el crecimiento económico, la creación de empleo, los servicios sociales y, en general, la promoción del desarrollo humano. En consecuencia, los servicios energéticos limpios, fiables y asequibles son indispensables para la prosperidad mundial. **Las preocupaciones sobre el vínculo entre el uso de energía y el desarrollo humano son indudables tanto en la evidencia como en la literatura.**

De igual manera, se argumenta que la producción de energía a partir del petróleo y el carbón es responsable de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la contaminación ambiental. Se ha argumentado que las emisiones de CO<sub>2</sub> están aumentando en todo el mundo y el calentamiento global se está convirtiendo en un desafío para este mundo (Wu et al., 2018). El calentamiento global ha sido considerado como uno de los principales problemas que la humanidad ha enfrentado hasta ahora (Engo, 2019), como son afectaciones en la salud humana, vulnerabilidad de comunidades enteras ante cambios abruptos en el clima, afectaciones en los sistemas naturales, nuestros bosques, la vida marina, la seguridad alimentaria mundial, los recursos hídricos mundiales, la agricultura, las enfermedades de las plantas, entre otros problemas.

Las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, son la principal razón del calentamiento global y del cambio climático. En la búsqueda de las principales causas del aumento de las emisiones de carbono en los aspectos económicos, el consumo y producción de energía (ligado fundamentalmente a la quema de los combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas) y el crecimiento económico podrían ser los principales candidatos posibles para aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero.

En resumen, la energía es un elemento central para el desarrollo de un país, particularmente, el acceso a la energía eléctrica. Más allá de su disponibilidad y flexibilidad, la electricidad tiene otras ventajas (Pettersson, Soderholmb, & Lundmark, 2012). Por ejemplo, puede suministrarse continuamente y transmitirse a largas distancias por líneas o redes eléctricas. La energía eléctrica es la que hace funcionar a diferentes industrias y nos permite disfrutar de un ambiente confortable mediante la calefacción y el aire acondicionado. Otro claro ejemplo más reciente, (Naciones Unidas, 2022) fue la reciente crisis vivida por la pandemia COVID-19, donde los servicios energéticos fueron clave para prevenir las enfermedades y luchar contra la pandemia; desde proporcionar suministro eléctrico a los establecimientos sanitarios y agua limpia para una higiene esencial, hasta permitir las comunicaciones y los servicios de telecomunicaciones que conectan a las personas manteniendo el distanciamiento social. Esto se debe a que la disponibilidad de energía tiene un efecto directo sobre la productividad, la salud, la

educación, el abastecimiento de agua potable, los servicios de comunicación, y una larga lista de beneficios y servicios.

En ese sentido, se puede decir que el acceso a la energía moderna, como la electricidad, juega un papel importante como impulsora del crecimiento económico y progreso humano (Doignon, 2022). Sin embargo, en los países desarrollados, en los que el acceso a la electricidad está garantizado, los desafíos del sector tienen que ver no solo con la calidad y costo, sino también y no menos importante con el impacto ambiental. En México, esta situación no ha sido la excepción.

Este trabajo pretende analizar la generación de electricidad y su relación con el desarrollo humano para proponer una planeación de crecimiento de manera sostenible. A pesar de que el consumo de energía y la producción de electricidad se consideran aspectos estratégicos para México, es necesario evaluar **el papel que juega la generación de electricidad en el desarrollo social y, con el propósito de atender la demanda de energía futura y aumentar la calidad de vida, si se ha venido llevando de manera sostenible**. Por sostenible nos referimos al hecho de que considere las tres dimensiones: económica, social y medioambiental.

Para esto es necesario tener en contexto la composición y evolución del parque eléctrico en México, a ser visto de manera general en el capítulo 3 del presente estudio. A pesar de que a finales del 2021 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cerró el año con una cobertura<sup>2</sup> del 99.21% del servicio de energía eléctrica, en el país sigue habiendo un poco más de un millón de habitantes sin acceso a este servicio y se estima que el 23% de la población del país (28 millones de personas) utiliza leña o carbón para cocinar, esto, según la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI), realizada por el INEGI en 2019.

Desde el celebrado Acuerdo<sup>3</sup> de París de 2015, la capacidad instalada de energía renovable ha aumentado en forma acelerada como resultado de los mecanismos de subastas y licitaciones que han adoptado países suscritos a acuerdos internacionales de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Levy, Messina, & Contreras, 2021).

---

<sup>2</sup> Información tomada del informe anual 2021 de la Comisión Federal de Electricidad, publicada el 22 de abril del 2022.

<sup>3</sup> El 12 de diciembre del 2015 se aprobó el Acuerdo de París dentro de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP21). Este Acuerdo es un tratado internacional como un esfuerzo global de 194 países en reorientar su desarrollo hacia uno más sostenible, con compromisos de acción sobre energías renovables, abandono de los combustibles fósiles y conservación de los bosques.

Datos consultados de la Agencia Internacional de Energía<sup>4</sup>, revelan que en 2020 las emisiones globales de CO<sub>2</sub> por la quema de combustibles mostraron una disminución sin precedentes de casi un 6%, ya que la pandemia de COVID-19 redujo drásticamente la demanda mundial de energía. Sin embargo, a pesar de esto los combustibles fósiles aún contribuían en un 80% del suministro total de energía a nivel mundial, con el petróleo representando el 29%, seguido del carbón (27%) y el gas natural (24%). Las emisiones globales de la quema de combustible estuvieron dominadas por el carbón (45%), seguido del petróleo (32%) y el gas natural (22%).

Aunque el 60% de las emisiones globales vienen solo de cinco países<sup>5</sup>, a finales del 2020 México ocupó el decimoquinto lugar de los países que producen más emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Las emisiones de gases de efecto invernadero de México (374 Millones de toneladas de CO<sub>2</sub>) representan el 1.10% de las emisiones a nivel mundial, y es el segundo país de Latinoamérica con una mayor contribución, sólo superado por Brasil (decimotercer lugar global).

De conformidad con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) realizado en el año 2020, los subsectores que más emisiones<sup>6</sup> de gases efecto invernadero generaron en México son la industria de la energía y el transporte, con 184.9 GgCO<sub>2</sub>e (45.2%) y 143.8 GgCO<sub>2</sub>e (35.2%), respectivamente. Les siguen la industria manufacturera y de la construcción (44.7 GgCO<sub>2</sub>e, 10.9%) y otros sectores (35.5 GgCO<sub>2</sub>e, 8.7%). Los sectores correspondientes a la agricultura, procesos industriales y residuos al momento de la consulta no cuentan con información disponible. Cabe mencionar, que la actividad de producción de electricidad y calor, dentro de la industria de la energía, representa el 80% (147.5 GgCO<sub>2</sub>e), es decir el 36.1% del orbe.

En conclusión, debido al ampliamente reconocido papel del sistema energético en el desarrollo social y en el diseño de un modelo de desarrollo sostenible y que, en esa misma medida, existe una estrecha relación de la generación y el uso de la energía con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y sus consecuencias sobre el cambio climático y la salud humana, diversos autores han puesto al sector energético en el punto de mira de la comunidad internacional.

---

<sup>4</sup> Para mayor información sobre el panorama global consultar la siguiente liga: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>

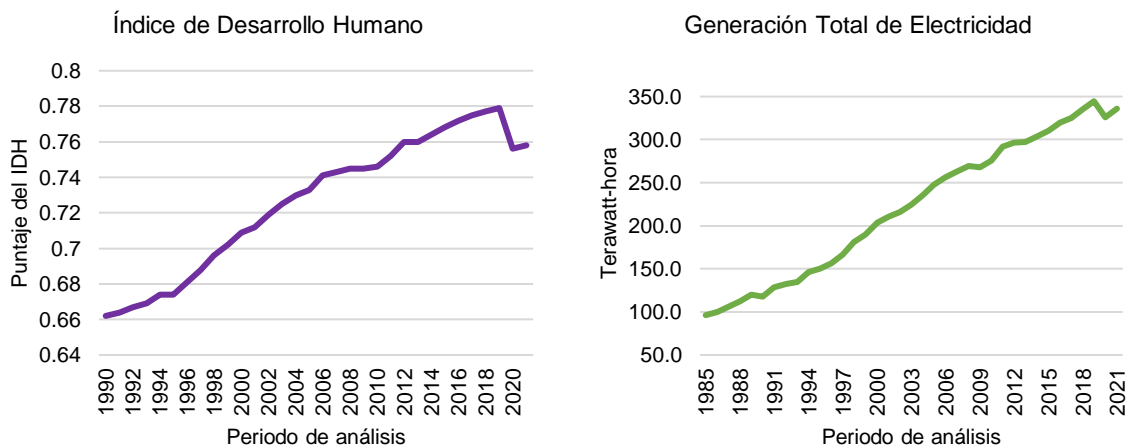
<sup>5</sup> China (31.1%), Estados Unidos (13.9%), India (7.5%), Rusia (4.7%) y Japón (3.1%). Datos tomados del "BP Statistical Review 2022".

<sup>6</sup> Información tomada del [Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático \(2018\). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero \(INEGYCEI\)](#).

Por tal motivo, este estudio utiliza como variable *proxy* para medir el desempeño económico de México al Producto Interno Bruto (PIB). Por su parte, se utilizaron las Emisiones de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) como *proxy* de carácter ambiental. La producción de electricidad considera la generación de electricidad segmentada en fuentes de energías renovables<sup>7</sup> (GREN) y no renovables<sup>8</sup> (GNREN). Por último, el indicador utilizado para medir el carácter social del presente análisis está dado por el Índice de Desarrollo Humano (IDH).

A nivel fáctico, vale la pena mencionar que el desarrollo humano en México se situó en 0.739 para 2019. Tras la pandemia COVID-19 en el 2020, el indicador se ubicó en 0.752, y con la reactivación económica a finales del 2021, se situó en 0.758. Con este puntaje México se coloca en la clasificación IDH Alto<sup>9</sup> en 2021 ocupando el lugar número 86 de 191 a nivel mundial. En los últimos diez años (2010-2021) la tasa de crecimiento promedio para el IDH ha sido del 0.5% y durante el mismo periodo del 1.5% para la generación total de electricidad. Para el caso de las emisiones de dióxido de carbono de 2010-2021 en México han disminuido en un 2.2%. Sin embargo, del año 2020 al 2021 las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron en un 4.8%. Este incremento pudo deberse al levantamiento de las medidas de confinamiento derivadas de la pandemia y repunte de la actividad económica. En la **Figura 1.1.** se observa la evolución de estas variables en México.

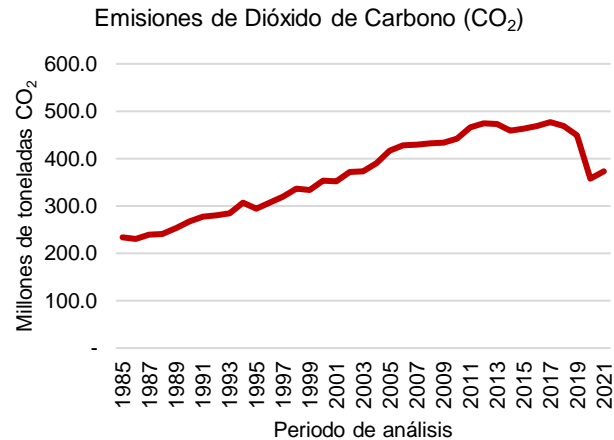
**Figura 1.1.**  
*Evolución de las principales variables de estudio en México.*



<sup>7</sup> El concepto de energías limpias y renovables no es el mismo. El primero tiene una connotación local y el segundo es de carácter más internacional. Para fines de este análisis nos referiremos por energías renovables a las provenientes del sol, viento, hidroeléctrica, geotermia, nuclear y biomasa.

<sup>8</sup> Las energías no renovables serán las destinadas a la generación de electricidad provenientes del carbón, petróleo y gas natural.

<sup>9</sup> Datos tomados de <https://hdr.undp.org/data-center/specific-country-data#/countries/MEX>.



Fuente: elaboración propia con datos del Programa de las Naciones Unidas para el IDH y BP *statistical review* a junio del 2022 para las emisiones de CO<sub>2</sub> y la generación total de electricidad.

Estos datos muestran que para México las series de generación de electricidad, IDH y emisiones de CO<sub>2</sub> pudieran estar relacionadas. Por tal motivo, resulta un área de investigación particularmente interesante de analizar los efectos de la generación de electricidad con el desarrollo humano. Además, desde un punto de vista de política pública, también se considera necesario saber si la dirección de causalidad entre la producción de electricidad y el desarrollo humano tiene implicaciones ambientales importantes.

La literatura ha enfatizado cuatro posibles hipótesis sobre la relación entre la energía y el desarrollo económico: crecimiento, conservación, neutralidad e hipótesis de retroalimentación, sin llegar a un consenso. En el capítulo 2, se explicarán más a fondo estas relaciones de causalidad.

Estas controversias en la literatura muestran que la relación entre electricidad y el desarrollo humano sigue siendo relevante, lo que justifica esta investigación. Por tal motivo, una de las principales aportaciones es que el análisis lo haremos por el lado de la producción de electricidad, esta última como la energía moderna, y seccionada por fuentes de energía renovables y no renovables además de considerar al crecimiento económico y contaminación ambiental de manera conjunta.

En resumen, aumentar el acceso a la electricidad es esencial para mejorar el desarrollo humano en los países en vías de desarrollo o en las economías emergentes. Para ello, la relación entre la generación de electricidad y el desarrollo humano es fundamental para apoyar el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, la discusión sobre este tema es limitada. En México, desarrollar políticas

adecuadas requiere caracterizar el impacto de la producción de electricidad en el desarrollo humano.

Este documento servirá como fundamento para abonar al análisis y estudio de estas relaciones de causalidad para México, las cuales se tornan importantes especialmente para el ámbito de implementación de la política pública para el sector energético. Dicho análisis, servirá como soporte a las estrategias del gobierno en materia de energía, así como a los hacedores de las políticas públicas para el diseño, rediseño e implementación efectiva de la política energética.

El problema por analizar en la presente investigación radica en que son pocos los estudios de causalidad sobre la relación entre estas tres variables: **crecimiento económico, energía y emisiones de CO<sub>2</sub>** para el caso de la economía mexicana y con resultados empíricos heterogéneos. Además, hasta donde se tiene conocimiento, no existe aún algún estudio formal para México que analice por el lado de la producción de electricidad de manera diferenciada por fuentes de energía renovable y no renovable, y sus implicaciones con el Índice de Desarrollo Humano.

Lo anterior, justifica el interés por aprender más acerca de la relación dinámica entre estas variables. Ya que, la mayoría de dichos estudios analizan esta relación de manera bivariada. Por tal motivo, es deseable que mediante un modelo que combine las variables de PIB, emisiones de CO<sub>2</sub>, la producción de electricidad por fuentes renovables (GNREN) y no renovables (GREN) y su impacto en el IDH; se pueda obtener una mejor comprensión de la relación dinámica entre estas variables. Dicha comprensión, es crucial para entender las políticas energéticas y ambientales actuales y con esto desarrollar nuevas y efectivas políticas del sector.

## 1.2. Pregunta de investigación.

### 1.2.1. Pregunta general.

¿Cuáles son los efectos ambientales y sociales de la generación de electricidad en el desarrollo humano en México?

### 1.2.2. Preguntas específicas.

- ¿Cuáles son los efectos de la generación de electricidad seccionada por fuentes de energía renovables y no renovables (GNREN y GREN) en el desarrollo humano (IDH)?

- ¿En qué magnitud el crecimiento económico, medido por PIB influye en el IDH?
- ¿Existe alguna relación de causalidad entre el CO<sub>2</sub> y el IDH?

### 1.3. Justificación

En las últimas décadas, muchas economías emergentes y en desarrollo han experimentado un rápido incremento en el consumo y producción de energía, esto debido a la creciente demanda de energía, además de las políticas de transición y seguridad energética de cada país. La energía es fundamental para todos los sectores de las economías modernas, y por eso sustenta todas nuestras actividades económicas. Sin embargo, si las tendencias actuales continúan, la demanda global de energía se proyecta a duplicarse para el 2050 (World Energy Council, 2013). Bajo este contexto, se plantean las interrogantes: ¿Cómo podemos incrementar la oferta de energía para satisfacer la creciente demanda? ¿Cómo podemos desarrollar fuentes de energía confiables, alternativas y sostenibles para satisfacer la demanda? ¿Cuáles serían las implicaciones medioambientales, políticas y económicas de este incremento en la demanda de energía? Una amplia investigación en economía y disciplinas afines ha buscado abordar estas preguntas.

Con la creciente preocupación por el cambio climático, un aspecto de la energía que ha recibido una atención considerable recientemente es el impacto de la electricidad en el crecimiento económico y el desarrollo constante de fuentes alternativas de electricidad. Estudios recientes han argumentado que examinar la relación entre el consumo total de electricidad y el crecimiento económico puede ser engañoso, ya que la respuesta del crecimiento económico puede diferir dependiendo de si la fuente de electricidad es renovable versus no renovable. Como consecuencia, recientemente se ha prestado cierta atención al uso de datos más desagregados al examinar los impactos del consumo de electricidad en el crecimiento económico. (Al-mulali, Fereidouni, & Lee, 2014) analizan el consumo de electricidad renovable y no renovable para 18 países de América Latina, encontrando que cada uno tuvo un impacto positivo en el crecimiento a corto y largo plazo.

A la fecha existe una gran cantidad de trabajos publicados que investigan de manera empírica la relación entre el consumo de energía-crecimiento económico-emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). No obstante, existe muy poca literatura que analice este nexo por el lado de la producción de electricidad desagregándola por fuentes de energía renovable y no renovable.

De hecho, la interacción entre crecimiento económico, consumo de energía y calidad medioambiental ha sido el tema de investigación de un debate académico significativo relacionados con la literatura de la economía de la energía y así revitalizar el largo debate en las esferas académicas y políticas sobre sus ventajas y costos reales causados por sus interacciones.

Para el caso de México, existen pocos trabajos y la mayoría se centra en analizar la relación entre las exportaciones y crecimiento económico, y entre consumo de energía y crecimiento económico, sin encontrar un consenso (Gómez, Ciarreta, & Zarraga, 2018). **Hasta el momento, ninguno analiza las hipótesis planteadas entre estas variables de manera conjunta y seccionada por fuentes de energía renovable y no renovable, así como su impacto en el desarrollo humano.** Esta investigación pretende contribuir con evidencia empírica sobre la relación de cointegración y de causalidad entre el desarrollo humano, la producción de electricidad por fuentes de energía renovable y no renovables, crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, incorporando cambios estructurales para México. Se incluyen en el análisis las cinco variables para evitar la posible presencia de la variable omitida.

#### 1.4. Objetivos de la investigación

##### 1.4.1. Objetivo general.

El objetivo de este trabajo es **analizar el impacto de la producción de electricidad por fuentes de energía renovable y no renovable en el desarrollo humano en México y su relación con las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico durante el periodo 1985-2021.** Considerando que la generación de electricidad contribuye a la mejora de los ingresos, lo que favorece el acceso a la salud y la educación, se argumenta en este trabajo que la producción de electricidad es beneficioso para el desarrollo humano.

##### 1.4.2. Objetivos específicos.

- Determinar la existencia y relación de causalidad entre el IDH y la producción de electricidad renovable y no renovable en México durante el periodo 1985-2021.
- Determinar la existencia y relación de causalidad entre crecimiento económico y el desarrollo humano en México durante el periodo 1985-2021.

- Determinar la existencia y relación de causalidad entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la calidad de vida en México durante el periodo 1985-2021.

### 1.5. Hipótesis de investigación

Este estudio pretende demostrar una relación de causalidad entre el desarrollo humano y la generación de electricidad en México durante el periodo de 1985 al 2021.

En México existe evidencia de hipótesis conservacionista. Sin embargo, al ser un país con una economía emergente y al encontrarse en transición energética, es más probable que la producción de electricidad juegue un papel importante en el desarrollo humano validándose en el largo plazo la hipótesis de crecimiento.

### 1.6. Delimitación del problema y elección de variables

#### **1.6.1. Índice de Desarrollo Humano como *proxy* de la dimensión social.**

El principal objetivo del desarrollo humano, como se establece en el Informe sobre Desarrollo Humano del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), es crear un entorno propicio para que las personas disfruten de una vida larga, saludable y creativa. En este contexto, los ingresos y el crecimiento económico son medios y no un fin para el desarrollo, y el bienestar de las personas depende de cómo se utilicen los ingresos para lograr mejores niveles de calidad de vida. La ONU analizó varios conceptos planteados en debates anteriores sobre el desarrollo y los colocó en un marco integral de desarrollo humano que se definió como “un proceso de ampliación de las opciones de las personas, las más críticas son llevar una vida larga y saludable, recibir educación y disfrutar un nivel de vida digno” (PNUD, 1990).

Sin duda, el IDH en sí mismo es claramente una medida reduccionista, que incorpora solo un subconjunto de posibles elecciones humanas, las opciones adicionales incluyen libertad política, derechos humanos garantizados y respeto por uno mismo. Estos factores ciertamente difieren ampliamente entre países, y los datos de series de tiempo consistentes para estas variables son escasos; en la mayoría de los casos, algunos factores no están disponibles para medir. Es difícil evaluar sus impactos en el desarrollo humano. No obstante, la influencia de la energía en la calidad de vida se evalúa frecuentemente con el IDH como medida de bienestar (Ouedraogo, 2013). Por lo tanto y a pesar de sus limitantes, la métrica de bienestar más aceptada es el Índice de Desarrollo Humano (IDH), que se basa en

tres aspectos: salud, educación e ingresos (Korsakienė, Breivytė, & Wamboye, 2011).

### **1.6.2. Producto Interno Bruto como *proxy* de la dimensión económica.**

La forma común de evaluar el crecimiento económico de las naciones y provincias se funda en el cálculo del producto interno bruto per cápita (PIB per cápita). A su vez, la precisión de este cálculo determina en buena medida el nivel de bienestar de una unidad territorial (Sierra, 2015). El PIB per cápita hoy permite calcular el crecimiento de las naciones, y su cálculo se realiza mediante las llamadas cuentas nacionales.

La relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico (medido con indicadores monetarios como el producto interno bruto (PIB), el producto nacional bruto (PNB) o el PIB per cápita ha sido ampliamente discutida, mostrando una cointegración y causalidad a largo plazo a nivel de país (Ferguson, Wilkinson, & Hill, 2000) (Ouedraogo, 2013). Otras variables como el nivel de empleo o la formación bruta de capital también han sido utilizadas como variables proxy para medir el crecimiento económico, sin embargo, la más utilizada para analizar la causalidad entre el energía y crecimiento ha sido el PIB per cápita.

### **1.6.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> como *proxy* de la contaminación ambiental.**

Las variables ambientales, son aquellas que influyen en el desarrollo ambiental dentro de un contexto específico. Estas se agrupan en las áreas temáticas hidrología, grado de contaminación, la calidad del agua, suelos, geodinámica, biota y aspectos socioeconómicos (Zilio, 2008). Cuando se realiza una evaluación ambiental se analizan los efectos que unas variables pueden producir en otras a través de las interacciones que ocurren entre ellas.

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el principal gas de efecto invernadero que se emite a raíz de las actividades del ser humano (EPA, 2018). Es necesario mencionar que las emisiones de CO<sub>2</sub> solo se usan como un *proxy* de contaminación, ya que el medio ambiente engloba no solo la contaminación del aire sino también otros aspectos como el desgaste del uso del suelo, contaminación de acuíferos y más.

### **1.6.4. Generación de electricidad como *proxy* del sector energético.**

Se ha mencionado el uso de la energía eléctrica como energía moderna, el nivel de consumo de electricidad puede considerarse como un criterio de evaluación del nivel de desarrollo de un país. Como fuente de energía artificial (Bhargava, Singh,

& Gupta, 2009), la electricidad puede generarse a partir de energía primaria (Pettersson, Soderholmb, & Lundmark, 2012) y/o convertirse en una forma definitiva de energía con la ayuda de diversas tecnologías (Bhargava, Singh, & Gupta, 2009).

Diversos hallazgos indican el papel esencial que juega la electricidad, más que la energía en general, en el desarrollo de la sociedad moderna con sus importantes beneficios comerciales y no comerciales asociados (Ferguson, Hill, Craggs, & Forbes, 1997) (Ferguson, Wilkinson, & Hill, 2000) (Niu, y otros, 2013). Por lo tanto, se piensa que la electricidad es la energía que tiene la aplicación más amplia y juega un papel importante en el desarrollo económico y social de todos los países (Mazur, 2011) (Apergis & Payne, 2011b). El servicio de energía eléctrica ha sido el requisito básico para mejorar el nivel de vida y apoyar el desarrollo social y por lo tanto un buen indicador que refleja el nivel de desarrollo social de un país (Niu, y otros, 2013). En el proceso de modernización, es necesario producir cantidades adecuadas de energía eléctrica para avanzar en el desarrollo sostenible.

Por esto, es que se decidió por utilizar como variables proxy a la generación de la electricidad, seccionada por fuentes renovables y no renovables. Es necesario definir el concepto de estas dos variables. La energía no renovable se refiere a las fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en una cantidad limitada y que se agotan a medida que se consumen, o cuya tasa de utilización es muy superior al ritmo de formación natural del recurso. Se clasifican en forma general en combustibles fósiles<sup>10</sup>. Las principales fuentes de generación de electricidad no renovable son las provenientes del petróleo, gas, y carbón, así como sus respectivos derivados (CFE, 2022).

Por otro lado, comúnmente se refieren a las energías “limpias” o “renovables” como si estas fueran sinónimos. Sin embargo, son conceptos diferentes y su definición depende del contexto político y económico de cada país. La energía renovable<sup>11</sup> es aquella que se obtiene a partir de fenómenos de la naturaleza y se regenera naturalmente, por lo que se encuentra disponible de forma continua o periódica (como por el ejemplo el viento o la radiación solar) (ONU, 2020), mientras que la energía limpia abarca todas las fuentes de energía bajas en emisiones de carbono en comparación con las energías fósiles o no renovables. En México se construyó el concepto de “energía limpia<sup>12</sup>” como aquella que durante su producción contamina menos en comparación con otras, es decir que cuenten con una tasa de

---

<sup>10</sup> Revisar la Ley de Transición Energética en su artículo 2 fracción XVII.

<sup>11</sup> Revisar el texto de la Ley de Transición en su artículo 2 fracción XVII y la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética en su artículo 3 fracción XV.

<sup>12</sup> Revisar la Ley de la Industria Eléctrica en su artículo 3 fracción XXII.

emisiones no mayor a 100 kg/MWh (un ejemplo pueden ser la energía nuclear y el hidrogeno). Para poner en contexto, para varios investigadores la energía nuclear no es renovable (Bodel, Butler, & Matthews, 2021). Pero en términos de cambio climático, la producción de energía nuclear no libera gases de efecto invernadero, por lo que es un combustible bajo en carbono, por tanto, se considera como energía limpia (Energy, 2021).

Podemos decir, que las energías limpias contemplan a las energías renovables, pero no viceversa. Por lo anterior y para efectos de comparativo internacional, en el presente estudio el término “energía renovable” de ahora en adelante se referirá a las fuentes de energía eólica, la geotérmica, la solar, la biomasa y residuos, hidroeléctrica y nuclear.

### 1.7. Aportaciones

El presente proyecto de investigación genera contribuciones a la evidencia empírica de la economía mexicana por tres razones principales:

1. Se implementa un análisis conjunto que engloba las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económico-social-ambiental, considerando al sector energético como un determinante clave.
2. Mientras que artículos anteriores se han enfocado en el impacto del *consumo* de electricidad en el crecimiento económico y las emisiones CO<sub>2</sub>, este proyecto estudia el efecto bajo la perspectiva de la *producción* (generación) de electricidad;
3. Se evalúa el impacto de la producción de electricidad en el bienestar de la población (medido a través del Índice de Desarrollo Humano).
4. Los análisis del efecto de la generación de electricidad en el desarrollo sostenible son diferenciados por tipo de fuente: renovables y no renovables.

## Capítulo 2. Estado del arte sobre el nexo energía y desarrollo humano

La relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico y las implicaciones de política pública de los hallazgos empíricos han sido ampliamente examinados en la literatura de economía energética. Trabajos anteriores de (Griffin & Gregory, 1976), (Bernt & Wood, 1979), (Bernt, 1980) y (Bernt, 1990) enfatizan la sustituibilidad o complementariedad entre la energía y los factores de producción y la interacción con el progreso técnico y la productividad dentro de una teoría neoclásica del crecimiento económico, mientras que (Bergman, 1988), (Jorgenson & Wilcoxen, 1993), (Kemfert & Welsch, 2000) y (Smulders & Nooij, 2003), entre otros, exploran el papel de la energía dentro de un equilibrio general estructural.

En el otro lado del espectro, la economía ecológica cuestiona el papel en que el progreso técnico y la sustituibilidad entre la energía y los factores de producción impactan a la producción (Cleveland, Costanza, Hall, & Kaufmann, 1984), (Stern D., 2004). Si bien los trabajos citados con anterioridad han sido importantes para comprender el papel de la energía en la economía, ha habido una creciente literatura sobre la relación causal entre el consumo de energía y crecimiento económico utilizando una variedad de técnicas econométricas de series de tiempo.

Esta línea de investigación se deriva (Payne J. E., 2010), en parte, de las anteriores crisis del petróleo de los años 1970 al interés más reciente sobre los precios de la energía y el impacto del acuerdo del protocolo de Kioto por parte de varios países industrializados y en desarrollo para conservar energía y reducir las emisiones de efecto invernadero.

La relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico (medido con indicadores monetarios como el producto interno bruto (PIB), el producto nacional bruto (PNB) o el PIB per cápita ha sido ampliamente discutida, mostrando una cointegración y causalidad a largo plazo a nivel de país (Ferguson, Wilkinson, & Hill, 2000) (Ouedraogo, 2013). Sin embargo, mientras que una relación causal entre la electricidad y el crecimiento económico es vital para la formulación y el éxito de las políticas energéticas, una fuerte correlación no representa necesariamente una relación causal (Apergis & Payne, 2011b). Varios estudios se han desarrollado en los últimos años para aclarar la relación causal entre la energía y el crecimiento económico. Sin embargo, hasta el momento, los resultados de causalidad entre la electricidad y el desarrollo económico para diferentes países son contradictorios o inconsistentes. La discusión sobre este tema está lejos de estar resuelta y se necesitan más estudios para aportar más argumentos a esta discusión activa.

En comparación con el crecimiento económico, la calidad de vida es todavía un concepto más complejo medido con índices basados en el aporte económico y el bienestar (Lambert, Hall, Balog, Gupta, & Arnold, 2014). Así, la relación de causalidad con la electricidad es más difícil de evaluar. Se han reportado correlaciones significativas a nivel nacional entre el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el consumo de electricidad (Dias, Mattos, & Balestieri, 2006), y se han desarrollado diferentes estudios sobre la relación de causalidad entre estas mismas variables (Niu, y otros, 2013) (Ouedraogo, 2013), (Sanchez-Loor & Zambrano-Monserrate, 2015). No obstante, los resultados disponibles son insuficientes para considerar a la electricidad como un proxy del bienestar (Mulugetta, Ben Hagan, & Kammen, 2019) y de calidad de vida (Ouedraogo, 2013). La influencia de la energía en la calidad de vida se evalúa frecuentemente con el IDH como medida de bienestar (Ouedraogo, 2013). Sin embargo, la correlación entre electricidad e IDH no es tan directa como entre electricidad y crecimiento económico.

La métrica de bienestar más aceptada es el Índice de Desarrollo Humano, que se basa en tres aspectos: salud, educación e ingresos (Korsakienė, Breivytė, & Wamboye, 2011), centrándose en las personas y con el objetivo de “expandir la riqueza de la vida humana, y no simplemente la riqueza de la economía en la que viven los seres humanos” (PNUD, 2021). Mejorar el bienestar humano requiere acceso a servicios energéticos confiables y asequibles, en particular electricidad (Mulugetta, Ben Hagan, & Kammen, 2019). El acceso a la electricidad es reconocido como un indicador importante del desarrollo económico y del bienestar a escala nacional (Banco Mundial, 2018) (Ehigiamusoe, 2020) con impactos significativos en los hogares. Por lo tanto, los formuladores de políticas públicas requieren información confiable (Razmjoo, Sumper, & Davarpanah, 2019) para establecer políticas adecuadas hacia una mejora significativa del bienestar de acuerdo con los incrementos de electricidad (Sarkodiea & Adams, 2020).

Se han evidenciado diferencias significativas en las relaciones causales entre países (Niu, y otros, 2013), lo que impulsa la necesidad de más investigación y discusión (Sarkodiea & Adams, 2020). En general, la comprensión de la relación entre la generación de electricidad y el IDH es fundamental para desarrollar políticas efectivas hacia un mayor impacto de la producción de electricidad en el bienestar (Maquin & Sidharta, 2017). Con base en las diferencias entre países, esta relación debe evaluarse individualmente para cada país, para identificar sus particularidades y proponer políticas acertadas para guiar el crecimiento económico de manera que una mayor generación de electricidad contribuya a una mejora en el IDH (Niu, y otros, 2013) (Ouedraogo, 2013) (Pasternak, 2000).

Sin embargo, existe una discusión limitada sobre la relación causal entre la generación de electricidad y el IDH a nivel internacional. **Hasta el momento, ningún estudio aborda la relación causal entre la generación de electricidad por fuentes renovable y no renovables, el crecimiento económico y la contaminación ambiental en el IDH en México.** La necesidad de una generación de electricidad suficiente para proporcionar una iluminación adecuada y beneficios para la salud al tiempo que mejora las oportunidades educativas, sociales y económicas respalda la hipótesis de una fuerte relación entre el desarrollo humano y el acceso a la electricidad (Da Silveira Bezerra, y otros, 2017), (Zahnd & Kimber, 2009) que deben discutirse a nivel de país.

Más aún, el presente estudio analizará el impacto seccionado por la generación de electricidad mediante fuentes limpias y fósiles en la calidad de vida. Este es el primer paso para incluir consideraciones de bienestar dentro de los métodos gubernamentales y la expansión del sistema eléctrico en México. Las diferentes implicaciones de la generación de energía son primordiales para cumplir con los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030. Por lo tanto, proporcionar herramientas e información adecuadas a los gobiernos es fundamental para apoyar el proceso de toma de decisiones.

## 2.1. Antecedentes teóricos

Desde el trabajo inicial de (Kraft & Kraft, 1978), la contribución del consumo de energía en la esfera económica ha sido una constante área de investigación entre los economistas, por tanto, existe una vasta literatura sobre los efectos de la energía en el desarrollo. Este último es el tema de esta sección, en la que abordamos primero la revisión teórica y luego la revisión empírica.

Debido a la importancia de la energía como estímulo del crecimiento económico, la relación entre éstas y las implicaciones políticas de los hallazgos empíricos se ha examinado ampliamente en la literatura sobre economía energética. La creciente literatura sobre la relación causal entre el consumo de energía y el crecimiento económico ha utilizado una variedad de técnicas econométricas de series de tiempo. Esta línea de investigación surge (Payne J. E., 2010), en parte, de las anteriores crisis del petróleo de la década de 1970 hasta el interés más reciente en los precios de la energía y el impacto del acuerdo del protocolo de Kioto por parte de varios países industrializados y en vías de desarrollo, para conservar energía y reducir las emisiones de efecto invernadero.

Diferentes estudios se han centrado en diferentes países, períodos de tiempo, variables proxy y han utilizado diferentes metodologías econométricas para medir

la relación entre el consumo de energía y el crecimiento. Sin embargo, los resultados empíricos de estos estudios son bastante diverso a causa de los diferentes enfoques, hipótesis, metodologías, países y selección del periodo de análisis. Además, los resultados parecen ser diferentes en la dirección de la causalidad y su impacto a largo plazo frente a corto plazo en la política energética. Las implicaciones políticas de estas relaciones pueden ser significativas según el tipo de relación causal que exista.

### **2.1.1. Principales líneas de investigación del nexo energía-medioambiente-crecimiento.**

En los últimos años muchos países se han enfrentado al desafío de producir más energía para satisfacer su creciente energía la demanda y, al mismo tiempo, abordar la cuestión de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. En general, hoy en día, el cambio climático es el mayor reto al que nos enfrentamos a nivel mundial (ONU, 2021) (DeCanio, 2009) (Reddy & Assenza, 2009). La Agencia Internacional de Energía (IEA, 2003) (IEA, 2009) (IEA, 2022) sugiere que las tendencias actuales en el suministro y uso de energía son evidentemente insostenibles desde el punto de vista económico, ambiental y social. Sin una acción decisiva, las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía se duplicarán con creces para 2050 y el aumento de la demanda de petróleo aumentará las preocupaciones sobre la seguridad de los suministros (IEA, 2009).

Ya que la creciente amenaza del calentamiento global y el cambio climático han llamado la atención sobre la relación entre el crecimiento económico y los contaminantes ambientales es que podemos identificar tres vertientes (Tiba & Omri, 2016) en la literatura sobre la relación entre el crecimiento económico, energía y medioambiente.

La **primera línea de investigación** se centra en el nexo entre variables de energía y crecimiento económico. Este dinamismo busca que el desempeño económico requiera niveles altos de uso de la energía y un consumo eficiente de ésta. Desde el trabajo inicial de (Kraft & Kraft, 1978), en la economía de los Estados Unidos, la relación causal entre el consumo de energía y el crecimiento económico se ha realizado para una amplia gama de países<sup>13</sup>. El procedimiento de prueba de causalidad de Granger ha sido la herramienta más utilizada para investigar el nexo entre el crecimiento y el consumo de energía (Belloumi, 2009) (Bozoklu & Yilanci, 2013) (Pao & Fu, 2013) (Chontanawat, Hunt, & Pierse, 2008) (Apergis & Payne,

---

<sup>13</sup> Ver (Payne J. E., 2010) para una revisión exhaustiva de la literatura empírica sobre la relación causal entre el consumo de energía y el crecimiento económico.

2009), (Apergis & Payne, 2010a) (Odhiambo, 2009) (Bozoklu & Yilanci, 2013) han investigado el vínculo causal entre la producción y el consumo de energía y encuentran que el ingreso Granger causa el consumo de energía (hipótesis de conservación) y también, sus resultados revelan que el consumo de energía Granger causa el nivel de ingreso para el caso de 20 países de la OCDE. Mientras que (Pao & Fu, 2013), utilizando las pruebas de cointegración, encontraron una causalidad unidireccional que va desde los ingresos hasta el consumo de energía para Brasil, cubriendo el período de 1980 a 2010.

En relación con la electricidad, algunos de estos estudios se revisan brevemente a continuación. Por ejemplo, (Ferguson, Wilkinson, & Hill, 2000) analizaron las correlaciones entre el uso de electricidad y el desarrollo económico en más de 100 países<sup>14</sup>. Ellos, descubrieron que, para la economía global en su conjunto, existe una fuerte correlación entre el uso de electricidad y la creación de riqueza. Dado que el análisis de correlación no involucra causalidad, estudios posteriores, entre ellos (Ghosh, 2002), (Shiu & Lam, 2004), (Moritomo & Hope, 2004), (Jumbe, 2004), (Wolde-Rufael Y. , 2004), (Narayan & Smyth, 2005), (Yoo, 2005), se han centrado en la relación causal entre el *consumo* de electricidad y el crecimiento económico de varios países en desarrollo. Este tipo de información es útil para hacer inferencias sobre las implicaciones de la política energética.

Mientras que la ***segunda línea de investigación*** se centra en la hipótesis de la Curva Medio Ambiental de Kuznets (EKC, *por sus siglas en inglés*). La hipótesis EKC asume una curva en U invertida entre el crecimiento económico y la calidad ambiental (Ang, 2007) (Arouri, Youssef, M'henni, & Rault, 2012) (Saboori, Sulaiman, & Mohd, 2012), es decir, explora la relación existente entre crecimiento económico y calidad ambiental, intentando demostrar que a corto plazo el crecimiento económico genera un mayor deterioro medio ambiental, pero en el largo plazo, en la medida que las economías son más ricas éstas invierten en tecnología y son más eficientes en el uso de sus recursos, por lo tanto la calidad del medio ambiente mejora con el incremento del ingreso. Sin embargo, un mayor nivel de crecimiento económico no garantiza automáticamente mayores daños ambientales. (Arouri, Youssef, M'henni, & Rault, 2012) investigaron la validez del supuesto EKC en el contexto de la región MENA<sup>15</sup> durante el período 1981-2005. Sus resultados revelan la existencia de un nexo cuadrático entre el crecimiento económico y el *proxy* ambiental (emisiones de CO<sub>2</sub>) para la región en su conjunto. Si bien, los coeficientes estimados a largo plazo han verificado la hipótesis EKC para la mayoría de los

---

<sup>14</sup> Se cubre el periodo de 1960 a 1995 para los países pertenecientes a la OECD, se excluyen México, Hungría y República Checa al ser miembros nuevos en ese entonces. Para los países no pertenecientes de la OECD el periodo de análisis fue de 1971 a 1995.

<sup>15</sup> Países MENA son los Países pertenecientes al Medio Oriente Medio y Norte de África.

países de MENA, la existencia de puntos de inflexión con magnitud variada brinda poca evidencia en apoyo de la hipótesis EKC.

Por último, la tercera línea de investigación se centra en los vínculos tripartitos entre el consumo de energía (renovable y no renovable), el crecimiento económico y las emisiones de CO<sub>2</sub> (Alam, Begum, & Buysse, 2012) (Wang, Zhou, Zhou, & Wang, 2011) (Soytas & Sari, 2009). La literatura existente que analiza el nexo de tres vínculos “energía-economía-medio ambiente” revela tres trabajos pioneros de (Payne J. E., 2010) que revisaron el nexo entre la electricidad y los ingresos, así como el nexo entre el consumo de energía y los ingresos. Luego, (Ozturk I. , 2010) investigó la relación entre la electricidad y los ingresos y la relación entre el consumo de energía y los ingresos. Más recientemente, (Omri, 2014) analizó el nexo energía-crecimiento para casos individuales. Para el presente estudio, trascenderá más allá del análisis del nexo energía-economía-medioambiente al incorporar al análisis la variable que mida estas relaciones con la calidad de vida o bienestar, medido por el desarrollo humano.

### **2.1.2. Vínculo entre desarrollo humano y la energía.**

En términos de literatura económica, los trabajos referentes a la relación entre desarrollo humano y energía se pueden clasificar en dos direcciones.

En la primera dirección, existen dos enfoques controvertidos: el punto de vista *ortodoxo* y el punto de vista *heterodoxo*. El enfoque ortodoxo (Solow R. M., A Contribution to the Theory of Economic Growth, 1956) (Becker & Murphy, 1990) (Sen A. K., 1999) (Sinha & Sudipta, 2016) (Menegaki, 2011), basado en teorías del crecimiento (tradicional y endógeno) y la teoría del desarrollo humano desarrollada por (Sen A. , 1989) (Sen A. K., 1999), el consumo de energía no es un factor primario para el crecimiento y desarrollo humano. En otras palabras, el desarrollo humano no depende del consumo de energía sino de otros factores económicos y no económicos.

Por el otro lado tenemos el punto de vista *heterodoxo* (Georgescu-Roegen, 1979), (Jumbe, 2004), (Belke, Dobnik, & Dreger, 2011), (Stern D. I., 2012) (Ozturk I. , 2010), basado en una visión ecologista o ambientalista que considera a la energía un factor esencial para el crecimiento económico y por ende para el desarrollo humano. En este sentido, la energía es tratada directamente como un factor de producción adicional al capital y trabajo.

En la segunda dirección, encontramos a los defensores de la teoría de la transición energética (Leach, 1992) (Apergis & Payne, 2012) (Apergis & Payne, 2011a) (Omri,

2014), quienes cuestionan de si las políticas conservacionistas de energía afectan o no la actividad económica, siendo esto de gran interés en el debate internacional sobre el calentamiento global y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para estos últimos, la relación entre el consumo de energía y el desarrollo humano depende de la cantidad y calidad de la energía. Los autores postulan (Leach, 1992) (Hosier & Dowd, 1987), que a medida que aumentan los ingresos, los consumidores de energía tienden a pasar de la energía tradicional o inferior a la energía moderna debido a la facilidad de uso y la comodidad. Por lo tanto, se puede decir que cuanto más desarrollado es un país (alto desarrollo humano), menos energía fósil o inadecuada consume, la cual a su vez mejora la salud en la población.

## 2.2. Relación entre electricidad y desarrollo humano

La evaluación de la relación entre la electricidad y el desarrollo humano utiliza principalmente herramientas de análisis de correlación y modelos econométricos.

### **2.2.1. Análisis fundamentados en la medición de correlación.**

La evaluación de 60 países con datos de 1997 identificó una alta correlación entre el IDH y el consumo de electricidad per cápita (CEpc) (Pasternak, 2000). Los resultados muestran un umbral de CEpc de 4.000 kWh para lograr el desarrollo humano, concluyendo que se requiere una CE superior en los países en desarrollo para aumentar el PIB o el IDH. Además, en la evaluación de 41 países basada en datos de 1999, se identificó una alta correlación entre el IDH y el consumo de energía (Dias, Mattos, & Balestieri, 2006). Esta correlación es útil para identificar oportunidades de ahorro de energía para reducir la intensidad energética. En Indonesia, la evaluación de los datos disponibles desde 1980 hasta 2014 identificó una correlación positiva entre el IDH, el PIB y la CE (Maquin & Sidharta, 2017). Los resultados muestran la necesidad de mayores ingresos y CE para mejorar el IDH. La evaluación de la correlación del consumo de energía y electricidad per cápita con el bienestar entre 1980 y 2006 en 21 países industrializados muestra que las naciones industrializadas tienen estándares de bienestar muy altos, con poco margen de mejora. Así, aumentar la ECpc, en este caso, no se corresponde con ninguna ganancia de bienestar (Mazur, 2011).

La evaluación de 112 países entre 2005 y 2013 muestra que los países en desarrollo tienen diferentes resultados de calidad de vida (CdV) y CEpc en comparación con los países en desarrollo y desarrollados (Nadimi & Tokimatsu, 2018). Las conclusiones señalan que las nuevas tecnologías impactan en el bienestar y la CEpc en los países en desarrollo más que en los desarrollados. Al evaluar la

correlación entre el consumo de energía per cápita y las variables de CdV para 118 países utilizando datos de 1980 a 2010, se concluyó que los estándares de calidad de vida más altos requieren un mayor consumo de energía (Pasten & Santamarina, 2012). Un análisis de correlación que utilizó datos de los Indicadores de desarrollo mundial entre 1999 y 2014 para comparar 23 países africanos destacó una relación negativa significativa entre el consumo de energía per cápita, la tasa de mortalidad infantil y la tasa de mortalidad de menores de cinco años (Shobande, 2020). Estos resultados destacan la necesidad de aumentar el consumo de energía per cápita para abordar ambos indicadores de salud en África. Además, en Nepal, se identificó un fuerte impacto positivo de la CE en los años promedio de escolaridad, que son índices utilizados para calcular el IDH (Bridge, Adhikar, & Fontenla, 2016).

(Yumashev, Ślusarczyk, Kondrashev, & Mikhaylov, 2020) utilizó un modelo de regresión de tres etapas (3SLS) e incluyó variables como el índice de desarrollo humano, el consumo real de energía per cápita, el consumo de energía renovable, el capital humano y el consumo de energía, para varios países. Los resultados sugieren un impacto positivo de la CE en el IDH, y los autores señalaron la importancia de la optimización energética a nivel de país para las estrategias de desarrollo sostenible. (Soukiazis, Proença, & Cerqueiraa, 2019) analizó el impacto del consumo de energías renovables en el Índice de Desarrollo Humano (IDH) además de otras variables que se han utilizado en el análisis como las emisiones de CO<sub>2</sub>, nivel de gastos e ingresos, y capital humano y físico. El análisis se ha realizado mediante el desarrollo de un enfoque de sistemas de ecuaciones simultáneas para un panel de 28 países de la OECD durante el período (2004-2015). Al centrarse más en el impacto de la energía renovable en el IDH, los resultados mostraron que el consumo de energía renovable junto con el capital humano y físico se consideran factores importantes para explicar el nivel de desarrollo sostenible de los países considerados. Los resultados destacaron que la participación de las energías renovables afectó positivamente el nivel de desarrollo con una alta significancia estadística.

### **2.2.2. Análisis vía modelos econométricos.**

En un análisis del papel del consumo de las energías renovables con respecto al desarrollo humano, (Pirlogea, 2012) examinó la relación entre el índice de desarrollo humano (IDH) como variable dependiente y el consumo de energías renovables, combustibles fósiles consumo energético, intensidad de emisiones de CO<sub>2</sub> e intensidad energética como variables independientes para el periodo (1997-2008). Los países seleccionados fueron seis estados europeos, con valores de IDH altos (Bulgaria, Rumania) y muy altos (Portugal, Polonia, Irlanda y Países Bajos) en 2010. Los resultados mostraron que el consumo de combustibles fósiles tiene una relación

negativa con el IDH para Rumania y Bulgaria y positivo para países con IDH muy alto. En cuanto al consumo de renovables, sin excepción, este influye positivamente en el desarrollo humano refiriéndose al importante papel que juegan las energías renovables para estos países. Además, las variables de intensidad energética contribuyeron negativamente al IDH, donde menor nivel de intensidad energética implica un mejor desarrollo humano.

(Niu, y otros, 2013) evaluaron la relación de causalidad entre el consumo de energía (CE) y el IDH en 50 países entre 1990 y 2009. Con este fin, los autores utilizaron la prueba de causalidad de Granger de panel y datos de cinco indicadores de desarrollo humano (es decir, PIB per cápita, esperanza de vida al nacer (EsV), tasa de alfabetización de adultos (AL), gastos de consumo y tasa de urbanización). Los resultados muestran una clasificación de los países en cuatro grupos según su ingreso (es decir, ingreso bajo, ingreso medio bajo, ingreso medio alto, ingreso alto). Los resultados no muestran evidencia de una relación causal entre las variables en el corto plazo mientras que en el largo plazo evidencian una relación bidireccional. Las conclusiones muestran que el CE promueve el desarrollo humano mientras que el desarrollo humano aumenta la demanda social de electricidad. Por lo tanto, mejorar el IDH requiere períodos de largo plazo y un mayor acceso a la electricidad para los ciudadanos de bajos ingresos.

Un estudio diferente que evaluó 15 países en desarrollo entre 1988 y 2008 (Ouedraogo, 2013) utilizó los modelos de cointegración de panel y corrección de errores para evaluar la relación de causalidad entre el consumo de energía y CEpc con el IDH. Los resultados muestran una relación de cointegración negativa entre el consumo de energía y el IDH a largo plazo. Al igual que en otros estudios, no existe causalidad entre el consumo energético o el CE con el IDH a corto plazo. Adicionalmente, existe una relación de cointegración positiva entre CEpc e IDH. Las conclusiones señalan que aumentar el consumo de energía per cápita en un 1% reduce el IDH en un 0,8% mientras que aumentar el CEpc en un 1% aumenta el IDH en un 0.22%. El estudio realizado por (Hiranmoy, Rajaiah, & Anshunan, 2015) emplean técnicas de cointegración de datos panel para investigar la relación a largo plazo entre el IDH y el consumo de energía para un grupo de 60 países durante el período 1985-2011. Sus resultados confirman la existencia de una relación a largo plazo entre las dos variables y que el consumo de energía tiene un impacto significativamente positivo en el IDH.

(Rej & Nag, 2019) utilizaron las pruebas de cointegración y el modelo de corrección de errores vectoriales para evaluar la relación causal entre el consumo de energía per cápita y con el IDH entre 1990 y 2016 en India. Si bien los resultados confirman la causalidad del IDH en el consumo de energía a largo plazo, no hay evidencia de

causalidad inversa. Estos resultados implican que mejorar la calidad de vida (p. ej., brindar más acceso a la educación y las instalaciones de salud o aumentar los ingresos) aumentará el consumo de energía per cápita, mientras que aumentar la disponibilidad de energía no mejorará automáticamente el desarrollo humano.

En un estudio reciente, (Wang, Danish, Zhang, & Wang, 2018) exploró la relación entre el consumo de energía renovable, el crecimiento económico y el índice de desarrollo humano en Pakistán durante el período (1990-2014). Los resultados empíricos, de acuerdo con las pruebas de causalidad de Granger de VECM, sugirieron la presencia de una relación causal de Granger unidireccional de largo y corto plazo que va desde la energía renovable y el IDH hasta las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con respecto a la causalidad a corto plazo, y con respecto al IDH, los resultados respaldaron que el consumo de energía renovable no mejoró la situación del proceso de desarrollo humano en Pakistán y que, a la larga, por el contrario, el desarrollo humano conduce a la contaminación ambiental. (Wang, y otros, 2020) evaluaron la relación entre el crecimiento económico y el consumo de energía con la esperanza de vida y el nivel de desarrollo financiero en Pakistán entre 1972 y 2017. Para ello, los autores utilizaron el modelo autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL) y el Modelo de Vectorial de Corrección de Errores (VECM) para probar la causalidad entre las variables. Los resultados muestran una interacción causal negativa entre el consumo de energía y la esperanza de vida. Las conclusiones señalan que el consumo de energía reduce la esperanza de vida debido al uso masivo de fuentes de energía no renovables que impulsa la degradación ambiental y los problemas de salud del país.

Un estudio centrado en qué recurso energético es mejor en los países del G-7 para mejorar el IDH fue realizado por (Hashemizadeh, Bui, & Zaidi, 2022) utilizando el enfoque de panel de cointegración con pruebas “bootstrap” de multiplicadores de Lagrange. Los resultados mostraron que el IDH tiene vínculos positivos con el uso de fuentes de energía renovables y no renovables, aunque el impacto pronosticado de la mejora de las renovables sobre el IDH fue más significativo.

El estudio de (Banday & Kocoglu, 2022) estudió una relación causal entre el IDH, el consumo de energía y electricidad y las emisiones de carbono con datos de varios países de 1990 a 2014, usando el enfoque de datos panel con regresión de cuantiles. Los resultados sugirieron una relación bilateral negativa entre el IDH y las emisiones de CO<sub>2</sub>, indicando que el desarrollo económico puede tener un papel clave en la degradación ambiental. Además, existe correlación positiva entre el consumo de energía con el IDH, mientras que las emisiones de carbono tienen un impacto negativo.

El estudio de (Pervaiz, Faisal, Rahman, Chander, & Ali, 2021) se centra en establecer el nexo entre los gastos de salud, el PIB, el IDH, las emisiones de CO<sub>2</sub>, las energías renovables, el desarrollo financiero y el consumo de energía utilizando datos de Brasil, India, China y Sudáfrica desde 2000 hasta 2014. El estudio aplica la prueba de raíz unitaria y la técnica de cointegración de panel. Dado que se establece la causalidad positiva bidireccional entre el IDH y el consumo de energía de fuentes renovables, el estudio reivindica políticas adecuadas para mejorar el IDH y reducir el gasto sanitario mediante la adopción de fuentes de energía renovables que faciliten la reducción de las emisiones de carbono.

En el estudio de (Amer, 2020), aplicando un enfoque econométrico a datos de 102 países seleccionados (1990-2015), se identifica un impacto insignificante del consumo de energía renovable en el IDH entre los países seleccionados, excepto los países de ingresos medios bajos. Este controvertido resultado se justifica argumentando que este grupo de países está tratando de seguir el camino de los países de ingresos altos y medios al mismo tiempo que está tratando de aumentar sus usos renovables, que son muy costosos en su primera etapa reduciendo la disponibilidad de fondos para temas sociales.

(Sanchez-Loor & Zambrano-Monserrate, 2015) evaluaron la causalidad entre el consumo de energía total, el PIB, la inversión extranjera directa (IED) y el IDH en Colombia, Ecuador y México entre 1980 y 2012 utilizando los datos disponibles del banco mundial. Los resultados muestran una causalidad unidireccional de largo plazo del consumo de energía al PIB en Ecuador. En contraste, los resultados muestran una causalidad unidireccional de largo plazo del consumo de energía a la IED en México. De manera similar, los resultados muestran una causalidad unidireccional de largo plazo del IDH a la CE en Colombia.

La literatura existente ha establecido una relación positiva entre el CE y el crecimiento económico medido por el PIB per cápita, que también se utiliza como indicador para medir la calidad de vida. Se cree en la literatura, que la calidad de vida y el consumo de energía son positivamente relacionados y cuanto más alto es el nivel de vida en un país en particular, mayor es su consumo de energía. Esta relación ha sido ampliamente estudiada para los países desarrollados (Bowden & Payne, 2009) (Narayan & Smyth, 2008) y ha sido objeto de investigaciones recientes para los países menos desarrollados (Apergis & Payne, 2009) (Yuan, Kang, Zhao, & Hu, 2008) (Lee & Chang, 2007).

Sin embargo, se ha prestado muy poca atención en la literatura a los indicadores de desarrollo que no sean PIB, empleo o capital, particularmente al IDH. Esto puede explicarse en parte por las dificultades en términos de disponibilidad de datos.

Otros autores como (Martínez & Ebenhack, 2008) (Dias, Mattos, & Balestieri, 2006) (Pasternak, 2000) proporcionan una descripción de los indicadores de desarrollo humano y nos modelan la relación entre el desarrollo humano y el consumo de energía. (Martínez & Ebenhack, 2008) estudiaron la correlación entre el IDH y el ingreso per cápita y el consumo de energía para 120 naciones. Encontraron una fuerte relación entre los valores del índice y el consumo de energía para la mayoría del mundo. También identificaron tres tendencias importantes que surgieron de los datos: un fuerte aumento en el desarrollo humano en relación con el consumo de energía para las naciones pobres en energía; un aumento moderado para las naciones en transición; y esencialmente ningún aumento en el desarrollo humano para las naciones desarrolladas que consumen grandes cantidades de energía moderna. Por lo tanto, las mejoras en el consumo de energía pueden conducir potencialmente a grandes avances en el desarrollo humano para las naciones más pobres del mundo.

(Dias, Mattos, & Balestieri, 2006) han proporcionado una discusión general de la relación entre el IDH y el consumo de energía con base en los datos registrados en el año 1999. Calcularon el potencial de reducción del consumo de energía para los países desarrollados sin pérdidas significativas en la calidad de vida para ayudar a reducir el agotamiento de los recursos naturales. (Pasternak, 2000) estudió la relación entre el IDH y el consumo de energía y electricidad utilizando datos de 1997. Encontró que el IDH y el consumo de energía per cápita están altamente correlacionados e identificó un umbral de electricidad para un IDH máximo. Este umbral se utilizó para estimar los niveles futuros de consumo global de electricidad asociados con criterios altos de desarrollo humano hasta 2020.

Mientras tanto, las teorías tradicionales de crecimiento económico como la teoría de Solow-Swan propuesta por (Solow R. M., 1956) (Solow R. M., 1957) y (Swan, 1956), y más desarrollado por (Meade, 1961), sugieren que el progreso económico está determinado principalmente por la inversión de capital y el trabajo. El modelo de Solow, en su forma original, depende solo de dos variables independientes, o "factores de producción", que son, la oferta laboral total y el stock de capital total. Se supone que la mano de obra y los servicios de capital son proporcionales a sus existencias correspondientes.

Sin embargo, después de haber revisado extensamente la literatura publicada sobre estudios de desarrollo económico (Easterly & Levine, 2001), argumentan - como lo hizo Solow - que "algo más" explica la mayoría de las diferencias observables entre las experiencias de crecimiento en diferentes países. Adoptan la convención

estándar de referirse a este “algo más” como Productividad total de los factores o PTF. Por lo tanto, los resultados empíricos no son concluyentes.

Además, como señalaron (Li & Ayres, 2008), la teoría estándar del desarrollo económico hasta ahora también comparte una característica significativa e incluso extraña: no considera los recursos naturales consumo y uso para tener algún impacto en el proceso de crecimiento. Por supuesto, parece deducirse que la disponibilidad —o no disponibilidad— de fuentes de energía y combustibles cada vez más baratos tendrá inevitablemente un impacto crucial en el desarrollo económico futuro. Simplemente no es plausible que el consumo de recursos esté determinado únicamente por el crecimiento y no viceversa, o que el crecimiento del PIB continúe indefinidamente a una tasa constante. Por otro lado, es claro que el desarrollo humano no implica automáticamente crecimiento económico porque el desempeño de los países en términos de crecimiento del PIB puede ser muy diferente de los indicadores básicos de desarrollo (Noorbakhsh, 1998) (Costantini & Monni, 2005).

Sin duda, el vínculo entre desarrollo humano y la energía requieren un desarrollo sostenible que necesita fomentar y mejorar la calidad de vida y el bienestar humano integrando el crecimiento económico, el progreso humano y la protección del medio ambiente.

### **2.2.3. Nexo entre las energías renovables y el desarrollo.**

Por el lado de las energías renovables, especialmente en el siglo XXI, se llevan a cabo varios estudios para examinar si el uso de energía conduce a un crecimiento económico o si el nivel de consumo de energía está determinado por el nivel de producción. La introducción de las energías renovables y la energía nuclear en la agenda de esta relación causal es bastante nueva con el estudio de (Apergis N. , Payne, Menyah, & Wolde-Rufael, 2010). El estudio en consideración concluye que las emisiones de gases de efecto invernadero afectan positivamente el consumo de energía nuclear y reflejan una causalidad bidireccional con el crecimiento económico. Siguiendo este estudio (Apergis & Payne, 2010a) (Apergis & Payne, 2010b) (Apergis & Payne, 2011a) (Apergis & Payne, 2011b) se concentran principalmente en el consumo de energías renovables mientras que (Apergis & Payne, 2010c), (Wolde-Rufael & Menyah, 2010), (Lee & Chiu, 2011a), (Lee & Chiu, 2011b), (Payne & Taylor, 2010), (Heo, Yoo, & Kwak, 2011) principalmente interesados en el consumo de energía nuclear. El examen de la literatura sobre el consumo de energías renovables y el crecimiento económico muestra que el análisis previo depende principalmente de datos de panel, donde en la mayoría de los estudios se escoge un grupo de países para analizar la dirección de relación y

causalidad entre el crecimiento económico y la energía renovable. En la literatura no solo se analiza la relación entre el PIB real y el consumo de energía renovable, sino también entre la fuerza laboral y el *stock* de capital.

Autores como (Apergis & Payne, 2010a), (Apergis & Payne, 2010b), (Apergis & Payne, 2011a), han examinado la relación entre la energía renovable y el crecimiento económico en países de América Latina, Asia Menor y OCDE, respectivamente, sobre la base del análisis de datos panel multivariado. Los resultados obtenidos de las pruebas de causalidad de Granger en países de América Latina han demostrado la existencia de una causalidad colateral entre el crecimiento económico y el consumo de energías renovables. Los resultados también se mantienen de la misma manera para los países de Asia y OCDE.

También aplicaron (Apergis & Payne, 2011b) análisis de datos panel para investigar la relación entre el crecimiento económico y el consumo de electricidad seccionado por fuentes renovables y no renovables en economías en desarrollo.

El análisis de (Menegaki, 2011), quien analizó a 27 países de europeos para el periodo de 1997-2007 no terminó con la existencia de una causalidad Granger a corto o largo plazo del consumo de energía renovable al crecimiento económico. En consecuencia, (Menegaki, 2011) concluye que el consumo de energía renovable juega un papel menor en la determinación del PIB en estos países.

(Bayraktutan, Yilgör, & Uçak, 2011), condujo un estudio que analizó la relación entre la generación de electricidad por fuentes de energía renovable y el crecimiento económico en países de la OECD para el periodo 1980-2007 usando el método de datos panel. Con base en sus hallazgos, existe una relación de largo plazo positiva entre la generación de energía renovable y el crecimiento económico, así como una relación de causalidad bidireccional entre estas variables. Los autores concluyen que invertir en la generación de electricidad por fuentes de energía renovable muy probablemente impulse el crecimiento económico en países de la OECD.

(Yildirim, Sarac, & Aslan, 2012), aplico el procedimiento Toda-Yamamoto y la causalidad bootstrap corregida para examinar la relación causal entre el consumo de energía renovable y el crecimiento económico en Estados Unidos. De conformidad con los resultados, la única relación causal que se encontró va del consumo de energía derivada de residuos de biomasa al PIB. El estudio concluye que los países deben concentrarse en la producción de energía a partir de desechos como recurso energético alternativo.

(Tugcu, Ozturk, & Aslan, 2012) analiza la relación entre crecimiento económico y el consumo de fuentes renovables y no renovables para los países del G7 usando el enfoque Autorregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL). Si bien se obtuvo una relación bidireccional entre las energías renovables y no renovables y el crecimiento económico de cada país, según la función de producción clásica, se han obtenido conclusiones diferentes para cada país. Además, (Ozturk & Acaravci, 2010a) (Ozturk & Acaravci, 2010b) (Ozturk & Acaravci, 2011) aplican el enfoque ARDL a cuatro países de Europa oriental y sudoriental, países de Oriente Medio y África del Norte y Turquía. Los autores encuentran evidencia significativa para apoyar la hipótesis de neutralidad que trata el consumo de energía como una parte insignificante de la producción económica y no asume causalidad entre las variables.

Si bien son pocos los estudios que analizan el papel de la energía renovable en el desarrollo son aún mucho más escasos los que utilizan a la electricidad y la analizan por el lado de la producción y su impacto al desarrollo humano. Tal es el caso de (Kazar & Kazar, 2014) quienes toman el índice de desarrollo humano para el nivel de desarrollo, buscan la relación entre los valores de generación neta de electricidad renovable y el desarrollo con análisis de datos de panel desde 1980-2015 para analizar los efectos a largo plazo y datos anuales de 2005-2010 para efectos a corto plazo para 154 países. Se encuentra, que relación causal entre el desarrollo económico y la producción de energía renovable varía tanto en el largo plazo como a corto plazo debido al nivel de desarrollo humano de los países. Específicamente, para los países con desarrollo humano muy alto y bajo, no existe causalidad entre estas variables en el corto plazo. En el largo plazo, existe causalidad bidireccional entre estas variables para los países con desarrollo humano medio mientras que en el corto plazo existe evidencia de causalidad unidireccional de la producción de electricidad renovable al crecimiento económico.

### 2.3. Hipótesis sobre el nexo crecimiento y energía

La contribución del consumo de la energía en el ámbito económico ha sido una preocupación constante para los economistas, existiendo abundante literatura sobre los efectos del consumo de energía en el desarrollo humano.

La literatura sobre el vínculo causal entre las variables de tipo de energía (consumo de energía, consumo de electricidad, consumo nuclear y consumo de energías renovables) y el crecimiento económico podría sintetizarse en cuatro hipótesis comprobables: hipótesis de retroalimentación, crecimiento, conservación e hipótesis de neutralidad (Chen, Kuo, & Chen, 2007) (Squalli, 2007) (Apergis & Payne, 2009) (Ozturk I. , 2010).

Como resultado, los investigadores han establecido la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico y las implicaciones políticas correspondientes en una serie de hipótesis comprobables. Las direcciones en las que la relación causal entre el consumo de energía y el crecimiento económico podrían clasificarse en cuatro tipos (Payne J. E., 2010) (Ozturk I. , 2010) (Payne J. E., A survey of the electricity consumption-growth literature, 2010) , cada uno de los cuales tiene implicaciones importantes para la política energética: hipótesis de crecimiento, hipótesis de conservación, hipótesis de neutralidad e hipótesis de retroalimentación.

Primero, la **hipótesis de crecimiento** afirma que el consumo de energía juega un papel importante en el crecimiento económico, tanto directamente como como complemento del trabajo y el capital en el proceso de producción. En el contexto de la causalidad de Granger, la hipótesis del “crecimiento” se sustenta si un aumento en el consumo de energía provoca un aumento real en el producto interno bruto. Las implicaciones de política pública bajo esta hipótesis sugieren que las políticas conservacionistas de energía pueden tener un impacto perjudicial en el crecimiento económico. Alternativamente, si un aumento en el consumo de energía tiene un impacto negativo en el PIB real, surgen varias interpretaciones. Por ejemplo, la situación puede ser una en la que una economía en crecimiento requiere una cantidad decreciente de consumo de energía a medida que la producción se desplaza hacia sectores de servicios que consumen menos energía. Alternativamente, el impacto negativo del consumo de energía sobre el PIB real puede atribuirse a un consumo excesivo de energía en sectores improductivos de la economía, limitaciones de capacidad o un suministro de energía ineficiente (Squalli, 2007).

Segundo, la **hipótesis de conservación** implica que las políticas conservacionistas de energía como la reducción de gases de efecto invernadero, las medidas de mejora de la eficiencia y las políticas de gestión de la demanda, diseñadas para reducir el consumo y el desperdicio de energía, pueden no afectar negativamente al PIB real. La hipótesis de “conservación” se sustenta si ante un aumento en el PIB real causa en el sentido de Granger un incremento en el consumo de energía. Sin embargo, es posible que una economía en crecimiento limitada por la política, la infraestructura o la mala gestión de los recursos pueda generar ineficiencias y la reducción de la demanda de bienes y servicios, incluido el consumo de energía. Si tal es el caso, un aumento en el PIB real puede tener un impacto negativo en el consumo de energía.

En tercer lugar, la **hipótesis de neutralidad** se deriva del hecho de que el consumo de energía, y la electricidad en particular, no debería afectar el crecimiento

económico porque representa una proporción demasiado pequeña del producto interno bruto de un país (Yu & Choi, 1985). En este caso, las políticas de conservación de energía (como en el caso de la hipótesis de “conservación”) pueden no tener un impacto adverso en el PIB real. La ausencia de causalidad de Granger entre el consumo de energía y el PIB real respalda la hipótesis de la “neutralidad”.

Finalmente, la **hipótesis de retroalimentación** sugiere que la existencia de una interdependencia y complementariedad entre estas dos variables (Lee C. , 2005). En este caso, los aumentos (disminuciones) en el consumo de energía dan como resultado aumentos (disminuciones) en el PIB real y, del mismo modo, los aumentos (disminuciones) en el PIB real dan como resultado aumentos (disminuciones) en el consumo de energía. En este caso, está respaldada por una relación causal bidireccional en sentido de Granger entre el consumo de energía y el PIB real. Por lo tanto, una política energética orientada a la mejora de la eficiencia del consumo de energía no puede afectar negativamente al PIB real. Esto es cierto cuando existe una causalidad positiva entre estas variables.

Sin embargo, cuando existe una relación de causalidad negativa entre el consumo de energía y el crecimiento económico, la interpretación de la dependencia energética abre la posibilidad a muchas otras interpretaciones, como ocurre cuando la energía se relaciona negativamente con la producción, lo que implica que un aumento en el consumo de energía pueda afectar negativamente el crecimiento económico. Cuando la causalidad va negativamente del PIB a la energía, entonces un aumento en los niveles de ingresos conduce a una reducción en el consumo de energía que puede explicarse por algún tipo de restricciones de infraestructura, políticas inadecuadas (distribución de ingresos, pobreza y reducción de la demanda de bienes y servicios que incluye energía, etc.), así como otros obstáculos que conducen a una reducción en el consumo de energía. Una política energética, enfocada en promover el consumo eficiente de electricidad no afectaría el desempeño económico.

Aunque las teorías económicas no establecen explícitamente una relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico, su investigación empírica ha sido una de las áreas más atractivas de la literatura sobre economía de la energía. La relación causal entre el consumo de energía y el crecimiento económico ha sido el foco principal de los economistas y analistas de política pública desde la década de 1970 (Kraft & Kraft, 1978), (Beenstock & Willcocks, 1981), (Samouilidis & Mitropoulos, 1984), (Yu & Choi, 1985), (Erol & Yu, 1987), (Cheng & Lai, 1997), (Yang, 2000), (Stern D. , 2000), (Adjaye, 2000), entre otros.

A diferencia de los numerosos estudios que fueron realizados en la época, pocos estudios de este tipo contemplaron a países de América Latina. Benjamin Cheng, presume fue uno de los primeros científicos en realizar dicho análisis (Cheng B. , 1997) contemplando a países latinoamericanos en su artículo titulado “*Energy consumption and economic growth in Brazil, Mexico and Venezuela: a time series analysis*”. No obstante, hace hincapié a que la aceptación de cualquier hipótesis depende del contexto económico e institucional de cada país (Cheng B. , 1997).

Existe una ligera distinción entre los artículos que enfatizan los aspectos de los shocks en la economía y aquellos que se refieren a los efectos impredecibles de las políticas gubernamentales. Según (Adams, Klobodu, & Apio, 2018), los veredictos de los gobiernos y los formuladores de políticas son vitales para determinar el desempeño del crecimiento energético.

#### 2.4. Revisión literaria para la economía mexicana

Hasta el momento, solo nueve estudios (ver **Tabla 2.4.1.**) publicados se enfocan en temas relacionados con el nexo energía-crecimiento-contaminación como análisis específicos para México, ninguno de los cuales involucra en su análisis la producción de electricidad seccionada por fuentes renovables y no renovables y su relación con el índice del desarrollo humano como medida de bienestar.

Uno de los primeros trabajos explora el caso mexicano utilizando la prueba de causalidad de Granger y un modelo de vectores autorregresivos (VAR) con datos de 1970 a 1990 y se encuentra evidencia de una dirección causal que va desde el crecimiento económico medido por el Producto Interno Bruto (PIB) hasta el consumo de electricidad (CElec), además mencionan que esta relación depende en gran medida del nivel de desarrollo de cada país (Murray & Nan, 1994). El mismo nexo lo analizan Narayan y Prasad al aplicar una prueba de causalidad de Granger bootstrap, cuyos resultados apoyan la ausencia de una relación causal para el período 1971 a 2002 (Narayan & Prasad, 2008). Por otro lado, (Cheng B. , 1997) genera un modelo trivariado para México integrado por el consumo de energía (CE), capital (K) y crecimiento económico y también concluye que para el periodo 1949 a 1993 no existe causalidad entre el consumo de energía y el crecimiento económico.

Es hasta 2005, que se realiza un análisis multivariado mediante un modelo VAR en forma de modelo de corrección de errores (VECM) en donde se incluyen variables como precios relativos (Px) y empleo (L) y su relación con el PIB y CE en un periodo de análisis de 1965 a 2001 en donde se indica la existencia de causalidad bidireccional entre el PIB y el CE, confirmando la estrecha relación entre estas variables (Galindo & Sánchez, 2005), estos resultados contrastan con la evidencia

presentada en 1988 en donde el autor (Nachane, Nadkarni, & Karnik, 1988) rechaza la existencia de una causalidad, en el sentido de Granger, entre energía y producto en México.

En otro artículo, incorporan en el modelo cambios estructurales para una mejor especificación econométrica junto con las pruebas de Granger y Toda-Yamamoto que dan como resultado una relación causal que va desde el CE hasta el CElec durante el periodo 1971 a 2011 (Gómez & Rodríguez, 2015), ambas series con unidad de medida per cápita.

Un estudio similar con cambios estructurales en CElec y PIB (siendo estas estacionarias en la primera diferencia), fue realizado (German-Soto, 2020) considerando un periodo de tiempo más largo, de 1940 a 1980 en una primera etapa y en una segunda etapa de 1980 a 2018. Aplicando las pruebas de Johansen y Engle-Granger no se encontró suficiente evidencia estadística de que existiera cointegración, lo cual implica no causalidad en ni una dirección entre las series.

Con lo anterior, para robustecer el análisis aplicaron pruebas de causalidad con el enfoque de un modelo VECM, en donde se halló una relación causal que va del consumo de electricidad al PIB y PIB per cápita, posicionando a México como una economía dependiente de la energía. Este hallazgo permite diseñar políticas orientadas a impulsar la inversión en el sector energético, particularmente en generación eléctrica. Sin embargo, esta dirección de causalidad parece haber terminado con la etapa de apertura comercial vivida en los años ochenta. Desde entonces, la fuerza de la asociación disminuyó notablemente y la causalidad se volvió bidireccional.

De los resultados se puede inferir que ahora es el momento en que México necesita adoptar una verdadera política energética, creando, por ejemplo, instrumentos económicos y regulatorios e impuestos a la energía y subsidiando las diversas fuentes de energías renovables. Este estudio (German-Soto, 2020) también ha encontrado que las propiedades estadísticas del consumo de electricidad, el PIB, el PIB per cápita y la relación PIB/Consumo de electricidad son estacionarias, pero solo después de que se haya tenido en cuenta la presencia de ruptura estructural en el modelo. Esto implica que en México el consumo de electricidad ha estimulado el crecimiento económico, pero en una relación cambiante. Se concluye que en México aún predomina la hipótesis de crecimiento, aunque las estimaciones apuntan a que esta relación se está debilitando en la etapa más reciente.

En 2018, se analizaron las variables CE, PIB, importaciones (M) y exportaciones (X) utilizando al K y L como variables de control para el periodo 1971 a 2013. Los

resultados muestran que para el CE y PIB se ajustan a la hipótesis de retroalimentación, es decir, existe interdependencia y complementariedad entre ambas variables (Gómez, Ciarreta, & Zarraga, 2018); en el análisis de cointegración entre las variables se utilizó el *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL), la importancia de dicha prueba es que puede utilizarse independientemente si los regresores son integrados de orden cero,  $I(0)$ , o de orden uno,  $I(1)$ , o cointegrados mutuamente (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). Cabe mencionar que, esta prueba consiste en estimar para cada variable en turno, un modelo de corrección de errores (VECM) además de ser ideal para muestras de tamaño pequeño, 30 a 40 observaciones, la cuales suelen ser muy comunes cuando se estudia un solo país con series de tiempo anuales (Lean & Smyth, 2010).

Posteriormente, se realizaron análisis seccionando el vínculo causal entre los niveles agregados y desagregados<sup>16</sup> del CE en México, donde esta variable es considerada en la función de producción, así como el L y K, quedando como sigue  $PIB = f(EC, K, L)$ , para el periodo 1965 a 2014. Los resultados muestran que existe una relación a largo plazo entre PIB, K, L y CE, y vínculos causales lineales entre el CE total, desagregado y el PIB (Gómez, Ciarreta, & Zarraga, 2018). También, existe una causalidad no lineal desde el CE, el sector del transporte, el capital y la mano de obra hasta la producción. Estos resultados apoyan la hipótesis de crecimiento, que sostiene que la energía es un factor de insumo importante para la actividad económica y que las políticas de conservación de energía impactan el crecimiento económico en México.

Para fines de este análisis, es hasta 2016 cuando se realiza uno de los primeros estudios en donde se analizan los problemas de causalidad a corto y largo plazo entre el comportamiento entre el CE, emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y PIB en México utilizando técnicas de series de tiempo (Lee & Yoo, 2016). Los autores, utilizaron datos anuales que cubren el período 1971-2007 aplicando pruebas de raíz unitaria, cointegración de Johansen y causalidad de Granger basado en un modelo de corrección de errores (VECM). Los resultados obtenidos muestran la existencia de causalidad unidireccional que va de PIB a CE y de emisiones de  $CO_2$  a PIB sin efectos de retroalimentación. Por lo tanto, argumentan que las políticas de conservación de energía pueden iniciarse sin deterioro de la economía. Además, existe una relación causal bidireccional entre  $CO_2$  y CE. Esto significa que un aumento en el CE afecta directamente a las emisiones de  $CO_2$  y las emisiones de  $CO_2$  también estimulan aún más el CE.

---

<sup>16</sup> Se analizó el consumo energético por sector: industrial, transporte, residencial y agricultura.

Una actualización sobre la relación causal entre consumo/producción final de electricidad y el PIB es realizado por (Rosellón & Massa, 2017) cubriendo el periodo de 1965 al 2014 bajo la prueba convencional de Granger, además de aplicar las metodologías de Toda-Yamamoto / Dolado-Lütkepohl para disminuir el riesgo de identificación incorrecta de las condiciones estacionarias y de cointegración. Pruebas de causalidad Zivot-Andrews para robustecer el análisis, así como para analizar el caso de presencia de rupturas estructurales. Se concluye un efecto neutral entre el consumo/producción final de electricidad y PIB para el caso del mercado mexicano. Posteriormente, los mismos autores actualizaron el estudio con datos al 2018 (Massa & Rosellón, Linear and nonlinear Granger causality between electricity production and economic performance in Mexico, 2020), enfocándose especialmente en la producción<sup>17</sup>(generación) de electricidad, siendo los primeros en realizar este análisis por el lado de la producción, así como en proveer implicaciones de política pública a partir de la liberalización del mercado eléctrico (Reforma Energética del año 2014). Sugieren que, a pesar de que el mercado ha ganado relevancia en el sector energético mexicano, su impacto en la economía ha sido limitado. Por tal motivo, las conclusiones siguen apuntando a un efecto neutral entre la producción de electricidad y el PIB.

Estudios como el de (Bakirtas & Akpolat, 2018) han abordado la relación causal entre el consumo de energía, la urbanización y crecimiento económico utilizando datos panel de Dumitrescu-Hurlin, prueba de causalidad de Granger para el período 1971-2014 en economías emergentes (Colombia, India, Indonesia, Kenia, Malasia y México). Hicieron dos análisis uno bivariado y otro trivariado, para el primero los hallazgos mostraron causalidad desde el PIB hasta el CE, y para el caso de México en particular existe causalidad desde urbanización al CE y al PIB. Por otro lado, los autores no encontraron evidencia de que exista una causalidad que vaya del CE al PIB y urbanización, o del PIB hacia la urbanización. Según el análisis trivariado, hay un panel de causalidad de Granger desde el CE y la urbanización hacia el PIB (solo para México), desde el PIB y la urbanización hasta el CE, y desde CE y el PIB hacia la urbanización.

A partir de los resultados anteriores, los autores concluyen que es un hecho que una alta tasa de urbanización se relaciona positivamente con un alto nivel de ingresos. Esto se debe a que, si bien la urbanización proporciona un cambio en la estructura de producción del sector agrícola al terciario y sectores industriales, también revela una tendencia a una estructura productiva orientada a la tecnología. Por tanto, provoca un proceso de aceleración del aumento del consumo energético. En este contexto, los fenómenos de desarrollo y crecimiento económico generan

---

<sup>17</sup> Considera la producción final de energía generada por centrales eléctricas.

tanto la urbanización como una estructura en la que el consumo de energía aumenta como consecuencia de la estructura de consumo y producción que conlleva la urbanización.

Otros estudios se han realizado (Destek & Aslan, 2017) comparando el desempeño económico y el consumo de energías renovables (REN<sup>18</sup>) y no renovables (NREN<sup>19</sup>) en diecisiete<sup>20</sup> economías emergentes, así como en muestras grandes de 174 países (Atems & Hotaling, 2018). Ambos estudios, examinan datos de la economía mexicana del periodo 1980 al 2012, con pruebas de causalidad de panel bootstrap, la cual que permite identificar tanto la dependencia transversal como la heterogeneidad específica de cada país entre países y para el segundo mediante el método generalizado de momentos (MGM).

Para el primer estudio, no se encontró evidencia de una relación causal entre el consumo de REN y el PIB. Por tanto, se confirma la hipótesis de neutralidad, la cual implica que cualquier política sobre el consumo de REN puede ser tomada sin afectar en ni un sentido al PIB. Para el caso del consumo de las NREN, los hallazgos confirman una causalidad unidireccional que va de NREN al PIB, es decir, sustentan la hipótesis de crecimiento la cual implica que, al aplicar políticas ambientales, que limiten el consumo de energía por fuentes no renovable, estas puedan debilitar el crecimiento económico del país.

Por otro lado, para el segundo estudio (Atems & Hotaling, 2018) los resultados apuntan a una relación positiva entre generación de electricidad y PIB, que cobra aún más fuerza cuando se desagrega la generación por fuentes de energía renovable y no renovable. Los resultados destacan el avance que ha tenido la electricidad renovable hecho para convertirse en un actor más importante en la cartera de electricidad de muchos países, sin embargo, también destacan el dominio continuo de generación basada en combustibles fósiles.

En vista de que la producción de electricidad por fuentes fósiles genera impactos significativos en el medio ambiente, es que recientemente ha sido de interés examinar la relación causal dinámica entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el crecimiento económico, la producción de electricidad renovable y no renovable. En 2019 se realizó un estudio (Cheong-Fatt, Suet-Ling, Chee-Keong, & Lin-Sea, 2019) de datos panel para 25 países de la OCDE entre 1990 y 2013. Dicho estudio utiliza 3

---

<sup>18</sup> Cubre la generación de electricidad proveniente de energía solar, eólica, geotermia, biomasa, por desechos, así como de mareas y olas.

<sup>19</sup> Cubre la generación de electricidad proveniente del gas, petróleo y carbón.

<sup>20</sup> Brasil, Chile, China, Colombia, Egipto, Grecia, India, Indonesia, Corea del Sur, Malasia, México, Perú, Filipinas, Portugal, Sur África, Tailandia y Turquía.

enfoques para probar la validez de la Hipótesis de la curva de Kuznets (EKC): Grupo de medias agrupadas (PMG), Panel FMOLS y Panel DOLS. Además, la prueba de causalidad de Dumitrescu-Hurlin (D-H) Granger se utiliza para examinar la dirección de las causalidades entre todas las variables.

Los resultados muestran que la hipótesis de EKC en forma de U invertida es compatible con los países de la OCDE. También se revela que la producción de electricidad renovable tiene un efecto negativo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que el resultado de la producción de electricidad no renovable indica lo contrario. La prueba de causalidad de Granger confirma la existencia de causalidad bidireccional entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la producción de electricidad renovable, así como la producción de electricidad no renovable. Además, se encuentra una causalidad unidireccional que va desde el PIB hasta la producción de electricidad no renovable y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los hallazgos sugieren que la adopción de fuentes de energía renovables en la generación de electricidad puede ser una estrategia importante para combatir el problema del calentamiento global.

En el año 2020 diversos autores realizaron análisis más actualizados. En los cuales investigan la existencia de relaciones causales entre el consumo de energía primaria per cápita (PEC), el dióxido de carbono per cápita (CO<sub>2</sub>) y el producto interno bruto per cápita (PIB) en 79 países agrupados por nivel de ingreso para el período 1980-2014 (Salazar-Núñez, Venegas-Martínez, & Tinoco-Zermeño, 2020). Los países se clasificaron por ingreso per cápita alto (HIC, *por sus siglas en inglés*), medio-alto (UMIC), medio-bajo (LMIC) y bajo (LIC). La metodología utilizada fue mediante datos de panel cointegrados y un mecanismo de corrección de errores (ECM). La estimación del modelo se realiza con mínimos cuadrados ordinarios completamente modificados (FMOLS) y mínimos cuadrados ordinarios (OLS) dinámicos (DOLS). Los hallazgos apuntan que para los grupos HIC y UMIC existe, en general, una relación positiva entre PEC y PIB, y negativa entre PIB y PEC dado que desarrollan nuevas tecnologías para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, para los grupos LMIC y LIC los resultados fueron mixtos. La prueba de causalidad de Granger sugiere que para los grupos HIC, UMIC y LMIC, la variable PIB tiene una relación bidireccional con PEC y CO<sub>2</sub> a corto y largo plazo, una relación causal bidireccional entre PEC y CO<sub>2</sub> a largo plazo, y unidireccional de PEC a CO<sub>2</sub> a corto plazo. Para el grupo LIC, PEC y CO<sub>2</sub> muestran una relación bidireccional, pero unidireccional de PEC a CO<sub>2</sub> en el corto plazo. Asimismo, solo se detectó una relación bidireccional entre CO<sub>2</sub> y PIB a corto plazo para el grupo LIC.

Estudios como el de (Tong, Ortiz, Xu, & Li, 2020) investigan sobre las relaciones de cointegración y causalidad entre el PIB, el consumo de energía y las emisiones de

CO<sub>2</sub> (mejor conocido como relación 3E) mediante un modelo bootstrap Autorregresivo Distribuido Rezagado (ARDL, por sus siglas en inglés) con rupturas estructurales para los países del E7<sup>21</sup>. Los resultados indican la no existencia de cointegración entre el PIB, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> para la República Popular de China, Indonesia, México y Turquía. No obstante, para todos los países del E7, excepto Indonesia, se encontró que existía una causalidad de Granger a corto plazo desde el consumo de energía hasta las emisiones de CO<sub>2</sub>. Para Brasil, India, México y República Popular de China la causalidad va del PIB a las emisiones de CO<sub>2</sub>. También se encontró una causalidad de Granger a corto plazo desde el PIB hasta el consumo de energía y desde las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta el consumo de energía para todos los países del E7. Los autores concluyen que, el consumo de energía es la principal causa de las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que ha provocado la aparición de problemas de calentamiento global. El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> obliga a los países del E7 a desarrollar políticas sólidas sobre el consumo de energía y la contaminación ambiental.

A partir de los resultados anteriores, para México, la prueba de causalidad de Granger apoya la presencia de una relación positiva bidireccional entre el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, y una relación negativa bidireccional entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el PIB. Es decir, se respalda la creencia convencional de que el consumo de energía y el crecimiento económico interactúan estrechamente entre sí y confirman a México y Brasil como economías dependientes de la energía.

Por tal motivo, se requieren políticas de infraestructura energética del lado de la oferta y políticas conservacionistas energéticas para evitar una mayor degradación ambiental (Tong, Ortiz, Xu, & Li, 2020). Lo anterior implicaría, que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirían durante el tiempo en que aumenta el PIB, debido a que se invertiría en tecnología que eficiente el consumo energético. Por lo tanto, se pudiera no tomar ninguna acción significativa para impactar el crecimiento económico con el fin de reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub>. El consumo de energía provocado por el crecimiento económico es consistente al menos para México, ya que este al ser un país en desarrollo, se encuentra en su etapa industrializada. También se respalda la “hipótesis del crecimiento impulsado por la energía” que predice que, en la mayoría de los casos, las políticas de protección energética están destinadas a estimular el crecimiento económico. Esto sugiere que, si el crecimiento económico aumenta el consumo de energía, la externalidad creada por el uso de energía finalmente se revertirá en crecimiento económico.

---

<sup>21</sup> E7 son las economías emergentes con poblaciones de mayor crecimiento: Brasil, India, Indonesia, México, República Popular de China y Turquía.

(Odugbesan & Rjoub, 2020) Examinaron la sinergia entre el crecimiento económico, las emisiones CO<sub>2</sub>, la urbanización y el consumo de energía en los países MINT (México, Indonesia, Nigeria y Turquía). Se emplearon datos anuales de 1993 a 2017 y el análisis se realizó mediante el método de prueba ARDL Bounds. Los hallazgos del estudio revelan que la hipótesis de crecimiento de energía que asumía una causalidad unidireccional del consumo de energía era cierta para Nigeria e Indonesia, mientras que México y Turquía siguieron la hipótesis de retroalimentación, que indica una relación bidireccional. Mientras tanto, todos los países MINT muestran una relación a largo plazo desde el crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta la urbanización. El estudio sugiere que los formuladores de políticas en los países MINT deberían desarrollar una política de conservación de energía que mejore el crecimiento potencial de su economía. Más aún, existe la necesidad de promover industrias verdes. Finalmente, para asegurar la urbanización sostenible en los países MINT, es necesario realizar esfuerzos concertados para asegurar la reducción en el nivel de urbanización, a fin de asegurar la sostenibilidad de la urbanización, pero sin comprometer el crecimiento económico, a través de la formulación de políticas que aseguren la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> para lograr un medio ambiente de calidad.

Posteriormente, (Santillán-Salgado, Valencia-Herrera, & Venegas-Martínez, 2020) realizaron un estudio similar con las mismas variables del estudio anterior, incorporando las siguientes: el uso de electricidad y la desigualdad de ingresos para una muestra de 134 países mediante, causalidad de Granger, modelos de corrección de errores vectoriales y modelos de vectores autorregresivos para datos de panel. El periodo de análisis se conforma de datos anuales de 1990 a 2014. Los países elegidos son aquellos con 10 años o más de datos concurrentes de las variables en estudio. Los principales hallazgos empíricos sugieren una curva de Kuznets entre las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y el PIB per cápita. Además, las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen una relación a largo plazo con el crecimiento económico, el uso de energía, el uso de electricidad, la urbanización y la desigualdad. Finalmente, a corto plazo, las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del crecimiento económico, la urbanización y la desigualdad de ingresos.

Adicionalmente, los mismos autores realizaron el mismo estudio enfocado a países de América Latina (Santillán-Salgado, Valencia-Herrera, & Venegas-Martínez, 2020) durante el período 1990-2014. Se utilizó un enfoque de datos panel VEC (VAR) en donde se muestra que la primera y segunda diferencias de los logaritmos de la proporción de la población urbana con respecto a la población total explican: emisiones de CO<sub>2</sub>, PIB per cápita, consumo de energía, electricidad per cápita y el proceso de urbanización. Además, las emisiones de CO<sub>2</sub> se cointegran con la primera diferencia con el logaritmo de la proporción de la población urbana. Los

resultados empíricos no sugieren evidencia de la existencia de una curva ambiental de Kuznets (EKC, por sus siglas en inglés). Tampoco es posible generalizar la naturaleza de las relaciones de crecimiento económico-consumo de energía-urbanización y emisiones de CO<sub>2</sub> en diferentes latitudes.

La **Tabla 2.4.1.** proporciona una lista cronológica de la literatura sobre la relación causal entre energía, crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, dividido dos apartados: estudios para varios países en donde se incluye a México y el otro específicamente para la economía mexicana. La tabla esta seccionada indicando el país, período de tiempo, metodología, resultados empíricos con las variables incluidas en el análisis, resultado de la hipótesis y si los estudios proporcionan análisis de política pública

Si bien se han desarrollado varios estudios en la literatura especializada para evaluar la causalidad entre el consumo de energía y el IDH. **El uso de series de tiempo relacionadas al nexo de tres vínculos “energía-economía-medio ambiente” para pronosticar el IDH para México es una de las contribuciones principales de este estudio.**

Si la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico ha sido ampliamente explorada en la literatura sobre economía energética durante las últimas décadas (usando diferentes enfoques/métodos, periodos de tiempo y muestras de países), la investigación sobre el nexo **energía-desarrollo humano** es raro, y el enfoque en energía renovable es aún más escaso. Los estudios empíricos existentes generalmente usan indicadores monetarios como el producto interno bruto (PIB) como indicador del crecimiento económico, y se ha prestado muy poca atención a medidas alternativas de desarrollo humano, en particular el Índice de Desarrollo Humano (Amer, 2020) (Sanchez-Loor & Zambrano-Monserrate, 2015). Además, como se mencionó anteriormente, la evidencia empírica sobre esta relación es mixta y no se ha logrado un consenso en la literatura, lo que resalta la necesidad de investigación adicional en el campo. En particular, hasta donde sabemos, los estudios empíricos que exploran las interconexiones entre el consumo de energía renovable y el IDH son prácticamente inexistentes en la literatura, lo que le da un carácter original a la investigación presentada en este trabajo.

**Tabla 2.4.1.**

*Resumen de la literatura y estudios empíricos en México del nexo energía, crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub>.*

No.	Referencia	Periodo de Análisis	Países de estudio	Enfoque econométrico	Hallazgos	Hipótesis para México	Implicaciones Política Pública
<b>Literatura sobre estudios para varios países en donde se incluye a México</b>							
1.	(Murray & Nan, 1994)	1970 a 1990 (20 años)	<b>Tipo I. Países en vías de desarrollo:</b> India, Filipinas, Zambia. <b>Tipo II Países en vías de desarrollo.</b> Colombia, El Salvador, Indonesia, Kenia y México. <b>Tipo III. Nuevos países industrializados.</b> Hong Kong, Pakistán, Singapur, Canadá y Turquía. <b>Tipo IV.</b> Malasia y Corea del Sur. <b>Tipo V. Países industrializados:</b> Francia, Alemania, Israel, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Reino Unido y Estados Unidos.	Causalidad de Granger convencional	Tipo I. PIB <sub>t</sub> ⊗ CElec <b>Tipo II. PIB<sub>t</sub> → CElec</b> Tipo III. CElec → PIB <sub>t</sub> Tipo IV. CElec ↔ PIB <sub>t</sub> Tipo V. PIB <sub>t</sub> ⊗ CElec.	Neutralidad <b>Conservación</b> Crecimiento Retroalimentación Neutralidad	No
2.	(Nachane, Nadkarni, & Karnik, 1988)	1950/1951 a 1984/1985 (35 años)	16 países <b>En vías de desarrollo (11):</b> Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Grecia, Guatemala, India, Israel, Portugal, México y Venezuela. <b>Países industrializados (5):</b> Francia, Italia, Japón, Reino Unido, Alemania.	Cointegración Causalidad Modificada de Sims (MS) y Geweke (GW)	Corto plazo CE <sub>pc</sub> → PIB <sub>pc</sub> (Argentina, Brasil, Alemania, Japón y Reino Unido) Largo plazo CE <sub>pc</sub> → PIB <sub>pc</sub> (India, Israel, Portugal) <b>Corto y largo plazo CE<sub>pc</sub> → PIB<sub>pc</sub></b> (México, Colombia, Francia, Grecia, Guatemala, Venezuela e Italia)	<b>Crecimiento</b>	No
3.	(Cheng B. , 1997)	México 1949 a 1993 (44 años) Venezuela 1952 a 1993 (41 años)	Brasil, México y Venezuela (economías de ingresos medio en América Latina)	Modelo trivariado Cointegración ECM (Venezuela) Causalidad de Granger y Hsiao's (México y Brasil)	CE ⊗ PIB	Neutralidad	No

			Brasil 1963 a 1993 (30 años)				
4.	(Narayan & Prasad, 2008)	1960 a 2002 (42 años) México 1970 a 2002 (32 años)	30 países de la OCDE	VAR Causalidad Bootstrapped	CElec <sub>CIND</sub> → PIB <sub>r</sub> ( <i>Australia, Islandia, Italia, República Checa, República Eslovaca, Corea, Portugal, Reino Unido</i> ) PIB <sub>r</sub> → CElec <sub>CIND</sub> ( <i>Reino Unido, Corea, Finlandia, Hungría, Islandia y Países Bajos</i> ) CElec <sub>CIND</sub> ⊗ PIB <sub>r</sub> ( <i>México, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Japón, Luxemburgo, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Estados Unidos</i> )	Crecimiento Conservación <b>Neutralidad</b>	Si
5.	(Bayraktutan, Yilgör, & Uçak, 2011)	1980 a 2007 (28 años)	30 países de la OCDE	Datos Panel Cointegración Pedroni, Kao y Fisher Causalidad Holtz-Eakin en VAR	GElec <sub>REN</sub> ↔ PIB <sub>r</sub>	Retroalimentación	Si
6.	(Destek & Aslan, 2017)	1980 a 2012 (32 años)	17 economías emergentes: Brasil, Chile, China, Colombia, Egipto, Grecia, India, Indonesia, Corea del Sur, Malasia, México, Perú, Filipinas, Portugal, Sudáfrica, Tailandia, Turquía.	Panel de causalidad Bootstrapped SUR	<b>RENOVABLES</b> CE <sub>RENpc</sub> → PIB <sub>pc</sub> ( <i>Perú</i> ) PIB <sub>pc</sub> → CE <sub>RENpc</sub> ( <i>Colombia y Tailandia</i> ) PIB <sub>pc</sub> ↔ CE <sub>RENpc</sub> ( <i>Grecia y Corea del Sur</i> ) PIB <sub>pc</sub> ⊗ CE <sub>RENpc</sub> ( <i>México, Brasil, Chile, Egipto, India, Indonesia, Malasia, Filipinas, Portugal, Sudáfrica, Tailandia y Turquía</i> ) <b>NO RENOVABLES</b> CE <sub>NRENpc</sub> → PIB <sub>pc</sub> ( <i>México, Filipinas, China, Colombia</i> )	Crecimiento Conservación Retroalimentación <b>Neutralidad</b> <b>Crecimiento</b> Conservación	Si

					$PIB_{pc} \rightarrow CE_{NRENpc}$ (Egipto, Perú, Portugal) $PIB_{pc} \leftrightarrow CE_{NRENpc}$ (Turquía) $PIB_{pc} \otimes CE_{NRENpc}$ (Brasil, Chile, Grecia, Italia, Indonesia, Corea del Sur, Malasia, Sudáfrica, Tailandia)	Retroalimentación Neutralidad	
7.	(Bakirtas & Akpolat, 2018)	1971 a 2014 (43 años)	Seis economías emergentes: Colombia, India, Indonesia, Kenya, Malaysia y México.	Datos Panel Causalidad de Granger y DH	$PIB_{pc}, U \rightarrow CE_{pc}$	Conservación	Si
8.	(Atems & Hotaling, 2018)	1980 a 2012 (32 años)	174 países	Metodo GMM	$(+) GEI_{eC_{REN}}, (+) PIB_{pc}$ $(+) GEI_{eC_{NREN}}, (+) PIB_{pc}$	Relación positiva entre la generación de energía eléctrica por fuentes renovables hacia el PIB	Si
9.	(Cheong-Fatt, Suet-Ling, Chee-Keong, & Lin-Sea, 2019)	1990 a 2013 (23 años)	25 países de la OCDE	EKC Técnicas de FMOLS, DOLS Cointegración Panel ARDL, Pedroni y Kao, PMG. Causalidad Granger y D-H.	EKC sigue una U invertida. $PIB_{pc} \rightarrow PEI_{eC_{REN}}, CO_2$ $PIB_{pc} \leftrightarrow PEI_{eC_{REN}}$ $PEI_{eC_{REN}} \leftrightarrow PEI_{eC_{NREN}}$ $PEI_{eC_{NREN}} \leftrightarrow CO_2$	Conservación Retroalimentación	No
10.	(Salazar-Núñez, Venegas-Martínez, & Tinoco-Zermeño, 2020)	1980 a 2014 (34 años)	79 países agrupadas por nivel de ingreso: Alto, Medio Alto, Medio Bajo y Bajo.	Cointegración Técnicas de FMOLS, DOLS. Datos Panel ECM Causalidad Engle-Granger	<b>Ingresos Alto y Medio Alto:</b> $PIB_{pc} \leftrightarrow CE_{pc}, CO_2$ (largo plazo) $CE_{pc} \rightarrow CO_2$ (corto plazo) <b>Ingresos Medio Bajo:</b> $CE_{pc} \leftrightarrow CO_2$ (largo plazo) $CE_{pc} \rightarrow CO_2$ (corto plazo) <b>Ingresos Bajos:</b> $CE_{pc} \leftrightarrow CO_2$ (largo plazo) $CE_{pc} \rightarrow CO_2 ; PIB_{pc} \leftrightarrow CO_2$ (corto plazo)	Retroalimentación	No
11.	(Tong, Ortiz Xu, & Li, 2020)	1992 a 2014 (22 años Rusia) 1971 a 2014 (43 años)	Siete países: Brasil, India, Indonesia, China, México, Turquía.	Monte Carlo ARDL Bootstrap	Corto plazo: $PIB_{pc} \rightarrow CE_{pc}$ (Brasil, México, India, Turquía) Largo plazo: $CE_{pc}, CO_2 \otimes PIB_{pc}$	Conservación	Si

					$CE_{pc} \leftrightarrow CO_2$ (Brasil, India, China, México, Turquía) $(-)\text{PIB}_{pc} \leftrightarrow CO_2$ (México y Brasil)														
12.	(Santillán-Salgado, Valencia-Herrera, & Venegas-Martínez, 2020)	1990 a 2014 (24 años)	134 países	Causalidad de Granger VECM Panel (VAR)	$PIB_{pc}, CE_{pc}, CElec_{pc} \rightarrow CO_{2pc}$ $CElec_{pc} \leftrightarrow CE_{pc}$ $U \rightarrow CE_{pc}, \text{Gini}$	Conservación	Si												
13.	(Odugbesan & Rjoub, 2020)	1993 a 2017 (24 años)	Economías MINT: México, Indonesia, Nigeria y Turquía.	Cointegración ARDL-OLS Causalidad ECM	$PIB_{pc} \leftrightarrow CE$ (México Turquía, corto y largo plazo) $CE \rightarrow PIB_{pc}$ (Nigeria e Indonesia) Resultados para México:	Retroalimentación	Si												
					<table border="1"> <thead> <tr> <th>Corto plazo</th> <th>Largo Plazo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>U \rightarrow PIB</math></td> <td><math>U \rightarrow PIB</math></td> </tr> <tr> <td><math>\otimes</math></td> <td><math>U \rightarrow CE</math></td> </tr> <tr> <td><math>CE \rightarrow PIB</math></td> <td><math>CE \leftrightarrow PIB</math></td> </tr> <tr> <td><math>PIB \leftrightarrow CO_2</math></td> <td><math>CO_2 \rightarrow PIB</math></td> </tr> <tr> <td><math>CE \rightarrow CO_2</math></td> <td><math>CO_2 \rightarrow CE</math></td> </tr> </tbody> </table>	Corto plazo	Largo Plazo	$U \rightarrow PIB$	$U \rightarrow PIB$	$\otimes$	$U \rightarrow CE$	$CE \rightarrow PIB$	$CE \leftrightarrow PIB$	$PIB \leftrightarrow CO_2$	$CO_2 \rightarrow PIB$	$CE \rightarrow CO_2$	$CO_2 \rightarrow CE$		
Corto plazo	Largo Plazo																		
$U \rightarrow PIB$	$U \rightarrow PIB$																		
$\otimes$	$U \rightarrow CE$																		
$CE \rightarrow PIB$	$CE \leftrightarrow PIB$																		
$PIB \leftrightarrow CO_2$	$CO_2 \rightarrow PIB$																		
$CE \rightarrow CO_2$	$CO_2 \rightarrow CE$																		
14.	(Santillán-Salgado, Valencia-Herrera, & Venegas-Martínez, 2020)	1990 a 2014 (24 años)	Países de América Latina: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela.	Panel VAR-VECM EKC Cointegración Johansen	Existe curva de Kuznets entre PIB y $CO_2$ . Largo plazo: las emisiones tienen relación de largo plazo con el $PIB_{pc}, CE_{pc}, CElec_{pc}, U_{pc}$ y Gini. Corto plazo: $CO_2$ dependen del $PIB_{pc}, U_{pc}$ y Gini.		Si												
15.	(Amer, 2020)	1990 a 2015 (26 años)	101 países agrupadas por nivel de ingreso: Alto, Medio Alto, Medio Bajo y Bajo. Entre ellos México.	Cointegración y Causalidad mediante un modelo Panel VAR estimado por GMM	<b>Ingresos Alto:</b> $FD$ y $CO_2 \rightarrow IDH$ <b>Ingresos Medio</b> <b>Alto (México):</b> $IDH, XM \rightarrow IDH$ <b>Ingresos Medio Bajo:</b> $IDH, (-) CE_{RENpc} \rightarrow IDH$ <b>Ingresos Bajos:</b>	Neutralidad <b>Medio</b> <b>Neutralidad</b> Crecimiento Crecimiento	Si												

16.	(Sanchez-Loor & Zambrano-Monserrate, 2015)	1980 a 2012 (33 años)	Colombia, Ecuador y México.	Cointegración y Causalidad mediante VECM (Colombia Ecuador) y un modelo VAR (México).	IDH, XM, IE → IDH <b>Resultados para Colombia:</b> IDH → CE PIB → IED <b>Resultados para Ecuador:</b> CE, R → PIB <b>Resultados para México:</b> CE → IED IDH, IED → R	México: el CE atrae la IED las políticas deben incentivar proyectos de energía limpias.	No.
-----	--	--------------------------	-----------------------------	---	--	---	-----

No.	Referencia	Periodo de Análisis	Países de estudio	Enfoque econométrico	Hallazgos	Hipótesis para México	Implicaciones Política Pública
-----	------------	---------------------	-------------------	----------------------	-----------	-----------------------	--------------------------------

**Literatura sobre estudios específicamente para la economía mexicana**

1.	(Galindo & Sánchez, 2005)	1965 a 2001 (36 años)	México	VAR - VECM Cointegración de Johansen (1988) y Hansen-Johansen (1993) Causalidad de Granger	CE ↔ PIB <sub>r</sub> L ↔ PIB <sub>r</sub> PE <sub>x</sub> → CE	Retroalimentación	Si
2.	(Gómez & Rodríguez, 2015)	1971 a 2011 (40 años)	México	VAR-SUR Causalidad de Granger y TY	PIB <sub>pc</sub> → CE <sub>elec</sub>	Conservación	No
3.	(Gómez & Rodríguez, 2016)	1971 a 2011 (40 años)	México	Cointegración ARDL Causalidad VAR-VECM EKC	<b>Largo Plazo</b> PIB <sub>pc</sub> → CE <sub>pc</sub> CE <sub>pc</sub> , PIB <sub>pc</sub> , PIB <sub>pc</sub> <sup>2</sup> , XM → CO <sub>2</sub> XM ↔ PIB <sub>pc</sub> XM ⊗ CO <sub>2</sub> <b>Corto Plazo</b> PIB <sub>pc</sub> , PIB <sub>pc</sub> <sup>2</sup> → CO <sub>2</sub> PIB <sub>pc</sub> , PIB <sub>pc</sub> <sup>2</sup> , XM → CE <sub>pc</sub>	Conservación Se rechaza EKC Conservación	Si
4.	(Lee & Yoo, 2016)	1971 a 2007 (36 años)	México	Cointegración ECM causalidad de Granger	<b>Corto Plazo</b> PIB ⊗ CE CE ↔ CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> → PIB <b>Largo Plazo</b> PIB → CE PIB ⊗ CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> → CE	Neutralidad Retroalimentación Conservación	Si

5.	(Massa & Rosellón, 2017)	1965 a 2014 (49 años)	México	VAR causalidad de Granger y TY, DL, ZA.	GElec $\otimes$ PIB <sub>pc</sub>	Neutralidad	Si
6.	(Gómez, Ciarreta, & Zarraga, 2018)	1971 a 2013 (42 años)	México	Cointegración ARDL VECM causalidad de Granger y TY	<b>Modelo Exportaciones (X)</b> Largo plazo: K, L, CE y X $\rightarrow$ PIB <sub>r</sub> Corto plazo: X $\rightarrow$ CE, PIB; PIB <sub>r</sub> $\leftrightarrow$ CE, <b>Modelo Importaciones (M)</b> Largo plazo: K, L, CE y M $\otimes$ PIB <sub>r</sub> Corto plazo: CE $\leftrightarrow$ PIB <sub>r</sub> ; CE $\leftrightarrow$ M; M $\leftrightarrow$ PIB	Crecimiento Retroalimentación Neutralidad Retroalimentación	Si
7.	(Gómez, Ciarreta, & Zarraga, 2018)	1965 a 2014 (49 años)	México	Cointegración ARDL VECM causalidad Granger y TY	<b>Consumo de energía total</b> Largo plazo: CE, K, L, $\rightarrow$ PIB <sub>r</sub> Corto plazo: K $\rightarrow$ PIB; PIB $\rightarrow$ K; L $\leftrightarrow$ CE <b>Consumo de energía por sector</b> Largo Plazo: CE <sub>TR</sub> , CE <sub>IND</sub> , CE <sub>RES</sub> , L, K $\rightarrow$ PIB Corto plazo: PIB $\rightarrow$ CE <sub>IND</sub> , CE <sub>RES</sub>	Crecimiento Crecimiento Conservación	Si
8.	(Massa & Rosellón, 2020)	1965 a 2018 (53 años)	México	VAR – ARCH Cointegración Johansen Causalidad de Granger, TY, DL	PIB <sub>pc</sub> $\otimes$ PElec	Neutralidad	Si
9.	(German-Soto, 2020)	1940 a 2018 (78 años)	México	Cointegración Johansen y Engle-Granger Causalidad VECM	<b>Periodo 1940-1980</b> CElec $\rightarrow$ PIB, PIB <sub>pc</sub> <b>Periodo 1980-2018</b> CElec $\leftrightarrow$ PIB, PIB <sub>pc</sub>	Crecimiento Retroalimentación	Si

**Notas.** La notación  $\rightarrow$ ,  $\leftrightarrow$ ,  $\otimes$  representa causalidad unidireccional, causalidad bidireccional y no causalidad, respectivamente. Los sufijos *pc*, *r*, *x*, *REN*, *NREN*, *IND*, *TR*, *RES* significan que las series están expresadas en términos per cápita, términos reales, precios, energía por fuentes renovables, energía por fuentes no renovable, energía proveniente del sector industrial, transporte y residencial, respectivamente. Abreviaciones: OCDE=organización para la cooperación y el desarrollo económicos, ECM=modelo de corrección de error, VAR=vectores autorregresivos, VECM=modelo de vector de corrección de error, SUR=regresiones aparentemente no relacionadas, ARDL=modelo autoregresivo de rezagos distribuidos, TY=Toda-Yamamoto, DL=Dolado-Lutkepohl, DH=Dumitrescu-

---

Hurlin, GMM=sistema generalizado de momentos, EKC=curva medioambiental de kuznets, OLS=mínimos cuadrados ordinarios, FMOLS=mínimos cuadrados completamente modificados, DOLS=mínimos cuadrados dinámicos, ARCH=heterocedasticidad condicional autoregresiva, PIB=producto interno bruto, PIB<sup>2</sup>=producto interno bruto al cuadrado, R=remesas, CE=consumo energía, CElec=consumo electricidad, GElec=generación de electricidad, PElec=producción de electricidad, L=trabajo medido en número de empleados, K=capital, X=exportaciones, M=importaciones, XM=comercio exterior, FD=desarrollo financiero, IED=inversión extranjera directa, IE=intensidad energética, CO<sub>2</sub>=emisiones de dióxido de carbono, U=urbanización, IDH=índice de desarrollo humano, Gini=desigualdad medido por el Índice de Gini.

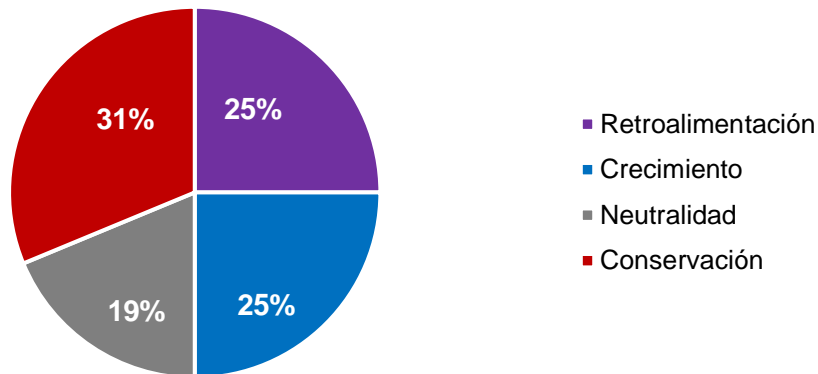
Fuente: elaboración propia con información de la revisión literaria para la economía mexicana.

---

A continuación, en la **Figura 2.4.1.** se observa una representación gráfica de las hipótesis relacionadas con el nexo energía-crecimiento-ambiente de las investigaciones realizadas específicamente para México.

**Figura 2.4.1.**

*Hipótesis del nexo energía-contaminación-desarrollo para México (en %).*



Fuente: elaboración propia con información de la revisión literaria para la economía mexicana.

### Capítulo 3. Contexto general del parque eléctrico en México

Antes de proceder al modelo, es pertinente tener una visión general de cuánta energía consume el país, de dónde proviene y si existe algún progreso en la descarbonización de la matriz energética mexicana. Este capítulo ofrece al lector las métricas clave sobre el tema para México y algunas comparaciones con países latinoamericanos como: Argentina y Brasil. La comparativa entre México y estos países se eligió debido a que las tres economías se posicionan como las más grandes en América Latina, además de que sus niveles educativos y en esperanza de vida son parecidos, y pertenecen a la misma clasificación de ingresos realizada por el Banco Mundial al ubicarse en el rango de ingresos medios altos.

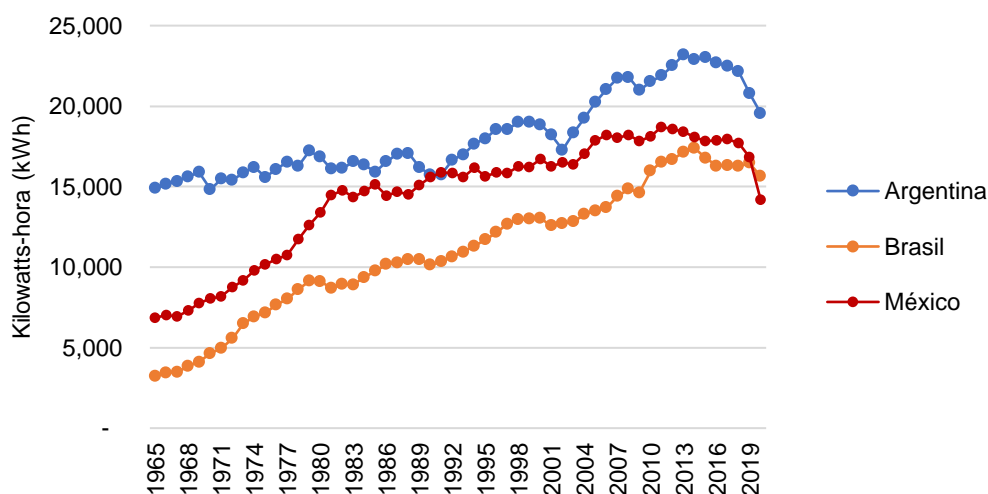
En el dominio de la energía, existen muchas unidades diferentes: julios, exajulios, millones de toneladas de petróleo o de barril equivalentes, unidades térmicas británicas, teravatios-hora, por nombrar algunas. Esto puede ser confuso y dificultar las comparaciones. Por tal motivo, se tratará de mantener la consistencia al convertir todos los datos de energía a vatios-hora (watts-hora) para este capítulo. La información y gráficos por presentarse son construidos con las últimas cifras globales y nacionales citadas al pie de cada figura, generalmente de forma anual.

#### 3.1. Consumo de energía

Al momento de querer comparar el consumo total de energía entre países, a menudo se pueden reflejar diferencias debido al tamaño de la población. Para que los datos sean comparables, es útil observar las diferencias en el consumo de energía *per cápita*. La **Figura 3.1.1.** muestra el consumo promedio de energía por persona cada año. Sin contar el efecto de la pandemia COVID-19, en las últimas décadas el consumo de energía per cápita para México ha venido creciendo a una tasa del 0.19%, cerrando el año 2020 en 14,176 kWh por persona. Argentina y Brasil han venido creciendo a tasas del 0.46% para y 1.19% respectivamente.

Cabe mencionar que, por consumo de energía, entenderemos la suma de todos los usos de energía, incluida la electricidad, el transporte y la calefacción. Frecuentemente, se asume que energía y electricidad significan lo mismo, pero la electricidad es solo un componente del consumo total de energía. Más adelante se verá el consumo de electricidad. Además, los datos presentados se basan en el consumo de energía primaria, dado por el "método de sustitución".

**Figura 3.1.1.**  
Consumo de energía per cápita.



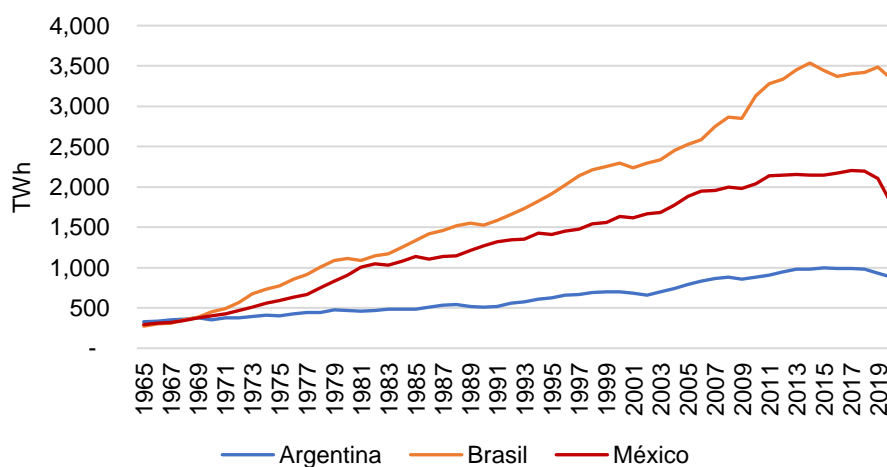
*Notas.* Energía se refiere a la energía primaria: la entrada de energía antes de la transformación en formas de energía para uso final (como electricidad o gasolina para el transporte).

Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022.

Adicionalmente, cuando hablamos de “energía primaria” se refiere a la energía en su forma bruta, antes de que los seres humanos la hayan convertido en otras formas de energía, como electricidad, calor o combustibles para el transporte. Habría que pensar en esto como insumos en un sistema de energía: carbón, petróleo o gas antes de quemarlos; o energía solar o eólica antes de convertirlos en electricidad. Existen dos formas en que se calcula la "energía primaria": el método "directo" y el de "sustitución". La forma más sencilla de pensar en la diferencia entre estos métodos es que la energía primaria "directa" no considera la pérdida de energía en el proceso de conversión de combustibles fósiles a energía utilizable. El método de sustitución intenta corregir esta pérdida.

A medida que la población crece, la economía avanza y se alcanzan mayores niveles de ingresos, esto trae consigo un aumento en la cantidad demandada de energía que se consume año tras año. En la **Figura 3.1.2.** se observa el nivel de consumo de energía total (combinando electricidad, transporte y calor) de cada país por año. En México, después de una caída del 15% en el consumo de energía primaria a causa de la pandemia COVID-19 en 2020, a finales del 2021 el consumo de energía se recuperó en un 5.6% situándose en 1,886 TWh. En comparación de Brasil y Argentina, el país muestra la caída más abrupta y sensible ante choques externos, como el de la pandemia. Al igual que el consumo total de energía, la cantidad de electricidad que consume un país en total se refleja en gran medida en el tamaño de la población, así como en los ingresos promedio de las personas en el país dado.

**Figura 3.1.2.**  
Consumo de energía anual.



*Notas.* Los datos incluyen solo combustibles comercializados (carbón, petróleo, gas), energías renovables nucleares y modernas. No incluye biomasa tradicional.

Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022 y la Agencia Internacional de Energía (AIE).

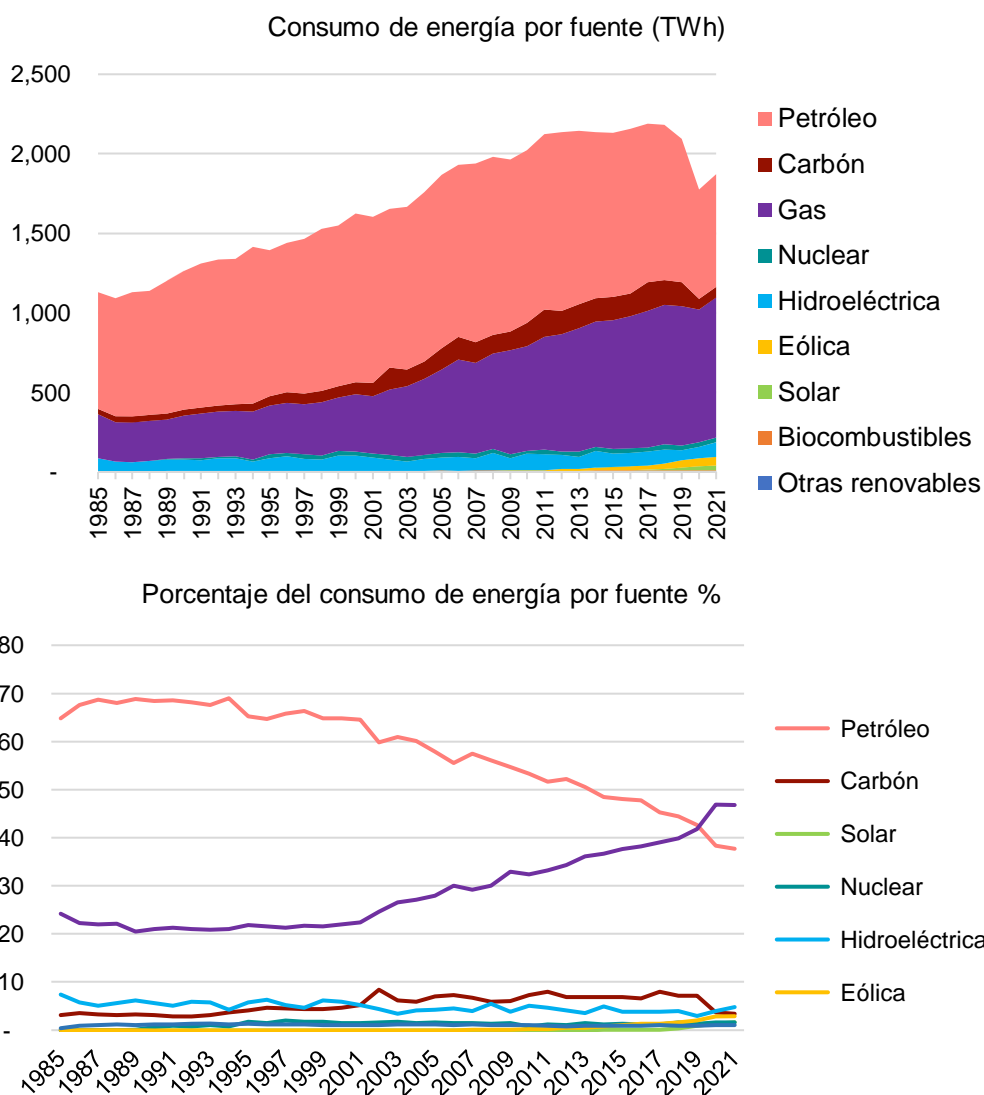
### 3.2. Matriz Energética

Una vez, visualizado cuanta energía consume el país, es importante entender cómo es que se compone este consumo. El equilibrio de las fuentes de energía en el suministro se está volviendo cada vez más importante a medida que los países intentan alejarse de los combustibles fósiles hacia fuentes de energía bajas en carbono (nuclear o renovables, incluida la energía hidroeléctrica, solar y eólica). La **Figura 3.2.1.** muestra la combinación energética del país por fuente de energía primaria. Uno se presenta como un gráfico de áreas apiladas, lo que nos permite ver un desglose completo de las fuentes de energía en el suministro. El gráfico de líneas muestra el porcentaje de energía total suministrada por cada fuente.

Desde la Revolución Industrial, los combustibles fósiles se han convertido en la fuente de energía dominante para la mayoría de los países del mundo. No obstante, la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) es responsable de alrededor de las tres cuartas partes de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. También son una fuente importante de contaminación del aire, que es responsable de al menos cinco millones de muertes prematuras cada año. Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y la exposición a la contaminación del aire local, queremos hacer la transición de nuestros sistemas de energía de los combustibles fósiles a fuentes bajas en carbono. Las

fuentes de energía bajas en carbono<sup>22</sup> incluyen tecnologías nucleares y renovables.

**Figura 3.2.1.**  
Matriz energética por fuente de energía primaria



*Notas.* El consumo de energía primaria se mide en teravatios-hora (TWh). Aquí se ha aplicado un factor de ineficiencia (el método de 'sustitución') para los combustibles fósiles, lo que significa que las proporciones de cada fuente de energía dan una mejor aproximación al consumo de energía final. 'Otras energías renovables' incluye geotérmica, biomasa y energía generada por residuos.

Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022.

Tanto para el cambio climático como para la salud humana, queremos alejarnos de los combustibles fósiles. Pero ¿qué tan rápido estamos progresando en esto? Al cierre del 2021, el 87.90% de la energía en México proviene de fuentes fósiles:

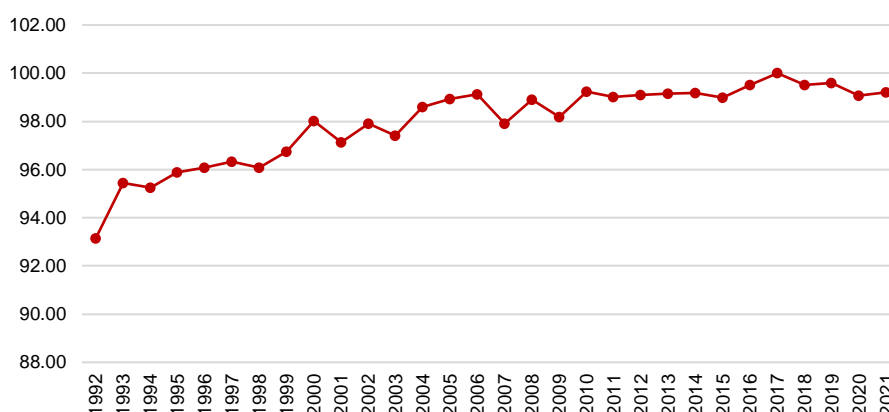
<sup>22</sup> La energía baja en carbono se define como la suma de fuentes nucleares y renovables. Las fuentes renovables incluyen energía hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y bioenergía. No se incluyen los biocombustibles tradicionales.

carbón (3.41%), petróleo (37.70%) y gas (46.78%) y tan solo el 12.10% restantes proviene de fuentes bajas en carbono: otras renovables (1.01%), nuclear (1.59%), eólica (2.9%), solar (1.65%) e hidroeléctrica (4.82%) ver **Figura 3.2.1**.

### 3.3. Acceso a la electricidad

La electricidad es un bien que agrega un valor enorme a la vida moderna: desde tener luz por la noche; al lavado de ropa; cocinar comidas; maquinaria en funcionamiento; o conectarse con personas de todo el mundo. Muchos argumentarían que es crucial para el alivio de la pobreza, el crecimiento económico y la mejora del nivel de vida (Pesaran, Smith, & Shin, 1996b) (Panos, Densing, & Volkart, 2016). La **Figura 3.3.1** muestra el porcentaje de personas que tienen acceso a la electricidad en el país.

**Figura 3.3.1.**  
*Porcentaje de la población con acceso a la electricidad*



Notas: Proporción de la población con acceso a la electricidad. La definición utilizada en las estadísticas internacionales adopta un límite muy bajo para lo que significa "tener acceso a la electricidad". Se define como tener una fuente de electricidad que puede proporcionar una iluminación muy básica y cargar un teléfono o alimentar una radio durante 4 horas al día.

Fuente: elaboración propia con datos del Banco Mundial.

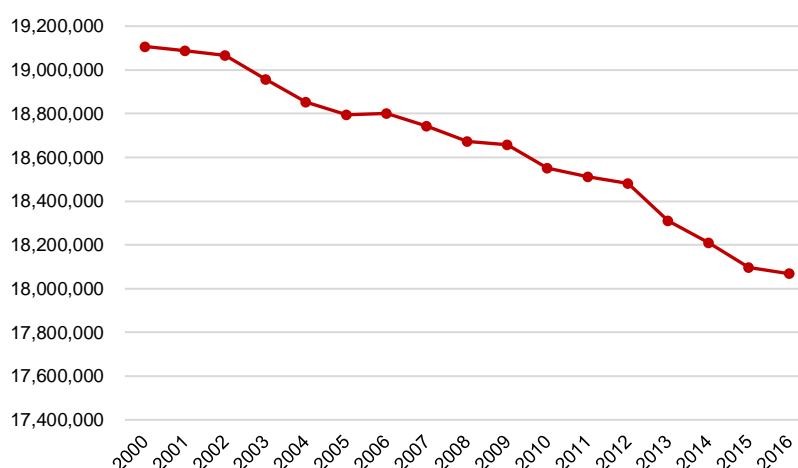
Al cierre del 2021, el 99.21% de la población mexicana cuenta con servicio de energía eléctrica, un 0.13% mayor respecto al año anterior. Sin embargo, de acuerdo con el informe anual 2021 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en México todavía restan aproximadamente 1.2 millones de habitantes sin acceso a la electricidad, de los cuales el 60% pertenecen a comunidades indígenas. En gran medida, esto se debe a que la mayor parte de estas personas vive en comunidades pequeñas en lugares alejados que enfrentan otras dificultades graves, entre ellas la falta de servicios e infraestructura básica como caminos, agua, telecomunicaciones, escuelas y atención de salud. Los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Jalisco y Guerrero se encuentran entre las cinco entidades con más habitantes por electrificar (entre ellas concentran al 44% del total).

Es decir, aproximadamente un 1% de mexicanos no cuentan con cobertura eléctrica, este número puede parecer muy poco, pero eso significa que más de 352,000 hogares, o cerca de un 1.2 millones de personas —tomando en cuenta que, de acuerdo con el INEGI, un hogar es ocupado en promedio por 3.6 individuos— no tienen luz eléctrica. Por lo tanto, una cosa es el acceso a la electricidad y otra es el poder disfrutar los servicios que da la electricidad, justo en ese dilema es donde se abre aún más la brecha de desigualdad y el círculo de la pobreza (García-Ochoa & Graizbord, 2016).

A pesar de que la cobertura del servicio eléctrico es extensa, en México todavía muchas personas usan leña o carbón para encender los fogones para cocinar y mantener el calor en casa. En estos casos, el promedio de consumo de leña por familia es de 3 a 5 kilogramos diarios. Un buen manejo de estos combustibles es fundamental para evitar riesgos a la salud o incluso la muerte por intoxicación (Bienestar, 2023). El uso de combustibles sólidos para cocinar, como carbón vegetal, desechos de cultivos o estiércol, son un factor de riesgo principal de muerte y mala salud por la contaminación del aire interior. La contaminación del aire interior es causada por la quema de fuentes de combustible sólido, como leña, desechos de cultivos y estiércol, para cocinar y calentar. La quema de tales combustibles, particularmente en los hogares pobres, da como resultado la contaminación del aire que conduce a enfermedades respiratorias que pueden provocar la muerte prematura. La Organización Mundial de la Salud llama a la contaminación del aire interior “el mayor riesgo ambiental para la salud del mundo” (WHO, 2022).

**Figura 3.3.2.**

*Número de personas en México sin acceso a combustibles limpios para cocinar*



Notas: Los combustibles y tecnologías limpios para cocinar representan combustibles no sólidos como el gas natural, el etanol o las tecnologías eléctricas.

Fuente: elaboración propia con información del Repositorio de Datos del Observatorio Global de Salud de la Organización Mundial de la Salud.

Al cierre del año 2016, el país contaba con 18 millones de personas (mdp) que todavía utilizan fuentes de combustible sólido, como leña, desechos de cultivos y estiércol, para cocinar y calentar sus alimentos (ver **Figura 3.3.2.**). Otros países como Nigeria (20.39 mdp), Nepal (19.73 mdp) y Costa de Marfil (19.48 mdp), Camerún (18.41 mdp) entre otros, al cierre de ese mismo año presentan cifras similares a las de México.

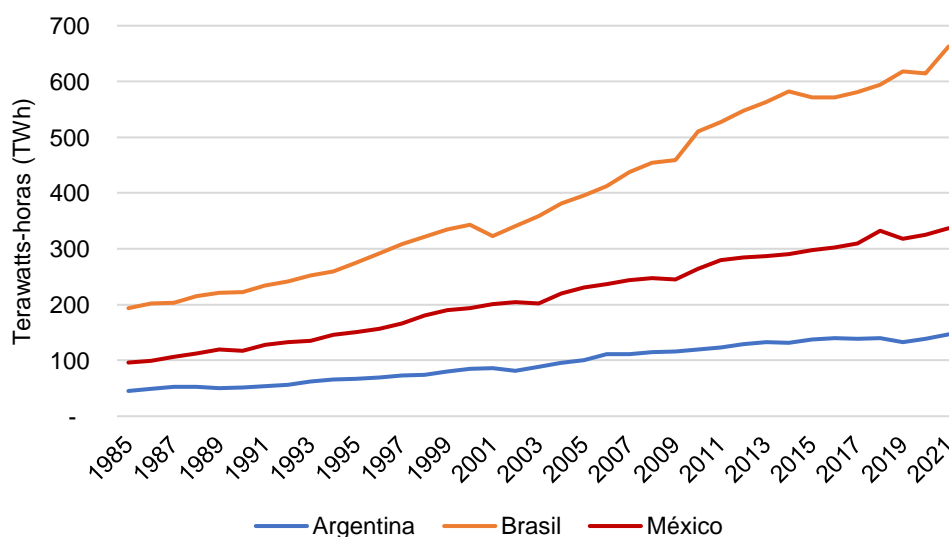
Lo anterior implica que, incluso viviendo en casas electrificadas, si no disponen de los recursos económicos suficientes para utilizar la electricidad o el gas (Greenpeace, 2022), miles de personas pueden estar en situación de pobreza energética. La ausencia de energía limpia y de fácil acceso en los hogares es otro bastión que ancla las desigualdades sociales en el país: mientras una casa grande llega a tener hasta más de 15 focos encendidos, existen barrios y pueblos enteros en los que las personas aún usan leña para la preparación de los alimentos (Greenpeace, 2022).

### 3.4. Matriz Eléctrica

En la misma media, en la **Figura 3.4.1.** a lo largo del tiempo se observa una tendencia creciente en la producción o generación de electricidad para los tres países, siendo Brasil el de mayor generación con una tasa de crecimiento anual en las últimas dos décadas del 3.2% (663 TWh al cierre del 2021), seguido de México (2.7%, 337 TWh) y Argentina (2.6%, 147 TWh).

**Figura 3.4.1.**

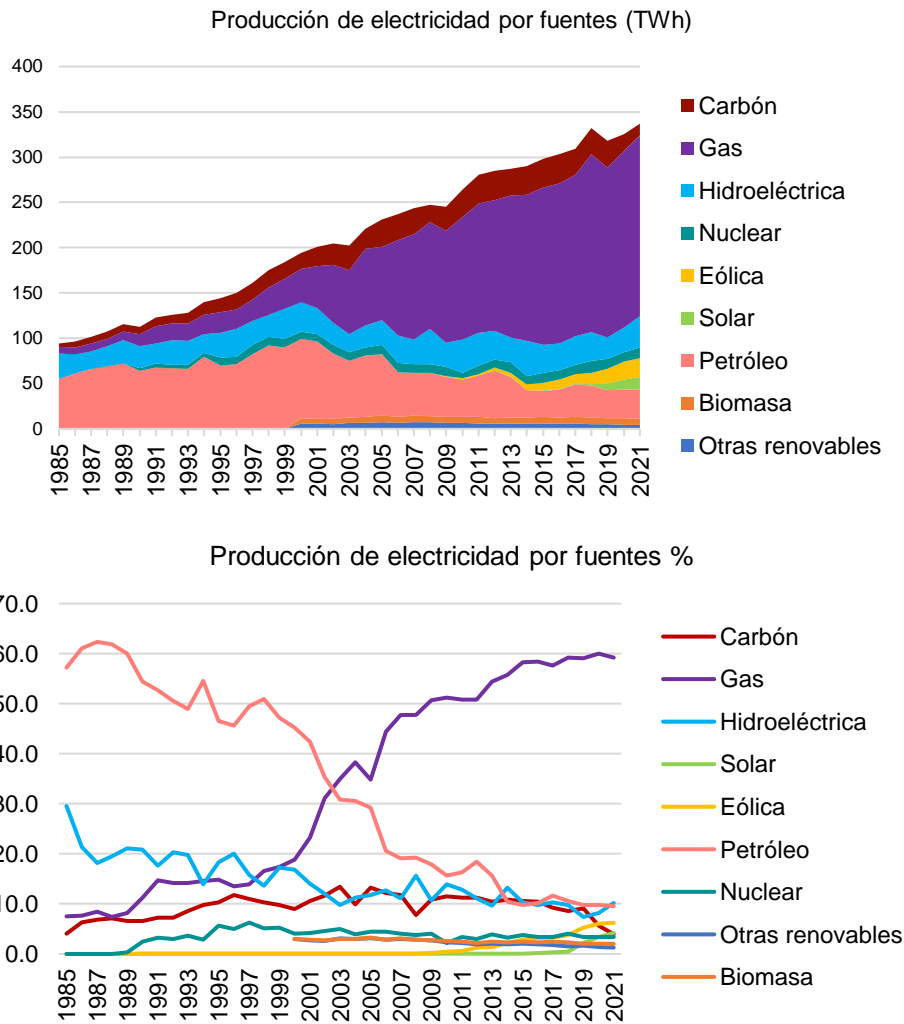
*Evolución de la Generación de Electricidad en México, Brasil y Argentina*



Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022.

En el caso particular de México, la **Figura 3.4.2.** muestra la composición de la matriz eléctrica por fuente de energía, así como su porcentaje de contribución en la generación nacional.

**Figura 3.4.2.**  
*Matriz eléctrica por fuente de energía*

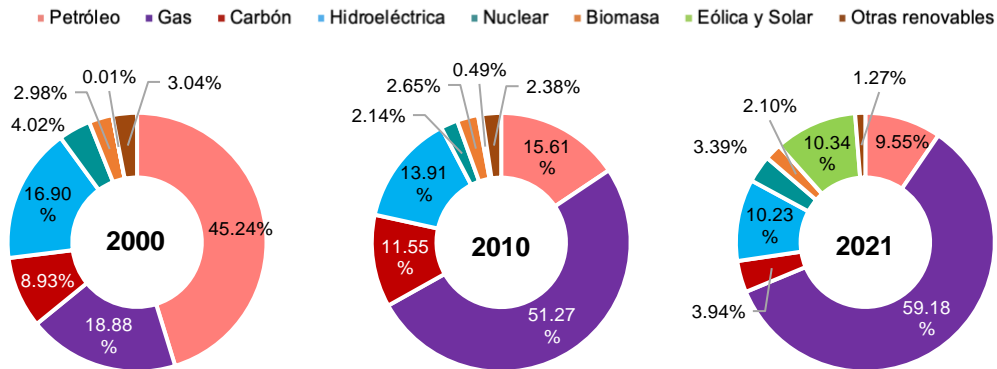


Notas: La producción de electricidad se mide en teravatios-hora (TWh). Aquí se ha aplicado un factor de ineficiencia (el método de 'sustitución') para los combustibles fósiles, lo que significa que las proporciones de cada fuente de energía dan una mejor aproximación al consumo de energía final.  
 Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022.

Si bien se ha tenido la capacidad de abastecer la demanda de energía eléctrica, alcanzando una cobertura del 99.21% de la población del país, habría que realizarle un análisis a parte sobre la eficiencia del sector eléctrico. En la **Figura 3.4.3.** se aprecia la evolución del suministro eléctrico por fuente de energía, considerando dos tipos de fuentes: las no renovables (petróleo, gas, carbón) y las renovables (hidroeléctrica, nuclear, biomasa, eólica, solar y otras como geotermia y maremotriz). Dado lo anterior, se observa que en el año 2000 el suministro eléctrico estaba compuesto un 73.05% por fuentes no renovables (en su mayoría por petróleo) y un 26.95% por fuentes renovables (en su mayoría por hidroeléctrica). Para el año 2010, esta composición fue de 78.43% por fuentes no renovables (en su mayoría por gas natural) y 21.57% por fuentes renovables. Finalmente, para el cierre del 2021 esta composición es de 72.67% (no renovables) y 27.33% (renovables).

**Figura 3.4.3.**

*Evolución de la matriz eléctrica en México*



Notas: La producción de electricidad se mide en teravatios-hora (TWh). Aquí se ha aplicado un factor de ineficiencia (el método de 'sustitución') para los combustibles fósiles, lo que significa que las proporciones de cada fuente de energía dan una mejor aproximación al consumo de energía final.

Fuente: elaboración propia con información del reporte estadístico de BP a junio 2022.

A pesar, de que desde el año 2000 al 2021 la composición de la matriz eléctrica es muy parecida a la de hace veinte años, es decir fuertemente abastecida por los hidrocarburos, se observa que durante estas dos décadas se ha transitado a disminuir el uso del carbón y petróleo para hacer un mayor uso del gas natural, y con esto reducir la intensidad energética y aumentar la eficiencia. Además, las energías renovables como la solar y la eólica, han venido ganando un poco de terreno desde el año 2013 con la reforma energética y la liberalización del sector eléctrico a un esquema de mercado. No obstante, desplazar a los hidrocarburos por una mayor presencia de fuentes limpias todavía será un reto que nos tome varias generaciones. La transición eléctrica en el país ha venido incentivada por motivos económicos, el gas natural es un combustible muy flexible, más eficiente en su consumo, y se puede usar desde en el hogar hasta en la industria. No obstante, la transición del siglo XXI se hace por la razón de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y así enfrentar la crisis climática.

En el país existen ocho formas en las que se genera electricidad, estas tecnologías son: termoeléctrica<sup>23</sup>, combustión dual<sup>24</sup>, carboeléctrica<sup>25</sup>,

<sup>23</sup> Dentro de esta tecnología se encuentran la generación por vapor, ciclo combinando, turbogas y combustión interna.

<sup>24</sup> Se refiere a la generación eléctrica por medio de combustóleo y gas natural.

<sup>25</sup> Se refiere aquella que genera energía eléctrica por medio de turbinas accionadas a partir de la combustión del carbón.

geotermoeléctrica<sup>26</sup>, nucleoeeléctrica<sup>27</sup>, eólica<sup>28</sup>, hidroeléctrica<sup>29</sup>, fotovoltaica<sup>30</sup>, ver **Tabla 3.4.1.**

**Tabla 3.4.1.**

*Proporción del uso de tecnología en la generación bruta de energía eléctrica 2010-2020.*

Tecnología	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Termoeeléctrica	66.27	66.53	68.67	69.45	65.34	67.86	68.68	69.07	68.75	74.51	74.70
Dual	6.45	5.97	6.23	6.04	6.26	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Carboeléctrica	6.83	7.04	6.80	6.22	6.76	11.54	13.00	11.95	11.34	9.28	6.00
Geotermoeléctrica	2.74	2.52	2.23	2.35	2.32	2.41	2.29	2.30	2.03	2.09	2.10
Nucleoeeléctrica	2.43	3.91	3.37	4.58	3.75	4.43	4.02	4.23	5.24	4.47	4.98
Eólica	0.07	0.14	0.67	0.70	0.80	0.91	0.94	0.77	0.83	0.77	0.85
Hidroeléctrica	15.21	13.88	12.02	10.64	14.77	11.51	11.07	11.68	11.81	8.88	11.37
Fotovoltaica	0.000	0.000	0.001	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004

Fuente: elaboración propia con datos del sistema de información energética de la SENER.

En la **Tabla 3.4.1.**, se puede observar que las tecnologías termoeeléctricas son las que tienen mayor participación en la generación de electricidad, que en 57.57% funcionan con gas y combustóleo. Durante los últimos diez años, estas tecnologías representaron en promedio el 70%, alcanzando su máximo en el 2020 con una proporción de 74.70%; donde la generación por ciclo combinado es la que tiene mayor participación en las tecnologías termoeeléctricas, promediando del 2010 al 2020, 73.68%. Seguido se encuentra la tecnología hidroeléctrica, la cual representa dentro de la matriz de generación bruta de electricidad, del 2010 al 2020, una cantidad promedio de 12.00%; alcanzando su máximo en el 2010, con una proporción de 15.21%.

Sin embargo, a pesar de que la Secretaría de Energía cambió el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036, en donde la autoridad reconoce que se incumplirán las metas de generación limpia (35% para 2024), establecidas en la Ley de Transición Energética (LTE) y en el Acuerdo de París, hecho que cambiaría para el 2025. No obstante, observamos que al cierre 2020 la participación de energías limpias en la generación de electricidad fue de tan solo el 19.30%. Resulta difícil alcanzar estas metas apoyadas por la implementación de drásticos cambios en la regulación secundaria del sector que ha tenido lugar desde el inicio de la actual administración (2018-2024), concretándose específicamente con la cancelación de las Subastas de Largo Plazo al mismo tiempo que se prioriza la construcción de nuevas plantas de ciclo

<sup>26</sup> Se refiere aquélla que utiliza vapor natural producido en la tierra para alimentar las turbinas que mueven a los generadores eléctricos.

<sup>27</sup> Se caracteriza por el empleo de combustible nuclear fisionable que mediante reacciones nucleares proporciona calor que a su vez es empleado, a través de un ciclo termodinámico convencional, para producir el movimiento de alternadores que transforman el trabajo mecánico en energía eléctrica.

<sup>28</sup> Es la energía obtenida a partir del viento.

<sup>29</sup> Estas centrales aprovechan la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como «salto geodésico». En su caída entre dos niveles del cauce, se hace pasar el agua por una turbina hidráulica que transmite energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

<sup>30</sup> La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía obtenida directamente a partir de la radiación solar.

combinado, aunado a una matriz energética anclada mayoritariamente al gas natural que proviene de Estados Unidos.

## Capítulo 4. Marco metodológico

En este capítulo, se intentará resaltar los problemas econométricos básicos relacionados con los datos de series de tiempo y proporcionar un marco metodológico básico para el análisis de las series de tiempo. La relación entre el crecimiento económico y energía es un tema dentro de la corriente de la economía de la energía que se ha distinguido por utilizar diferentes enfoques para determinar la causalidad entre ambas variables. Aunque la selección de la metodología depende principalmente de los objetivos e hipótesis que el investigador plantee, estos trabajos generalmente utilizan econometría de series de tiempo debido a las herramientas estadísticas que esta alternativa ofrece. El presente capítulo tiene por objetivo describir los métodos econométricos que se utilizaran para responder las preguntas de investigación.

Las series de tiempo son una secuencia de observaciones de la variable definida en un intervalo uniforme durante un período de tiempo en orden sucesivo. Las series más comunes tienen frecuencias anuales, trimestrales, mensuales, semanales y diarias. Los datos de series de tiempo económicas a menudo poseen características únicas, como una tendencia clara, un alto grado de persistencia en los choques, una mayor volatilidad a lo largo del tiempo y movimientos conjuntos serpenteantes y compartidos con otras series (Enders, 2014). Los investigadores deben comprender estas características de los datos de series de tiempo de manera adecuada y abordarlas. En el análisis de series de tiempo, es importante comprender el comportamiento de las variables, sus interacciones e integraciones a lo largo del tiempo.

Teóricamente, el análisis económico sugiere que existe una relación de largo plazo entre las variables bajo consideración. A menudo, los econométricos o investigadores han ignorado las características dinámicas inherentes de la mayoría de las series de tiempo en el proceso de análisis de series de tiempo y formulación de modelos de regresión tradicionales. Se supuso que las series de tiempo subyacentes eran estacionarias o al menos estacionarias en torno a una tendencia determinista y que también exhibían una relación de largo plazo. Por tanto, lo normal era formular un modelo econométrico de forma convencional asumiendo que las medias y varianzas de las variables eran constantes y no dependientes del tiempo. Así, los modelos estimados se utilizaron para analizar teorías formuladas a nivel abstracto y, para pronosticar, evaluar y estimular políticas.

Sin embargo, desarrollos recientes en econometría han revelado que muchas veces, la mayoría de las series de tiempo no son estacionarias como se pensaba convencionalmente. Por lo tanto, diferentes series de tiempo pueden no mostrar las mismas características. En ese sentido, es posible ver algunas series de tiempo que muestran la característica de divergir de su media a lo largo del tiempo, mientras que otras pueden converger a su media a lo largo del tiempo. Se dice que las series de tiempo son no estacionarias si su comportamiento en el tiempo se aleja de su media. Por lo tanto, la estimación clásica de variables

con esta relación la mayoría de las veces da inferencias engañosas o regresiones espurias.

Para abordar este problema de no estacionariedad y restricciones previas en la estructura de rezagos de un modelo, el análisis econométrico de datos de series de tiempo se ha movido cada vez más hacia el tema de la cointegración. La razón es que la cointegración es una forma poderosa de detectar la presencia de equilibrio de estado estacionario entre las variables. La cointegración se ha convertido en un requisito primordial para cualquier modelo económico que utilice datos de series de tiempo no estacionarios. Si las variables no se cointegran, entonces tenemos problemas de regresión espuria y como consecuencia los resultados carecen de sentido. Por otro lado, si las variables se cointegran, entonces tenemos cointegración.

En econometría aplicada, la técnica de cointegración de (Granger C. , 1981) y (Engle & Granger, 1987), técnicas de cointegración mediante modelos Autoregresivos de Rezagos Distribuidos (ARDL) o pruebas de cointegración de (Pesaran & Shin, 1995), (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) y las técnicas de cointegración de (Johansen & Juselius, 1990) se han convertido en la solución para determinar la relación de largo plazo entre series no estacionarias, así como reparametrizarlas al Modelo de Corrección de Errores (ECM). El resultado reparametrizado arroja la dinámica de corto plazo y la relación de largo plazo de las variables subyacentes.

Con estos antecedentes, el objetivo de este proyecto es examinar las condiciones que requieren la aplicación de la técnica de cointegración o prueba ligada de cointegración *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL) y su interpretación.

#### 4.1. Propiedades de las series de tiempo

##### **4.1.1. Carácter autorregresivo de series de tiempo.**

Los datos de series de tiempo pueden tener algún tipo de relación con sus valores anteriores. El carácter autorregresivo (AR) de modelos de series de tiempo indica que el valor presente de cualquier variable está determinado por su valor pasado y algunos factores de ajuste. Dichos factores de ajuste se estiman a partir de la relación del valor actual con los valores pasados. Si el valor actual se basa únicamente en el valor inmediatamente anterior, se denomina autorregresivo de primer orden, AR(1), y si se basa en dos valores anteriores, autorregresivo de segundo orden, AR(2), y así sucesivamente.

Un modelo de regresión lineal (Stigler, 1981) univariado se puede estimar como:

$$Y_t = \mu + \rho Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.1.1.1.)$$

Donde,  $Y_t$  es la variable dependiente,  $Y$ , al periodo  $t$ .  $\mu$  es el parámetro de la constante.  $\varepsilon_t$  es la parte no explicada (brecha) de los datos reales y la línea ajustada por la ecuación de regresión, denominada término de error.  $Y_{t-1}$  es el primer valor rezagado de  $Y$ ,  $\rho$  es el coeficiente de  $Y_{t-1}$  se puede interpretar como su elasticidad. La **Ecuación (4.1.1.1.)** dice que el valor de  $Y_t$  es igual a la constante  $\mu$  más  $\rho$  veces su valor anterior y un componente desconocido  $\varepsilon_t$ . El modelo para estimar en la **Ecuación (4.1.1.1.)** es un proceso AR (1).

De manera similar, un modelo AR (2) se puede estimar mediante la **Ecuación (4.1.1.2.)**, de la siguiente manera:

$$Y_t = \mu + \rho Y_{t-1} + \rho_2 Y_{t-2} + \varepsilon_t \quad (4.1.1.2.)$$

Además del proceso AR, el modelo de promedio móvil (MA, *por sus siglas en inglés*) también estima el valor actual de una variable en función de los términos de error<sup>31</sup> del año actual y del año anterior. Al igual que en el proceso AR, también puede haber más de un orden de integración en MA.

#### 4.1.2. Concepto de series estacionarias y no estacionarias.

Una serie de tiempo no estacionaria es un proceso estocástico con raíces unitarias o choques estructurales. Sin embargo, las raíces unitarias son fuentes importantes de no estacionariedad. La presencia de una raíz unitaria implica que una serie de tiempo en consideración no es estacionaria, mientras que la ausencia de ella implica que una serie de tiempo es estacionaria. Esto representa que la raíz unitaria es una de las fuentes de no estacionariedad. Un proceso estocástico no estacionario podría ser un proceso estacionario (determinista) de tendencia (TSP) o un proceso estacionario en diferencias (DSP), este tema se abordará con mayor detalle en el siguiente apartado.

En palabras más simples, se dice que los datos de una serie de tiempo se denominan estacionarios si su valor tiende a volver a su valor promedio a largo plazo y las propiedades de la serie de datos no se ven afectadas solo por el cambio en el tiempo (Verbeek, 2017) (**Figura 4.1.2.1.**). Por el contrario, las series de carácter no estacionario no tienden a volver a su valor promedio de largo plazo, por lo que su media, varianza y covarianza también cambian con el tiempo. La mayoría de las variables macroeconómicas como el volumen del producto interno bruto (PIB), el consumo, el índice de precios al consumidor, etc.

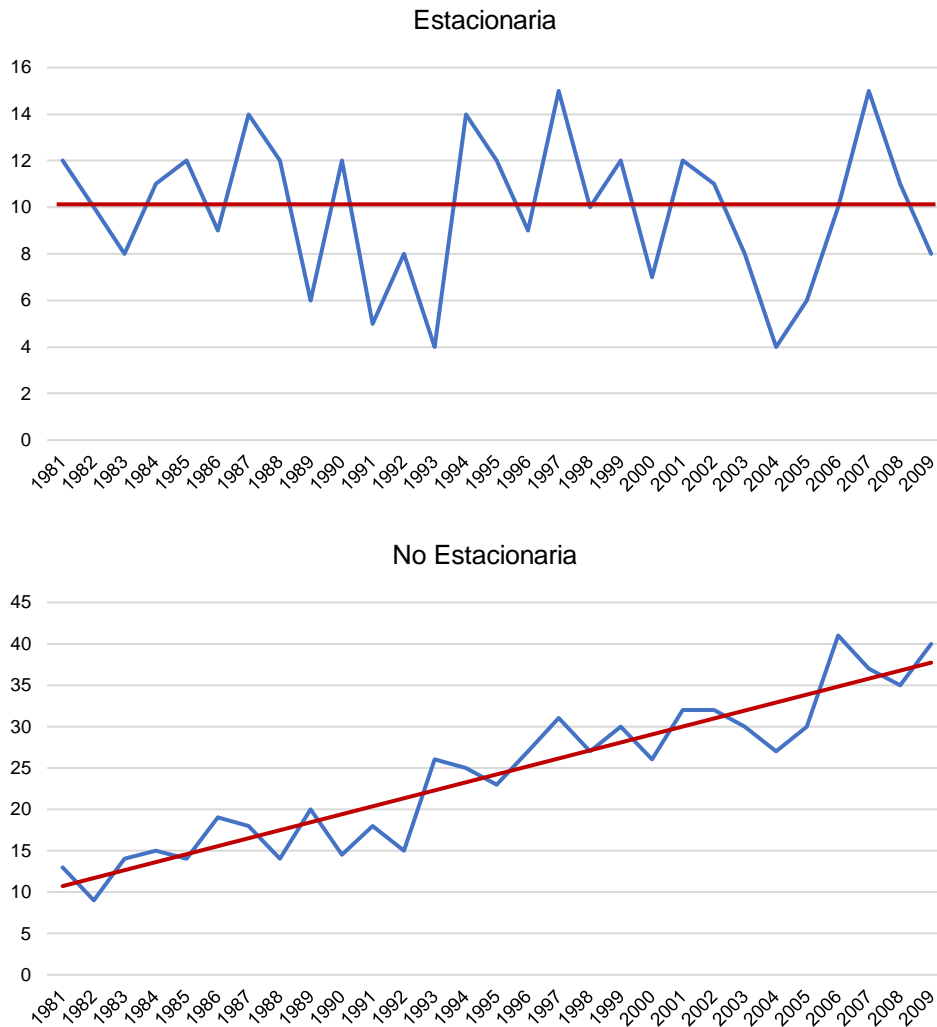
---

<sup>31</sup> Los términos de error son los factores de regresión no observados que pueden afectar a la variable dependiente. Estos son residuos de valores reales y ajustados de una regresión. Se representan con las letras  $\varepsilon$  o  $u$  (Wooldridge, 2010) menciona que "tratar con este término de error es el componente más importante de cualquier análisis econométrico".

presentan un fuerte movimiento ascendente o descendente a lo largo del tiempo sin tendencia a volver a una media fija.

**Figura 4.1.2.1.**

*Estacionariedad en las series de tiempo*



Fuente: elaboración propia con datos aleatorios para su ejemplificación.

Por lo tanto, son series no estacionarias. Si la serie no es estacionaria, se dice que tiene raíz unitaria. Por lo tanto, en econometría, la estacionariedad de una serie de tiempo se examina realizando una prueba de raíz unitaria. Matemáticamente, la serie  $Y_t$  es estacionaria si:

$$E(Y_t) = E(Y_{t-s}) = \mu, \text{ para algunos } s > 0 \quad (4.1.2.1)$$

$$Var(Y_t) = Var(Y_{t-s}) = \sigma^2 \text{ y} \quad (4.1.2.2)$$

$$Cov(Y_t, Y_{t-s}) = \gamma_s \quad (4.1.2.3)$$

Donde

$E(Y_t)$  = Valor esperado de  $Y$  en el periodo  $t$

$Var$  = Varianza, la variación o dispersión de  $Y_t$  entre  $E(Y_t)$

$Cov$  = Covarianza, la variación conjunta de  $Y_t$  y  $Y_{t-s}$

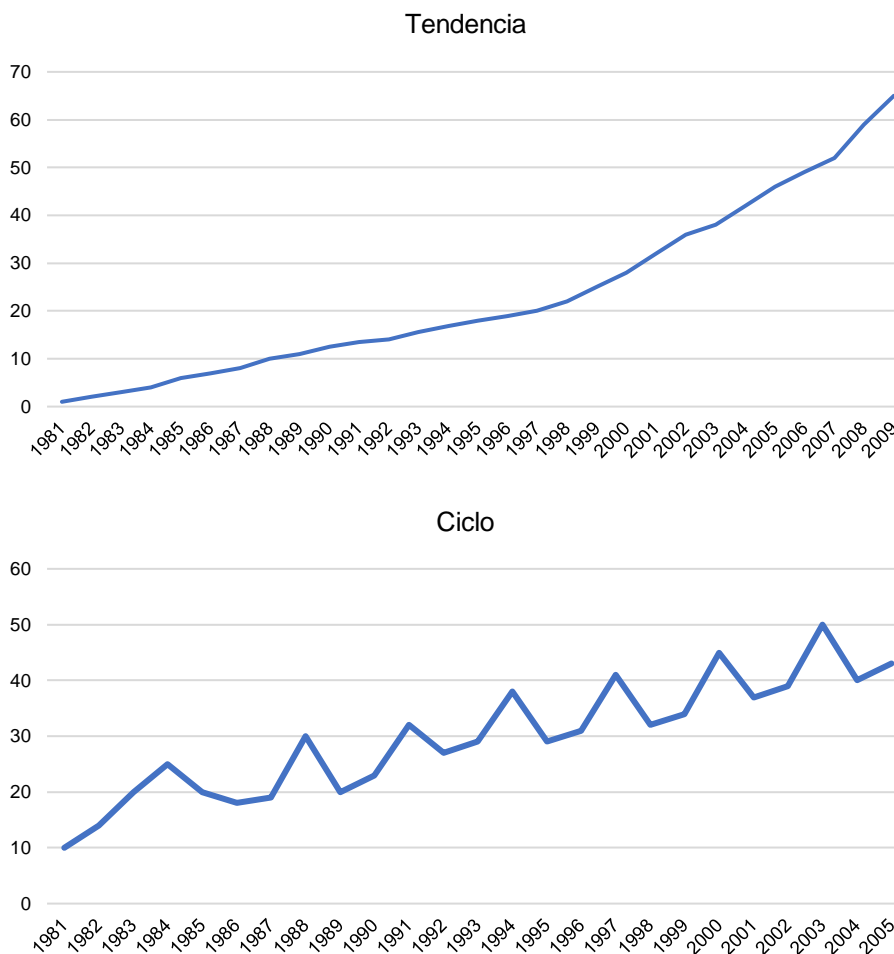
$Y_{t-s}$  = Rezago de  $Y$  hasta el periodo  $t - s$

### 4.1.3. Tendencia, ciclos y estacionalidad en datos de series de tiempo.

La tendencia es un movimiento sostenido a largo plazo hacia arriba o hacia abajo en los datos de las series de tiempo (**Figura 4.1.3.1.**). El ciclo es una fluctuación de corto plazo que ocurre en un intervalo determinado de tiempo, como mensual, trimestral o anual. Las tendencias siempre son no estacionarias, mientras que los ciclos pueden ser estacionarios o no estacionarios. La estacionalidad es un tipo de patrón en datos de alta frecuencia, como trimestrales, mensuales, semanales o diarios.

**Figura 4.1.3.1.**

*Series con tendencia y ciclo*



Fuente: elaboración propia.

Se dice que una serie de tiempo es un proceso estacionario de tendencia si la tendencia es completamente predecible y no variable, mientras que, si no es predecible, lo llamamos diferencia o tendencia estocástica integrada o proceso estacionario en diferencias. En el caso de la tendencia determinista, la divergencia del valor inicial (representa la media no estacionaria) es puramente aleatoria y desaparece rápidamente. No contribuyen ni afectan el desarrollo a largo plazo de la serie de tiempo. Sin embargo, en el caso de tendencia estocástica integrada, el componente aleatorio ( $U_t$ ) o divergencia afecta el desarrollo a largo plazo de la serie. Al utilizar series de tiempo con estas características en cualquier análisis empírico significativo, la serie debe ser purgada de esta tendencia. Esto se conoce como eliminación de tendencia de la serie. Este proceso puede llevarse a cabo de dos maneras, dependiendo de si la serie es un proceso estacionario en diferencias (DSP) o un proceso estacionario determinista.

#### 4.2. Determinación de la estacionariedad en las series de tiempo

La mayoría de las técnicas de modelado aplicadas en el análisis de series de tiempo se ocupan principalmente de la estacionariedad de los datos. El punto de partida es examinar gráficamente las propiedades de las series y confirmarlas estadísticamente. Los gráficos son la herramienta más preliminar para tener una idea aproximada de la estacionariedad de la serie. Sin embargo, se requieren pruebas estadísticas para la decisión final. Las pruebas de raíces unitarias proporcionan evidencia estadística sobre la estacionariedad de una serie dada.

Si la serie es DSP, significa que tiene raíz unitaria; por lo tanto, la diferenciación de tales series es estacionaria. Por tanto, la solución a la serie no estacionaria es diferenciar la serie. Además, si una serie es TSP, significa que exhibe una tendencia determinista, mientras que una variable estacionaria de tendencia con media no constante puede ser  $I(0)$  después de eliminar una tendencia determinista. Es decir, la regresión de tales series en el tiempo ( $t$ ) y los residuos de esta regresión serán estacionarios ( $Y_t = \beta_t + U_t$ ). Por lo tanto, la cointegración no puede verse como un medio para un fin, sino restringida. Debe quedar claro que, si una serie de tiempo es TSP, pero se trata como DSP, esto se denomina *sobrediferenciación*. Por otro lado, si una serie de tiempo es DSP, pero tratada como TSP; esto se conoce como *subdiferenciación*. Las implicaciones de estos tipos de errores de especificación pueden ser graves, dependiendo de cómo se manejen las propiedades de correlación serial de los términos de error resultantes. Sin embargo, se ha observado que la mayoría de las series de tiempo son DSP en lugar de TSP.

Por lo tanto, cuando tales series de tiempo no estacionarias (DSP) se utilizan en la estimación de un modelo econométrico, las estadísticas de diagnóstico tradicionales de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, *por sus siglas en inglés*)

para evaluar la validez del modelo, tales como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la relación de Fisher (*estadístico – F*), Durbin-Watson (*estadístico – DW*), la *estadístico – t*, etc. se vuelven altamente engañosos y poco confiables en términos de pronóstico y política. En tales series, las funciones de media, varianza, covarianza y autocorrelación cambian con el tiempo y afectan el desarrollo a largo plazo de la serie. Además, la presencia de raíces unitarias en estas series conduce a la violación de los supuestos de medias constantes y varianzas de OLS. Sin embargo, esta revisión se centra en el proceso estacionario en diferencia en lugar del proceso estacionario con tendencia, ya que la mayoría de las series de tiempo son procesos estacionarios en diferencia.

Como se mencionó anteriormente, muchas variables de series de tiempo son estacionarias solo después de la diferenciación. Por lo tanto, el uso de variables diferenciadas para las regresiones implica la pérdida de propiedades relevantes a largo plazo o información de la relación de equilibrio entre las variables bajo consideración. Esto significa que tenemos que idear una forma de retener la información relevante a largo plazo de las variables. En este sentido, el proceso de cointegración toma importancia, ya que permite recuperar la información relevante a largo plazo de la relación entre las variables consideradas que se había perdido en la diferenciación. Es decir, integra la dinámica de corto plazo con el equilibrio de largo plazo. Esta es la base para obtener estimaciones realistas de un modelo, que es el impulsor de una implementación significativa de pronósticos y políticas. La cointegración es un paso preferido para modelar relaciones empíricamente significativas de DSP.

La cointegración se ocupa del análisis de las relaciones a largo plazo entre las variables integradas y la reparametrización de la relación entre las variables consideradas en un modelo de corrección de errores (ECM). Bajo el convencional (Granger C. , 1981) y (Engle & Granger, 1987) el análisis de cointegración no es aplicable en casos de variables que están integradas de diferentes órdenes (es decir, la serie  $x$  es  $I(1)$  y la serie  $y$  es  $I(0)$  ) mientras que en (Johansen & Juselius, 1990), y el procedimiento de cointegración ARDL es aplicable. La técnica de cointegración ARDL se utiliza para determinar la relación de largo plazo entre series con diferente orden de integración (Pesaran & Shin, 1995) y (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). El resultado reparametrizado arroja la dinámica de corto plazo y la relación de largo plazo de las variables consideradas.

Aunque la técnica de cointegración ARDL no requiere una prueba previa de raíces unitarias, para evitar el bloqueo del modelo ARDL en presencia de una tendencia estocástica integrada de  $I(2)$ , se sugiere que se debe realizar la prueba de raíz unitaria para conocer el número de raíces unitarias en las series consideradas. Esto se presenta en la siguiente sección.

#### 4.2.1. Proceso estocástico de raíz unitaria.

Dado el siguiente Modelo de Caminata Aleatoria (RWM, *por sus siglas en inglés*):

$$Y_t = \rho Y_{t-1} + U_t \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad (4.2.1.1.)$$

En el RWM anterior sin tendencia, si  $\rho = 1$ , nos encontramos ante un problema de raíz unitaria, es decir, una situación de no estacionariedad. En este caso la varianza de  $Y_t$  no es estacionaria.

*Sin embargo, si  $|\rho| \leq 1$ , es decir, si el valor absoluto de  $\rho$  es menor que uno, entonces se dice que la serie  $Y_t$  es estacionaria. Dado esto, se dice que  $U_t$  es ruido blanco y se distribuye normalmente con media cero y varianza unitaria. Por tanto, se sigue que  $E(Y_t) = 0$  y  $Var(Y_t) = 1/(1 - \rho^2)$  (Gujarati, 2010).*

Se supone que un proceso estocástico  $Y_t$  tiene un problema de raíz unitaria si su primera diferencia ( $Y_t - Y_{t-1}$ ) es estacionaria. En la práctica, la presencia de raíz unitaria muestra que la serie de tiempo bajo consideración no es estacionaria a menos que ocurra lo contrario. Por otro lado, una serie con raíz unitaria no tiene tendencia a volver a la trayectoria determinista de largo plazo y la varianza de la serie depende del tiempo. Una serie con raíz unitaria sufre efectos permanentes de choques aleatorios, por lo tanto, sigue un camino aleatorio. Es decir, al usar series de tiempo (dependientes e independientes) que contienen raíces unitarias en el análisis de regresión, los resultados clásicos de la regresión pueden ser engañosos.

Sin embargo, las variables  $I(1)$  que exhiben un camino aleatorio sin tendencia pueden tener una media constante en el tiempo, un valor esperado de cero y una varianza con tendencia; por lo tanto, hacer que la serie con raíz unitaria tenga la tendencia a volver a la trayectoria de largo plazo después de eliminar la tendencia determinista.

Como se ha descrito, el procedimiento estadístico empleado para determinar la estacionariedad de una serie se denomina "prueba de raíz unitaria". Existen varios métodos para probar raíces unitarias. Dentro de estos, se incluyen la prueba de Dickey Fuller Aumentada (ADF, *por sus siglas en inglés*) (Dickey & Fuller, 1981), prueba de Phillips Perron (PP) (Phillips & Perron, 1988), (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996), entre otras.

Cabe mencionar, de que antes de realizar pruebas formales, es deseable graficar las series de tiempo a considerar, para determinar las características probables de la serie. Si la serie tiene una tendencia ascendente, muestra que la media de la serie ha estado cambiando en el tiempo.

La estrategia más popular para probar la propiedad de estacionariedad de una sola serie de tiempo consiste en usar la prueba Dickey Fuller o la prueba Dickey Fuller Aumentada, respectivamente. A pesar de que la elección de las pruebas correctas depende principalmente de la configuración del problema que se desee abordar. Esto no debe entenderse como un motivo para no realizar otro tipo de pruebas de raíces unitarias. Comparar diferentes resultados de diferentes métodos de prueba es una buena manera de probar la sensibilidad de sus conclusiones. Por lo tanto, la prueba de raíces unitarias se requiere básicamente para determinar el número de veces que se debe diferenciar una variable o serie para lograr la estacionariedad. De aquí viene la definición de integración: Una variable  $Y$ , se dice integrada de orden  $d$ ,  $I(d)$  si alcanza estacionariedad después de diferenciar  $d$  veces (Engle & Granger, 1987).

#### **4.2.1.1. Prueba Dickey Fuller Aumentada (ADF).**

La prueba de Dickey Fuller Aumentada (ADF, por sus siglas en inglés) es el método más común para probar la raíz unitaria. Primero empezaremos por ejemplificar la prueba de Dickey Fuller (DF) (Dickey & Fuller, 1979).

Suponga que  $Y_t$  es un proceso de aleatorio,  $Y_t = Y_{t-1} + u_t$ , entonces el modelo de regresión se convierte en  $Y_t = \rho Y_{t-1} + u_t$ . Si se resta  $Y_{t-1}$  de ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\begin{aligned} Y_t - Y_{t-1} &= \alpha_1 Y_{t-1} + u_t && (4.2.1.1.1.) \\ \Delta Y_t &= (\alpha - 1) Y_{t-1} + u_t && (4.2.1.1.2.) \\ \Delta Y_t &= (\alpha - 1) Y_{t-1} + \alpha_2 T + u_t && (4.2.1.1.3.) \end{aligned}$$

Donde  $\alpha - 1 = p_1$ ,  $\Delta$  es un cambio en  $Y_t$  o la primera diferencia y  $t$  es el factor de tendencia.  $u_t$  es un residual de ruido blanco.

$$\Delta Y_t = p_1 Y_{t-1} + u_t \quad (4.2.1.1.4.)$$

Con tendencia obtenemos;

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + p_1 Y_{t-1} + u_t \quad (4.2.1.1.5.)$$

En la práctica se pone a prueba la hipótesis de  $p = 0$ . Si  $p = 0$ , “ $\alpha$ ” en la **Ecuación (4.2.1.1.1.)** sería igual a 1, significando que existe raíz unitaria. Por lo tanto, las series bajo consideración es no estacionaria. En el caso en donde  $p \geq 0$ , esto es, la serie de tiempo es estacionaria con media cero y en el caso de la **Ecuación (4.2.1.1.3.)**, la serie  $Y_t$  es estacionaria con tendencia determinista. Si  $p \geq 1$ , significa que la variable de estudio sera explosiva.

Sin embargo, realizar la prueba DF bajo las **Ecuaciones (4.2.1.1.2.) y (4.2.1.1.3.)**, se asume que los errores  $U_t$  no están correlacionados. Pero en el caso en que los errores sí estén correlacionados, se recomienda recurrir a la prueba de Dickey Fuller Aumentada (ADF), ya que ajusta la prueba DF para atender una posible autocorrelación en los términos de error ( $U_t$ ), al sumar el término en diferencia rezagado de la variable dependiente,  $\Delta Y_t$ .

Por lo tanto, el modelo ADF prueba de raíz unitaria sería de la siguiente manera:

*Modelo restringido ADF:*

$$\Delta Y_t = p_1 Y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (4.2.1.1.6.)$$

$$\Delta Y_t = p_1 Y_{t-1} + \alpha_2 T + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (4.2.1.1.7.)$$

*Modelo general ADF:*

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + p_1 Y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (4.2.1.1.8.)$$

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + p_1 Y_{t-1} + \alpha_2 T + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (4.2.1.1.9.)$$

Donde  $u_t$  es un término de error de ruido blanco puro.  $k$  son los valores rezagados de  $\Delta Y$ , para controlar la correlación de orden superior suponiendo que la serie sigue un proceso autoregresivo  $AR(p)$ .

En ADF la hipótesis nula ( $H_0$ )  $p = 0$ , todavía sigue siendo probada y sigue la misma distribución asintótica que la estadística DF.

$$H_0: p_1 = 0 \quad (p_1 \sim I(1)) \text{ vs } H_1: p_1 < 0 \quad (p_1 \sim I(0)) \quad (4.2.1.1.10.)$$

En la práctica, un valor DF o ADF menor que su valor crítico muestra que la serie subyacente no es estacionaria. Por el contrario, cuando un valor de DF o ADF mayor que su valor crítico muestra que la serie subyacente es estacionaria.

Sin embargo, no se puede rechazar la hipótesis nula sobre la no estacionariedad basada en la prueba ADF, ya que su poder no es fuerte como tal. Esta decisión se puede verificar utilizando otras pruebas relacionadas, como la prueba de (Kwiatkowski, Phillips, Schmidt, & Shin, 1992) (KPSS) o Philips-Perron (PP).

La prueba PP tiene la misma hipótesis nula que ADF, y su distribución asintótica es la misma que la estadística de prueba ADF. Pero en el caso de la prueba KPSS, la hipótesis nula es diferente; asume la estacionariedad de la variable de interés. Los resultados de la prueba ADF difieren de KPSS ya que KPSS no proporciona un valor  $p$ , sino que muestra diferentes valores críticos. En este caso, el valor de la estadística de prueba se compara con el valor crítico en el nivel de significación deseado. Si el estadístico de prueba es mayor que el valor

crítico, rechazamos la hipótesis nula y cuando el estadístico de prueba es menor que el valor crítico, no podemos rechazar la hipótesis nula.

En general, la hipótesis nula para ADF dice que la serie no es estacionaria, mientras que KPSS dice que la serie es estacionaria. Para el tratamiento de la correlación serial, PP lee que existe correlación serial (no paramétrica) mientras que ADF lee que existe correlación serial (paramétrica).

Además, se considera una buena estrategia comenzar con el modelo que contiene tanto una constante como una tendencia **Ecuación (4.2.1.1.9.)**, porque este modelo es el menos restringido. Si aquí se rechaza una raíz unitaria, debido a un  $p_1$  significativo, no hay necesidad de continuar con la prueba. Si no se puede rechazar  $p_1 = 0$ , la eficiencia mejorada en un modelo sin tendencia en el tiempo podría ser mejor, además de tomar en cuenta la longitud del rezago en el aumento (Bo, 2019).

#### **4.2.1.2. Prueba Phillips-Perron (PP).**

La prueba Phillips-Perron es un modelo alternativo para probar la presencia de raíz unitaria en las series de tiempo. Este modelo se prueba de la siguiente manera:

$$\Delta y_t = \pi y_{t-1} + \beta_i D_{t-i} + e_t \quad (4.2.1.2.1.)$$

Donde,

$e_t$  es un  $I(0)$  con media cero y  $D_{t-i}$  es un componente con tendencia determinista. La hipótesis se pone a prueba para  $\pi = 0$ . La principal diferencia entre las pruebas ADF y PP, es que esta última es una prueba no paramétrica, lo que significa que no necesita especificar la forma de la correlación serial de  $\Delta y_t$  bajo la hipótesis nula. Por lo tanto, el procedimiento de cálculo de la relación  $t$  para obtener el valor de  $\pi$  se vuelve diferente. Además, PP considera los problemas estadísticos de autocorrelación y heterocedasticidad de las series. El procedimiento de prueba de hipótesis es similar al de la prueba ADF.

A pesar de que existe vasta literatura en donde la prueba ADF es más confiable que la prueba PP, el problema de la distorsión del tamaño y la baja potencia de la prueba hacen que ambas pruebas sean menos útiles (Maddala & Kim, 2003). La prueba PP se sugiere para un mayor volumen de datos.

#### **4.2.1.3. Prueba Kwiatkowsky, Phillips, Schmidt and Shin (KPSS).**

En ocasiones, se encuentra que el marco de prueba clásico está sesgado hacia la aceptación de la hipótesis nula ( $H_0$ ). Por lo tanto, Kwiatkowsky, Phillips,

Schmidt y Shin (KPSS) han desarrollado otro método para probar la estacionariedad. En la prueba KPSS, la hipótesis nula es estacionaria y la hipótesis alternativa no es estacionaria. El modelo de prueba KPSS es el siguiente:

$$Y_t = X_t + \varepsilon_t ; \text{ por lo tanto, } X_t = X_{t-1} + u_t \quad (4.2.1.3.1.)$$

En el modelo de arriba, la hipótesis se prueba para  $u_t$ . Los valores críticos reportados de la prueba KPSS se derivan de las estadísticas de prueba del multiplicador de lagrange (LM)

#### 4.2.1.4. Prueba de Elliott, Rothenberg y Stock.

Para máxima potencia frente a alternativas muy persistentes se deben utilizar las pruebas recientes propuestas por (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996) y (Ng & Perron, 2001).

La prueba ADF-GLS, también conocida como prueba ERS (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996), es otra modificación de la prueba Dickey-Fuller Aumentada. Antes de la prueba de raíz unitaria, la prueba ADF-GLS utiliza la transformación de eliminación de tendencia (es decir, la transformación que elimina la tendencia de la serie de tiempo). La variable constante se estima con base en el método de mínimos cuadrados generalizados (GLS) usando la transformación:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= y_1, \tilde{y}_t = y_t - \rho y_{t-1} & t &= 2, \dots, T, \\ x_1 &= 1, x_t = 1 - \rho & t &= 2, \dots, T, \end{aligned} \quad (4.2.1.4.1.)$$

Donde  $\rho = 1 + \bar{c}/T$  y  $\bar{c} = -7$ , basado en la ecuación:

$$\tilde{y}_1 = \beta_0 x_t + \varepsilon_t \quad (4.2.1.4.2.)$$

De manera subsecuente el parámetro  $\tilde{\beta}_0$  se estima por el método de mínimos cuadrados para remover la constante en la serie de tiempo.

$$y_t^* = y_t - \hat{\beta}_0 \quad (4.2.1.4.3.)$$

Como último paso la prueba ADF es calculada basada en la siguiente transformación de la serie de tiempo:

$$\Delta y_t^* = \phi_1 y_{t-1}^* + \sum_{i=1}^p \gamma_i \Delta y_{t-i}^* + \varepsilon_t \quad (4.2.1.4.4.)$$

La tendencia en modelos con tendencia lineal se estima por GLS. En donde se extiende una transformación de la **Ecuación (4.2.1.4.2.)** dada por  $z_1 = 1, z_t =$

$t - \rho(t - 1)$ , donde  $\rho = 1 + \bar{c}/T$  y  $\bar{c} = -13.5$ . Ahora los parámetros a estimar se calculan con base en la siguiente ecuación:

$$\tilde{y}_t = \beta_0 x_t + \beta_1 z_t + \varepsilon_t \quad (4.2.1.4.5.)$$

Ahora los parámetros estimados  $\tilde{\beta}_0$  y  $\tilde{\beta}_1$  se usan para eliminar la tendencia de la serie de tiempo  $y_t$  resultando en:

$$y_t^* = y_t - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t) \quad (4.2.1.4.6.)$$

Finalmente, se aplica la prueba ADF en la serie de tiempo transformada a obtenerse de la siguiente ecuación:

$$\Delta y_t^* = \beta_0 + \phi_1 y_{t-1}^* + \sum_{i=1}^p \gamma_i \Delta y_{t-i}^* + \varepsilon_t \quad (4.2.1.4.7.)$$

Los valores críticos de las pruebas ADF-GLS se obtienen con base en la simulación en (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996) y mencionan que para modelos sin constante son los mismos que en el caso de la prueba ADF. Para el resto de los modelos se utilizan valores críticos de la prueba ADF-GLS como se indica en (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996) también.

#### 4.2.1.5. Prueba Lee y Strazicich con choques estructurales.

Es bien sabido que ante la presencia de choques estructurales en las series de tiempo puede sesgar los resultados hacia el no rechazo de la hipótesis nula de raíz unitaria cuando no la hay. Esta consideración es de particular importancia ya que el sistema económico y energético de México ha estado sujeto a algunos cambios drásticos en las políticas y regulaciones. (Zivot & Andrews, 1992) propusieron una alternativa a la prueba de raíz unitaria contra una estacionariedad de un solo choque. (Lumsdaine & Papell, 1997) se extendieron a una alternativa de estacionariedad con dos choques estructurales y (Kapetanios, 2005) a una alternativa de estacionariedad de hasta cinco choques, con un número de choques a priori desconocido.

Sin embargo, estas pruebas mantienen el supuesto de linealidad bajo la hipótesis nula de raíz unitaria. Si existe un quiebre bajo el valor nulo de una raíz unitaria, exhibirá distorsiones de tamaño que no solo "rechazan en exceso" la hipótesis nula de una raíz unitaria, sino que también tenderán a estimar el punto de quiebre incorrectamente. Para superar este problema, (Lee & Strazicich, 2003) (Lee & Strazicich, 2004) han desarrollado una prueba alternativa (como máximo dos) de raíces unitarias de choques endógenos que utiliza el estadístico de prueba Multiplicador Lagrangeano (LM, *por sus siglas en inglés*) y permite choques tanto bajo hipótesis nulas como alternativas. Por lo tanto, el rechazo de la raíz unitaria

nula basado en la prueba LM proporciona una evidencia bastante fuerte de estacionariedad.

La prueba de raíz unitaria de Lee y Strazicich considera el proceso de generación de datos de la siguiente manera:

$$\Delta y_t = \delta' \Delta Z_t + \phi \tilde{S}_{t-1} + u_t \quad (4.2.1.5.1.)$$

Donde  $\tilde{S}_{t-1} = y_t - \tilde{\psi}_x - Z_t \tilde{\delta}$  ( $t = 2, \dots, T$ ) y  $Z_t$  es un vector de variables exógenas donde  $\tilde{\delta}$  es el vector de los coeficientes en el modelo de regresión de  $\Delta y_t$  en  $\Delta Z_t$ , respectivamente y el  $\Delta$  como el operador de diferencias; y  $\psi_t = y_1 - Z_1 \tilde{\delta}$  con  $y_1$  y  $Z_1$  como las primeras observaciones de  $y_t$  y  $Z_t$ , respectivamente. Por lo tanto, las hipótesis de raíz unitaria se describen por  $\psi = 0$ . Los términos  $\Delta \tilde{S}_{t-j}$ ,  $j = 1, \dots, k$  se incluyeron para corregir la correlación serial. El valor de  $k$  está determinado por el procedimiento de búsqueda que va de lo general a lo específico. Para determinar endógenamente la ubicación del choque ( $T_B$ ), el proceso de raíz unitaria LM busca todos los puntos de ruptura posibles para el estadístico de prueba  $t$  de raíz unitaria mínimo (el más negativo), de la siguiente manera:

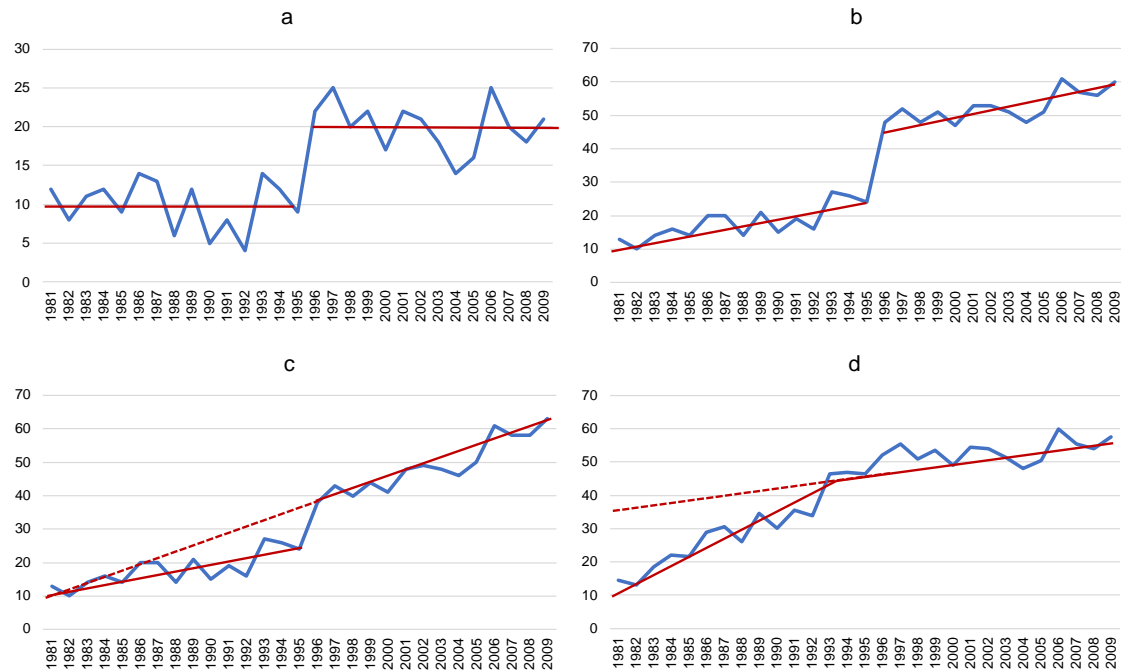
$$\text{Inf} \tilde{\tau}(\tilde{\lambda}) = \text{inf}_{\lambda} \tilde{\tau}(\lambda); \lambda = \frac{T_B}{T} \quad (4.2.1.5.2.)$$

Los valores críticos de la prueba endógena de raíces unitarias LM con dos choques se reportan en (Lee & Strazicich, 2003) y los valores críticos de la prueba de raíces unitarias LM de un choque están tabulados en (Lee & Strazicich, 2004).

#### 4.2.2. Cambios estructurales en series de tiempo.

Un cambio estructural se visualiza como un salto o caída repentina en una serie de tiempo económica que ocurre debido al cambio de régimen, dirección de política y choques externos, entre otros. Los cambios estructurales pueden ocurrir en la intersección (intercepto), en la tendencia de la serie o en ambas (**Figura. 4.2.2.1.**).

**Figura 4.2.2.1.**  
Cambios estructurales en las series de tiempo



Notas: Cambio estructural en el intercepto (a). Cambio estructural en intercepto (b). Cambio estructural en tendencia (c). Cambio estructural en intercepto y tendencia.

Fuente: elaboración propia con datos aleatorios para ejemplificación.

Los cambios estructurales pueden crear dificultades en las pruebas de raíz unitaria. Como lo muestra Perron (Perron, 1989), en la presencia de cambios estructurales, las pruebas convencionales de raíz unitaria pueden llevar a resultados erróneos como mostrar series no estacionarias, que en la realidad si son estacionarias. En otras palabras, una serie estacionaria que tiene un cambio estructural puede considerarse como una serie no estacionaria por los métodos de prueba de raíz unitaria mencionados anteriormente ya que estos métodos no realizan ajustes por cambio estructural.

Para abordar el problema del cambio estructural en las series de tiempo, (Perron, 1989) ha desarrollado un método de prueba de raíz unitaria, que acomoda un cambio estructural conocido en la serie de tiempo. Más recientemente, se han propuesto algunos métodos nuevos para la prueba de raíz unitaria que permiten detectar más de un cambio estructural en las series sin necesidad de ser conocidos (Perron & Vogelsang, 1992) (Perron, 1997) (Lumsidaine & Papell, 1997) (Bai & Perron, 2003) (Shrestha & Chowdhury, 2005).

#### 4.3. Métodos para el análisis de series de tiempo

Una vez que las variables han sido clasificadas como integradas del orden, digamos  $I(0)$ ,  $I(1)$  o  $I(2)$ , es posible establecer modelos significativos que conduzcan a relaciones estacionarias entre las variables, y donde al final la

inferencia estándar se convierte en posible. El criterio de estacionariedad entre variables no estacionarias se llama co-tendencia, y entre variables integradas el término es cointegración. Probar la cointegración es un paso necesario para construir relaciones empíricamente significativas. Si las variables tienen diferentes tendencias, no pueden permanecer en relaciones fijas a largo plazo entre sí, lo que implica que no puede modelarlas y cuando se involucran variables integradas, generalmente no hay una base válida para la inferencia basada en distribuciones estándar. Si no encuentra cointegración entre variables integradas, es necesario continuar trabajando con variables (estacionarias) en diferencias.

#### **4.3.1. Marco teórico para la selección de la metodología.**

Desde el trabajo seminal de (Kraft & Kraft, 1978) sobre el nexo energía-crecimiento, se han utilizado varios métodos de cointegración y causalidad en este campo. Los más comunes han sido el método de (Engle & Granger, 1987) basado en residuos, el de (Phillips & Hansen, 1990) con un procedimiento de mínimos cuadrados ordinarios modificado, el de (Johansen, 1988) y el método de máxima verosimilitud de (Johansen & Juselius, 1990).

Sin embargo, algunos años más tarde, se ha reconocido que estos métodos pueden no ser apropiados para muestras pequeñas (Narayan & Smyth, 2005). En primer lugar, los estudios anteriores al establecimiento de los modelos Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL, *por sus siglas en inglés*), y este fue en gran medida el caso del nexo entre energía y crecimiento, utilizaron análisis transversales a través de su configuración de datos de panel. Esto implicó que los países incluidos en esas muestras no fueran lo suficientemente homogéneos con respecto a su nivel de desarrollo económico (Odhiambo, 2009). A menos que los resultados fueran específicos de cada país, los resultados de estos estudios fueron de poca utilidad para la formulación de políticas. Esto generó la necesidad de métodos de cointegración y causalidad más sofisticados. Estos métodos econométricos empleados en el antiguo nexo energía-crecimiento han incidido en otros campos, como el nexo turismo-crecimiento, finanzas, comercio exterior, entre otros.

El inicio del método Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) o prueba de límites "*Bound testing*" se debe a (Pesaran & Shin, 1995), mientras que su posterior desarrollo se debe a (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). Se reconoce como uno de los métodos más flexibles en el análisis econométrico del nexo energía-crecimiento, particularmente cuando el marco de investigación está determinado por cambios de régimen y choques. Estos últimos, cambian el patrón de consumo de energía o la evolución de las covariables en los modelos de crecimiento energético. Además, el hecho de que el método ARDL pueda tolerar

diferentes rezagos en diferentes variables, hace que el método sea muy atractivo, versátil y flexible.

La capacidad de albergar rezagos suficientes permite una mejor captura del mecanismo del proceso de generación de datos. Esto se traduce en que el método se puede aplicar independientemente de si la serie de tiempo es  $I(0)$ , estacionaria en niveles o  $I(1)$ , estacionaria en primeras diferencias o fraccionalmente integrada (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). Sin embargo, dentro del marco ARDL, la serie no debería ser  $I(2)$ , porque este orden de integración invalida los estadísticos  $F$  y todos los valores críticos establecidos por Pesaran.

Además, el método ARDL proporciona estimaciones no sesgadas y estadísticos  $t$  válidos, independientemente de la endogeneidad de algunos regresores (Harris & Sollis, 2003) (Jalil & Ma, 2008). En realidad, debido a la selección adecuada de rezagos, se elimina la correlación de los residuales y, por lo tanto, también se mitiga el problema de la endogeneidad (Ali, Law, & Zannah, 2016). En lo que se refiere a los ajustes de corto plazo, se pueden integrar con el equilibrio de largo plazo a través del mecanismo de corrección de errores (ECM, *por sus siglas en inglés*). Esto ocurre a través de una transformación lineal sin sacrificar información sobre el horizonte a largo plazo (Ali, Abdullah, & Azam, 2017). Otro aspecto que considerar es que el método ARDL permite la corrección de valores atípicos con *dummies* de impulso (Marques, Fuinhas, & Marques, 2017) (Marques, Fuinhas, & Marques, 2019) y el enfoque distingue entre variables dependientes e independientes.

Por último, pero no menos importante, la interpretación del enfoque ARDL y su implementación es bastante sencilla (Rahman & Kashmen, 2017) y el marco ARDL requiere una ecuación de forma única mientras que otros procedimientos requieren un sistema de ecuaciones. El enfoque ARDL es más confiable para muestras pequeñas en comparación con la metodología de cointegración de Johansen y Juselius. (Halicioglu, 2007) también menciona dos ventajas más del método, que son: la estimación simultánea de los efectos de corto y largo plazo y la capacidad de probar hipótesis sobre los coeficientes estimados en el largo plazo. Esto no se hace en el método de Engle-Granger.

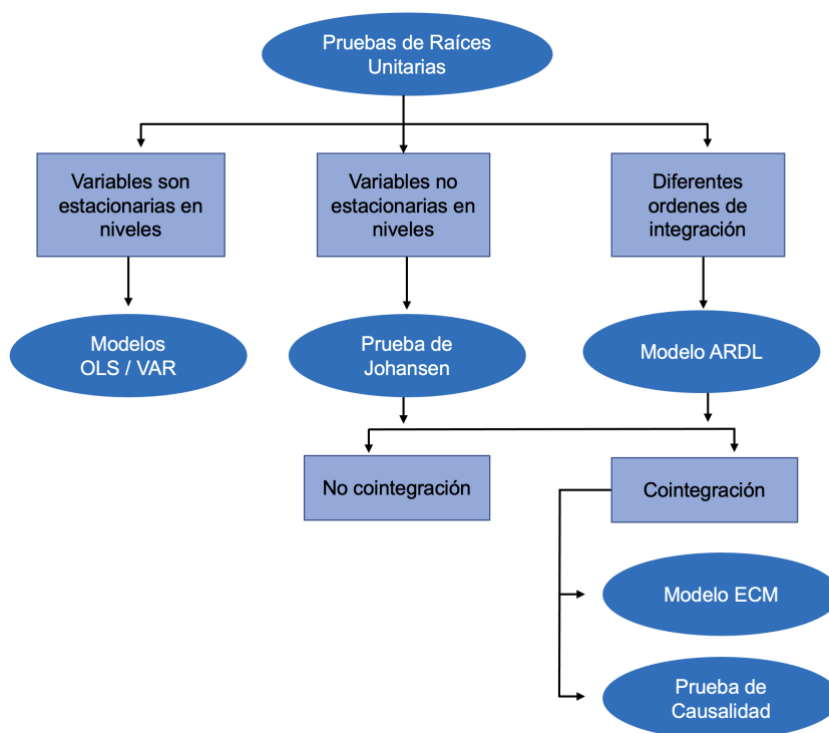
Decidir que metodología es la más adecuada para analizar los datos de series de tiempo es la parte más crucial del análisis de series de tiempo, ya que la especificación incorrecta del modelo o el uso de un método incorrecto proporciona estimaciones sesgadas y poco fiables. Principalmente, la selección del método para el análisis de series de tiempo se basa en los resultados provenientes de las pruebas de raíz unitaria que determinan la estacionariedad de la variable. Los métodos comúnmente utilizados para analizar series de tiempo estacionarias no pueden utilizarse para analizar series no estacionarias.

Si todas las variables de interés son estacionarias, la metodología se vuelve simple. En tal caso, los modelos de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, *por sus siglas en inglés*) o vectores autorregresivos (VAR, *por sus siglas en inglés*) pueden proporcionar estimaciones imparciales. Si todas las variables de interés no son estacionarias, los modelos OLS o VAR pueden no ser apropiados para analizar la relación. Del mismo modo, surge un problema adicional cuando las variables utilizadas en el análisis son de tipo mixto, es decir, algunas son estacionarias y otras no estacionarias.

A continuación, se presenta un marco metodológico general para el análisis de series de tiempo. El criterio de selección de las diferentes metodologías de la **Figura 4.3.1.1.** se ejemplifica desde un enfoque simplista o básico, ya que existen muchas más consideraciones en modelos de series de tiempo.

**Figura 4.3.1.1.**

*Criterio de selección para datos con series de tiempo*



Nota: OLS: mínimos cuadrados ordinarios; VAR: vector autorregresivo; ARDL: autorregresivo de rezagos distribuidos; ECM: modelo de corrección de errores.

Fuente: elaboración propia.

### 4.3.2. Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS).

Como se mencionó en el apartado 4.2. del presente capítulo, el primer paso para iniciar el análisis de series de tiempo es realizar una prueba de raíz unitaria. Si los resultados de la prueba de raíz unitaria muestran que todas las variables que se analizan son estacionarias, entonces se puede usar el método OLS para determinar la relación entre las variables dadas. Un modelo de regresión lineal

bivariado, denominado mínimos cuadrados ordinarios (OLS), se puede estimar como sigue:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + e_i \quad (4.3.2.1.)$$

Que se puede escribir como:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \beta_1 - \beta_2 X_i \quad (4.3.2.2.)$$

El modelo anterior muestra que los residuales ( $e_i$ ) son simplemente la diferencia entre los valores reales ( $Y_i$ ) y los estimados ( $\hat{Y}_i$ ). La metodología OLS minimiza la suma de. residuales al cuadrado al elegir  $\beta_1$  y  $\beta_2$  (Gujarati, 2010).

Como se mencionó anteriormente, una serie de tiempo no estacionaria se puede convertir en una serie estacionaria tomando su primera derivada. Si una serie de tiempo se vuelve estacionaria después de tomar su primera diferencia, entonces se dice que la serie es integrada de orden uno y se denota por  $I(1)$ . De manera similar, si una serie de tiempo tiene que derivarse dos veces para que sea estacionaria, entonces se llama integrada de orden 2 y se escribe como  $I(2)$ . Cuando no es necesario tomar su primera diferencia, es decir la serie se mantiene en niveles, se denota por  $I(0)$ . Tomar la diferencia de series de tiempo no estacionarias y usar el método OLS después de hacer que todas las variables sean estacionarias puede parecer una manera fácil de analizar la relación. Sin embargo, la diferencia representa solo el cambio de corto plazo en la serie de tiempo, pero pierde totalmente la información de largo plazo. Por lo tanto, este método no se sugiere para el análisis de variables no estacionarias.

### 4.3.3. Modelo de Vectores Autorregresivos (VAR).

El modelo de vectores autorregresivos (VAR) permite la retroalimentación o causalidad inversa entre los regresores dependientes e independientes utilizando sus propios valores pasados. En el modelo VAR general, no se requieren variables exógenas ya que asume que todos los regresores son endógenos. La dimensión VAR (Sims, Goldfeld, & Sachs, 1982) más simple para dos variables  $X$  e  $Y$  con un solo rezago se muestra a continuación:

$$Y_t = \delta_1 + \theta_{11} Y_{t-1} + \theta_{12} X_{t-1} + \varepsilon_{1t} \quad (4.3.3.1.)$$

$$X_t = \delta_2 + \theta_{21} Y_{t-1} + \theta_{22} X_{t-1} + \varepsilon_{2t} \quad (4.3.3.2.)$$

Donde  $\varepsilon_{1t}$  y  $\varepsilon_{2t}$  son perturbaciones de ruido blanco no correlacionadas o términos de error.

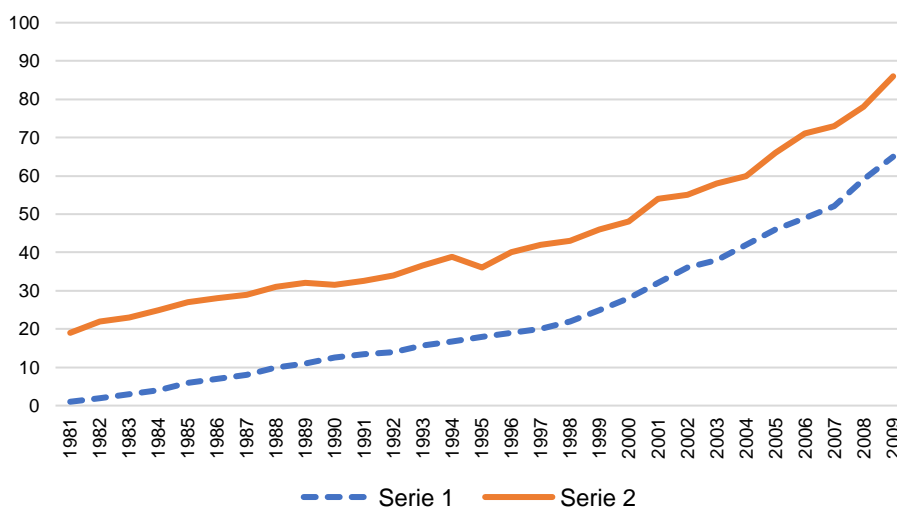
Para los modelos VAR, es importante establecer una selección apropiada para el número de rezagos. El número óptimo de rezagos se puede seleccionar utilizando los criterios de selección de longitud de rezago disponibles. Los criterios más populares son el criterio de información de Akaike (AIC, *por sus siglas en inglés*), el criterio Bayesiano de Schwartz (SBC, *por sus siglas en inglés*) y el criterio de Hannan Quinn (HQC, *por sus siglas en inglés*).

#### 4.3.4. Prueba de Cointegración.

El uso de métodos de mínimos cuadrados ordinarios u otros métodos similares para series de tiempo no estacionarias puede producir resultados falsos. En otras palabras, los resultados de la prueba de regresión pueden mostrar que existe una relación significativa entre dos variables dadas, que de hecho no están correlacionadas. Este tipo de regresión se denomina "regresión espuria", que se produce principalmente debido a la no estacionariedad de la serie de tiempo utilizada en el modelo de regresión. Por otro lado, dos o más variables pueden formar una relación de equilibrio en el largo plazo, aunque se desvíen del equilibrio a corto plazo. Debido a estos problemas, (Engle & Granger, 1987) desarrollaron el método de prueba de cointegración para analizar las relaciones entre variables no estacionarias.

Si dos o más variables están vinculadas para formar una relación de equilibrio que en el largo plazo, se dice que estas variables están cointegradas. De hecho, una variable arrastra a la otra a lo largo del período y, por lo tanto, ambas comparten el mismo movimiento. La **Figura 4.3.4.1.** muestra el movimiento de dos series de tiempo cointegradas.

**Figura 4.3.4.1.**  
*Series cointegradas*



Fuente: elaboración propia con datos aleatorios para su ejemplificación.

El modelado de series de tiempo para mantener intacta su información a largo plazo se puede hacer a través de la cointegración. Los autores (Granger C. , 1981) y (Engle & Granger, 1987) fueron los primeros en formalizar la idea de cointegración, proporcionando pruebas y procedimientos de estimación para evaluar la existencia de una relación de largo plazo entre un conjunto de variables dentro de un marco de especificación dinámica. La prueba de cointegración examina cómo las series de tiempo, que, aunque pueden ser individualmente no estacionarias y alejarse mucho del equilibrio, pueden emparejarse de manera que el funcionamiento de las fuerzas de equilibrio asegure que no se desvíen demasiado. Es decir, la cointegración involucra una cierta combinación lineal estacionaria de variables que individualmente no son estacionarias, pero están integradas en un orden,  $I(d)$ . La cointegración es un concepto econométrico que imita la existencia de un equilibrio a largo plazo entre las series de tiempo económicas subyacentes que convergen en el tiempo.

Por lo tanto, la cointegración establece una base estadística y económica más sólida para el modelo empírico de corrección de errores, que reúne información de corto y largo plazo en las variables de modelado. La prueba de cointegración es un paso necesario para establecer si un modelo exhibe empíricamente relaciones significativas a largo plazo. Si no llegase a existir cointegración entre las variables subyacentes, se vuelve imperativo continuar trabajando con variables en diferencias. Sin embargo, faltará la información a largo plazo.

Existen varias pruebas de cointegración, además del procedimiento de Engle y Granger (1987), entre ellas está; la cointegración Autoregresiva de Rezagos Distribuidos (ARDL) o técnica de prueba de cointegración ligada/ prueba de límites (*bound test, en inglés*). Este modelo se convierte en el punto central de este trabajo.

#### **4.3.4.1. Prueba de Cointegración de Johansen.**

Al abordar las debilidades de la metodología de Engle-Granger, (Johansen, 1988) y (Johansen & Juselius, 1990) han desarrollado modelos mejorados de pruebas de cointegración. La versión de Johansen (1988) es ampliamente utilizada y ha sido incorporada en varios softwares econométricos. Por lo tanto, se puede decir que la prueba superior para la cointegración es la prueba de Johansen. Esta es una prueba que tiene todas las propiedades estadísticas deseables. La debilidad de la prueba es que se basa en propiedades asintóticas y, por lo tanto, es sensible a los errores de especificación en muestras limitadas o pequeñas.

Este método de prueba se basa en la relación entre el rango de la matriz y sus raíces características. Tenemos un modelo generalizado con  $n$  vectores variables:

$$x_t = A_1 x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.3.4.1.1.)$$

Por tanto

$$\begin{aligned} \Delta x_t &= A_1 x_{t-1} - x_{t-1} + \varepsilon_t = (A_1 - I)x_{t-1} + \varepsilon_t \text{ puede escribirse como} \\ &= \Pi x_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (4.3.4.1.2.)$$

Donde,

$x_t$  y  $\varepsilon_t$  son un vector ( $n \times 1$ )

$A_1$  = una matriz de parametros ( $n \times n$ )

$I$  = una matriz de identidad ( $n \times n$ )

$$\Pi = A_1 - I$$

Se procede a probar el rango de la matriz  $A_1 - I$ . Si el rango de  $A_1 - I$ , esto es, el rango de  $\Pi = 0$ , entonces se dice que las series son procesos no estacionarios. No hay ninguna combinación de variables que conduzca a la estacionariedad. La conclusión es que el modelado debe hacerse en primeras diferencias, ya que no hay una combinación lineal estable de las variables en niveles. Si el rango de  $\Pi = k$  entonces se dice que  $\Pi$  tiene rango completo y por tanto las series son estacionarias y si el rango es  $\Pi < k$ , también conocido como rango reducido, entonces existe cointegración.

Por lo tanto, la intuición es que, si tenemos tres variables en las pruebas de cointegración, el rango máximo de  $\Pi$  puede ser menor que tres (si  $k = 3$ , el rango de cointegración  $< 3$  y la relación de cointegración máxima es solo dos).

#### 4.3.5. Modelo de Corrección de Errores (ECM).

Si las variables son de orden de integración  $I(1)$  y existe una relación de cointegración entonces se puede implementar el modelo de corrección de errores (ECM). Considerando la siguiente relación bivariada:

$$Y_t = \mu + \beta_1 X_t + \varepsilon_t \quad (4.3.5.1.)$$

Con base en el teorema de representación de (Engle & Granger, 1987), se procede a establecer un vínculo entre la cointegración y el ECM transformando la **Ecuación (4.3.5.1.)**.

La ecuación de cointegración entre  $Y_t$  y  $X_t$  es la siguiente:

$$\varepsilon_t = Y_t - \mu + \beta_1 X_t \quad (4.3.5.2.)$$

Por lo tanto, el MCE para  $Y_t$  y  $X_t$  es como sigue:

$$\Delta Y_t = \mu_Y + \alpha_Y \varepsilon_{t-1} + \sum_{h=1}^l a_{1h} \Delta Y_{t-h} + \sum_{h=1}^l b_{1h} \Delta X_{t-h} + u_{Yt} \quad (4.3.5.3.)$$

$$\Delta X_t = \mu_X + \alpha_X \varepsilon_{t-1} + \sum_{h=1}^l a_{2h} \Delta Y_{t-h} + \sum_{h=1}^l b_{2h} \Delta X_{t-h} + u_{Xt} \quad (4.3.5.4.)$$

Donde,  $u_{Yt}$  y  $u_{Xt}$  son procesos de ruido blanco estacionarios para el numero de rezagos  $l$ . El modelo se puede seguir desarrollando y expandiendo más de manera similar en el caso multivariado.

Los coeficientes en la ecuación de cointegración dan la relación a largo plazo estimada entre las variables y los coeficientes en el ECM describen cómo las desviaciones de esa relación a largo plazo afectan los cambios en ellas en el próximo período. Los parámetros  $\alpha_Y$  y  $\alpha_X$  de las **Ecuaciones (4.3.5.3.)** y **(4.3.5.4.)** miden la velocidad de ajuste de  $X_t$  e  $Y_t$ , respectivamente, hacia el equilibrio a largo plazo.

#### 4.3.6. Modelo Autorregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL).

Cuando existe un vector de cointegración, no se puede aplicar el procedimiento de cointegración de (Johansen & Juselius, 1990). Por lo tanto, se vuelve imperativo explorar (Pesaran & Shin, 1995) y (Pesaran, Smith, & Shin, 1996b), quienes propusieron el enfoque Autorregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) para la cointegración, independientemente de si las variables subyacentes son  $I(0)$ ,  $I(1)$  o una combinación de ambos. La prueba de cointegración de Johansen no se puede aplicar directamente si las variables de interés son de orden mixto de integración o todas ellas no son no estacionarias, ya que este método requiere que todas las variables sean  $I(1)$ .

En tal situación, la aplicación del enfoque de cointegración ARDL dará estimaciones realistas y eficientes. A diferencia del procedimiento de cointegración de Johansen y Juselius (1990), el enfoque de cointegración con rezagos distribuidos autorregresivos (ARDL) ayuda a identificar los vectores de cointegración. Es decir, cada una de las variables subyacentes se presenta como una sola ecuación de relación de largo plazo. Si se identifica un vector de cointegración, el modelo ARDL del vector de cointegración se reparametriza en un Modelo de Corrección de Errores (ECM, *por sus siglas en inglés*).

El resultado reparametrizado proporciona una relación dinámica de corto plazo (es decir, ARDL tradicional) y una relación de largo plazo de las variables de un

solo modelo. La reparametrización es posible porque el ARDL es una ecuación de modelo único dinámico y de la misma forma que el ECM. Un modelo de rezagos distribuidos simplemente significa la inclusión de rezagos sin restricciones de los regresores en una función de regresión.

Este procedimiento de prueba de cointegración nos ayuda específicamente a saber si las variables subyacentes en el modelo están cointegradas o no, dada la variable endógena. Sin embargo, cuando hay múltiples vectores de cointegración, no se puede aplicar el método ARDL para la cointegración. Por lo tanto, el enfoque de Johansen y Juselius (1990) se convierte en la alternativa. Las siguientes secciones exponen el requisito para usar este enfoque y su aplicación.

Un modelo ARDL es un modelo basado en mínimos cuadrados ordinarios (OLS, *por sus siglas inglés*) que es aplicable tanto para series de tiempo no estacionarias como para series de tiempo con orden mixto de integración (Pesaran & Shin, 1995). Este modelo toma un número suficiente de rezagos para capturar el proceso de generación de datos en un marco de modelado general a específico.

Un modelo dinámico de corrección de errores (ECM) se puede derivar de ARDL a través de una transformación lineal simple. Asimismo, el ECM integra la dinámica de corto plazo con el equilibrio de largo plazo sin perder información de largo plazo y evita problemas como relaciones espurias resultantes de datos de series de tiempo no estacionarios.

Para ilustrar el enfoque de modelado ARDL  $(p, q_1, q_2, \dots, q_k)$  se especifica de la manera siguiente:

$$\phi(L, p)y_t = \sum_{i=1}^k \beta_i(L, q_i)x_{it} + \delta w_t + u_t \quad (4.3.6.1.)$$

Donde

$$\phi(L, p) = 1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p, \quad \beta(L, q) = 1 - \beta_1 L - \beta_2 L^2 - \dots - \beta_q L^q$$

para  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ,  $u_t \sim iid(0, \delta^2)$

$L$  es un operador de rezago tal que  $L^0 y_t = X_t$ ,  $L^1 y_t = y_{t-1}$ , y  $w_t$  es un vector  $s \times 1$  de variables deterministas como el intercepto, tendencias, *dummies* estacionales o variables exógenas con rezagos fijos.  $p = 0, 1, 2, \dots, m$ ,  $q = 0, 1, 2, \dots, m$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ : es decir, un total de  $(m + 1)^{k+1}$  modelos ARDL diferentes. El orden de rezago máximo,  $m$ , se elige por el usuario. Período de muestra,  $t = m + 1, m + 2, \dots, n$ .

O también, el modelo ARDL( $p, q$ ) se puede especificar como sigue:

$$\phi(L)y_t = \varphi + \theta(L)x_i + u_t \quad (4.3.6.2.)$$

Donde,

$$\begin{aligned} \phi(L) &= 1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p \\ \theta(L) &= \beta_0 - \beta_1 L - \dots - \beta_q L^q \end{aligned}$$

Por lo tanto, el modelo general de ARDL  $(p, q_1, q_2, \dots, q_k)$  quedaría como de la siguiente manera:

$$\phi(L)y_t = \varphi + \theta_1(L)x_{1t} + \theta_2(L)x_{2t} + \theta_k(L)x_{kt} + u_t \quad (4.3.6.3.)$$

Usando el operador de retardo  $L$  aplicado a cada componente de un vector,  $L^k y = y_{t-k}$ , es conveniente definir el polinomio de rezago  $\Phi(L, p)$  y el polinomio vectorial  $\beta(L, q)$ .

Siempre que se pueda suponer que el término de error  $u_t$  es un proceso de ruido blanco, o generalmente, es estacionario e independiente de  $y_t, y_{t-1}, \dots$  y  $x_t, x_{t-1}, \dots$ , los modelos ARDL se pueden estimar consistentemente por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, *por sus siglas en inglés*).

#### **4.3.6.1 Requisitos para la aplicación del modelo autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL) para las pruebas de cointegración.**

- Independientemente de si las variables subyacentes son  $I(0)$  o  $I(1)$  o una combinación de ambas, se puede aplicar la técnica ARDL. Esto ayuda a evitar los problemas de prueba previa asociados con el análisis de cointegración estándar que requiere la clasificación de las variables en  $I(0)$  e  $I(1)$ . Esto significa que el procedimiento ARDL no requiere la prueba previa de raíces unitarias de las variables incluidas en el modelo y es robusto cuando hay una sola relación de largo plazo entre las variables subyacentes.
- Si las *estadísticas-F* (prueba de Wald) establecen que existe una única relación de largo plazo y el tamaño de los datos de muestra es pequeño o finito, la representación de corrección de errores ARDL se vuelve relativamente más eficiente.
- Si el *estadístico-F* (prueba de Wald) establece que existen múltiples relaciones a largo plazo, no se puede aplicar el enfoque ARDL. Por lo tanto, se puede aplicar un enfoque alternativo como el de Johansen y Juselius (1990). Es decir, si las diversas expresiones o ecuaciones individuales de la variable individual subyacente como variable

dependiente muestran un efecto de retroalimentación (relaciones múltiples a largo plazo) entre las variables, entonces se debe emplear un procedimiento multivariado.

- Si la traza o el valor propio máximo o el *estadístico-F* establecen que existe una única relación a largo plazo, se puede aplicar el enfoque ARDL en lugar de aplicar el enfoque de Johansen y Juselius.

#### **4.3.6.2. Ventajas del enfoque ARDL.**

- Dado que cada una de las variables subyacentes se presenta como una sola ecuación, la endogeneidad es un problema menor en la técnica ARDL porque está libre de correlación residual (es decir, se supone que todas las variables son endógenas). Además, nos permite analizar el modelo de referencia.
- Cuando existe una única relación de largo plazo, el procedimiento ARDL puede distinguir entre variables dependientes y explicativas. Es decir, el enfoque ARDL asume que solo existe una única relación de ecuación de forma reducida entre la variable dependiente y las variables exógenas (Pesaran, Shin, & Smith, 2001).
- La principal ventaja de este enfoque radica en su identificación de los vectores de cointegración donde hay múltiples vectores de cointegración.
- El modelo de corrección de errores (ECM) se puede derivar del modelo ARDL a través de una transformación lineal simple, que integra ajustes a corto plazo con equilibrio a largo plazo sin perder información a largo plazo. El modelo ECM asociado toma una cantidad suficiente de rezagos para capturar el proceso de generación de datos en modelos específicos.

#### **4.3.6.3. Pasos del enfoque de cointegración ARDL.**

En este apartado explicaremos de manera general como funciona aplicar la metodología si se cumplen los apartados anteriores.

##### *Paso 1. Determinación de la existencia de relaciones de largo plazo entre las variables.*

En la primera etapa, se prueba la existencia de una relación de largo plazo entre las variables que se investigan calculando el *estadístico-F* (prueba de cointegración) para establecer una relación de largo plazo entre las variables. El *estadístico-F* ligado se lleva a cabo en cada una de las variables tal como se

presentan como variables endógenas, mientras que otras se asumen como variables exógenas.

En la práctica, probar la relación entre la(s) variable(s) en el modelo ARDL conduce a la prueba de hipótesis de la relación a largo plazo entre las variables subyacentes. Al hacer esto, los valores actuales de la(s) variable(s) subyacente(s) se excluyen del enfoque del modelo ARDL para la Cointegración. Este enfoque se ilustra utilizando una regresión ARDL  $(p, q)$  con un regresor  $I(d)$ , como se ejemplifica a continuación:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_0 x_t + \theta_1 x_{t-1} \dots + q_1 x_{t-p} + u_{1t}$$

o

$$x_t = \phi_2 x_{t-1} + \dots + \phi_p x_{t-p} + \theta_0 y_t + \theta_1 y_{t-1} \dots + q_1 y_{t-p} + u_{2t} \quad (4.3.6.3.1.)$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad \mu_t \sim iid(0, \delta^2)$$

Por conveniencia no se incluyen los regresores determinísticos como son la constante y tendencia lineal. Donde  $\phi$ ,  $\theta_0$  y  $\theta_1$  son parámetros desconocidos y  $x_t$  o  $y_t$  son de procesos  $I(d)$  generados por:

$$x_t = x_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{o} \quad y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.3.6.3.2.)$$

Los términos  $u_t$  y  $\varepsilon_t$  no están correlacionados para todos los rezagos, de modo que  $x_t$  o  $y_t$  son estrictamente endógenas respecto de  $u_t$ .  $\varepsilon_t$  es un proceso estacionario lineal.

Condición de estabilidad del proceso de cointegración  $|\phi| < 1$ , para que el modelo sea dinámicamente estable. Esta suposición es similar a la condición de estacionariedad para un proceso  $AR(1)$  e implica que existe una relación estable a largo plazo entre  $x_t(y_t)$  y  $y_t(x_t)$ . Si  $\phi = 1$ , entonces no existe relación de largo plazo. En la práctica, esto se puede denotar como sigue:

El enfoque del modelo ARDL  $(p, q_1, q_2, \dots, q_k)$  para las pruebas de cointegración:

$$\Delta X_t = \delta_{0i} + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta X_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_2 \Delta Y_{t-i} + \delta_1 X_{t-1} + \delta_2 Y_{t-1} + v_{1t} \quad (4.3.6.3.3.)$$

$$\Delta Y_t = \delta_{0i} + \sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta Y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \alpha_2 \Delta X_{t-i} + \delta_1 Y_{t-1} + \delta_2 X_{t-1} + v_{1t} \quad (4.3.6.3.4.)$$

Donde  $k$  es el orden de rezago máximo del modelo ARDL a elegir. El estadístico  $F$  se realiza sobre la hipótesis nula conjunta de que los coeficientes de las

variables rezagadas  $(\delta_1 X_{t-1}, \delta_1 Y_{t-1} \text{ o } \delta_2 Y_{t-1}, \delta_2 X_{t-1})$  son cero.  $(\delta_1 - \delta_2)$  corresponden a la relación de largo plazo, mientras que  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  representan la dinámica de corto plazo del modelo. Se procede a probar la hipótesis de que los coeficientes de las variables rezagadas son cero.

Por lo tanto, la no existencia de relación a largo plazo está definida por:

$H_0 = \delta_1 = \delta_2 = 0$  (no existe relación a largo plazo)

$H_1 = \delta_1 \neq \delta_2 \neq 0$  (existe relación a largo plazo)

Esto se prueba en cada uno de los modelos según lo especificado por el número de variables. De igual forma, esto también se puede denotar de la siguiente manera:

$$F_X(X_1|Y_1, \dots, Y_k) \quad (4.3.6.3.5.)$$

$$F_Y(Y_1|X_1, \dots, X_k) \quad (4.3.6.3.6.)$$

La hipótesis se verifica mediante el *estadístico-F (Wald test)* en la **Ecuación (4.3.6.3.5.)** y **(4.3.6.3.6.)**, respectivamente. La distribución del *estadístico-F* no es estándar, independientemente de si las variables en el sistema son  $I(0)$  o  $I(1)$ . Los valores críticos del *estadístico-F* para diferentes números de variables ( $K$ ), y si el modelo ARDL contiene un intercepto y/o una tendencia se pueden consultar en (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). Ellos, dan dos conjuntos de valores críticos. Un conjunto suponiendo que todas las variables son  $I(0)$ , lo que significa que no hay cointegración entre las variables subyacentes y otro suponiendo que todas las variables del modelo ARDL son  $I(1)$ , lo que significa que existe una cointegración entre las variables subyacentes. Para cada aplicación, existe una banda que cubre todas las clasificaciones posibles de las variables en  $I(0)$  e  $I(1)$ . Sin embargo, según (Narayan P. , 2005) los valores críticos existentes en (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) no se puede aplicar a tamaños de muestra pequeños, ya que se basan en tamaños de muestra grandes. Por lo tanto, (Narayan P. , 2005) en el *Apéndice* de su trabajo, proporciona un conjunto de valores críticos para tamaños de muestra pequeños, que van desde 30 a 80 observaciones.

Si el *estadístico-F* calculado relevante para la significancia conjunta de las variables de nivel en cada una de las **Ecuaciones (4.3.6.3.3.)** y **(4.3.6.3.6.)**,  $\delta_1$  y  $\delta_2$  cae fuera de esta banda, se puede tomar una decisión concluyente, sin necesidad de saber si el valor subyacente las variables son  $I(0)$  o  $I(1)$ , o integradas fraccionadamente.

Es decir, cuando el *estadístico-F* calculado es mayor que el valor crítico del límite superior se rechaza la  $H_0$  (existe cointegración entre las variables). Si el

*estadístico-F* está por debajo del valor crítico del límite inferior, entonces no se puede rechazar la  $H_0$  (no hay cointegración entre las variables). Si existen relaciones de largo plazo (o múltiples relaciones de largo plazo) en ambas **Ecuaciones (4.3.6.3.5.)** y **(4.3.6.3.6.)**, no se puede aplicar el enfoque ARDL, por lo que el enfoque de (Johansen & Juselius, 1990) se convierte en la alternativa.

Si la estadística calculada cae dentro (entre el límite superior e inferior) de la banda de valores críticos, el resultado de la inferencia no es concluyente y depende de si las variables subyacentes son  $I(0)$  o  $I(1)$ . Es en esta etapa del análisis, en donde se considera conveniente realizar pruebas de raíces unitarias sobre las variables (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). Además, si las variables son  $I(2)$ , los *estadísticos-F* calculados de la prueba de límites se invalidan porque se basan en la suposición de que las variables son  $I(0)$  o  $I(1)$  o están mutuamente cointegradas (Chigusiwa, Bindu, Mudavanhu, Muchabaiwa, & Muzambani, 2011).

*Paso 2. Elección de la longitud de rezago adecuada para el modelo ARDL y Estimación de las estimaciones a largo plazo del modelo ARDL seleccionado.*

Si existe una relación de largo plazo entre las variables subyacentes, mientras que la hipótesis de que no existencia de relaciones de largo plazo entre las variables, en las otras ecuaciones no puede rechazarse, entonces se puede aplicar el enfoque ARDL para la cointegración. La cuestión de encontrar la longitud de rezago adecuada para cada una de las variables en el modelo ARDL es muy importante ya que se busca tener términos de error gaussianos (es decir, términos de error normal estándar que no sufran de no normalidad, autocorrelación, heterocedasticidad, etc.).

Po lo anterior, es necesario determinar la longitud de retardo óptima ( $k$ ) mediante el uso de criterios de selección de orden de modelo adecuados, tales como; el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio bayesiano de Schwarz (SBC) o el criterio de Hannan-Quinn (HQC).

Los valores de AIC, SBC y HQC para el Modelo de la **Ecuación (4.3.6.3.)** de ARDL están dados de la manera siguiente:

$$AIC_p = -\frac{n}{2(1 + \log 2\pi)} - \frac{n}{2 \log \delta^2} - P$$

$$SBC_p = \log(\delta^2) + (\log(n) / n)P$$

$$HQC = \log(\delta) + \left( 2 \log \left( \frac{\log(n)}{n} \right) \right) P$$

$$LR_{p,p} = n(\log[\hat{\Sigma}_p] - \log[\hat{\Sigma}_p])$$

Donde  $\delta^2$  es el estimador de Máxima Verosimilitud (ML) de la varianza de las perturbaciones de regresión.  $\hat{\sum p}$  es el valor estimado de la suma de residuales al cuadrado, y  $n$  es el número de parámetros a estimar,  $p=0,1,2, \dots, P$  donde  $P$  es el orden óptimo del modelo seleccionado.

El modelo ARDL debe estimarse con las variables en su forma de niveles (datos no diferenciados). Se deben alternar los rezagos de las variables, reestimar el modelo y comparar. Criterios de selección del modelo: el modelo con las estimaciones más pequeñas de AIC, SBC o con los errores estándar más pequeños y un  $R^2$  alta tienen un rendimiento relativamente mejor. Los estimadores con el mejor rendimiento se convierten en los coeficientes de largo plazo.

Los coeficientes de largo plazo para  $y_t$  frente un cambio marginal en  $x_t$ , y viceversa, se estiman de la manera siguiente:

$$\hat{\theta}_i = \frac{\hat{\beta}_i(1, \hat{q}_i)}{\hat{\phi}(1, \hat{p})} = \frac{\hat{\beta}_{i0} + \hat{\beta}_{i1} + \dots + \hat{\beta}_{iq}}{1 - \hat{\phi}_1 - \hat{\phi}_2 - \dots - \hat{\phi}_p} ; \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4.3.6.3.7.)$$

Donde  $\hat{p}$  y  $\hat{q}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  son los valores seleccionados estimados de  $p$  y  $q$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

De manera similar, los coeficientes de largo plazo asociados con las variables deterministas/exógenas con rezagos fijos son estimados por;

$$\hat{\psi} = \frac{\hat{\delta}(\hat{p}, \hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_k)}{1 - \hat{\phi}_1 - \hat{\phi}_2 - \dots - \hat{\phi}_p} \quad (4.3.6.3.8.)$$

Donde  $\hat{\delta}(\hat{p}, \hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_k)$  denota la estimación OLS de  $\delta$  en **Ecuación (4.3.6.1.)** para el modelo ARDL seleccionado. En la práctica, se puede formular como sigue:

$$Y_t = \delta_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_1 X_{1t} + \sum_{i=1}^k \alpha_2 X_{2t} + \sum_{i=1}^k \alpha_3 X_{3t} + \sum_{i=1}^k \alpha_n X_{nt} + v_{1t} \quad (4.3.6.3.9.)$$

$X_S(X_{1t}, X_{2t}, X_{3t}, \dots, X_{nt})$  son las variables explicativas de largo plazo,  $k$  es el número de orden de retardo óptimo. El modelo con mejor desempeño proporciona las estimaciones del modelo de corrección de errores (ECM) asociado.

**Paso 3. Reparametrización del modelo ARDL en modelo de corrección de errores (ECM).**

Como se mencionó con anterioridad, cuando se hace una regresión de variables no estacionarias en un modelo, podemos obtener resultados falsos. Una forma

de resolver esto es diferenciar los datos para lograr la estacionariedad de las variables. En este caso, las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión pueden ser correctas y se resuelve el problema de la ecuación espuria. Sin embargo, la ecuación de regresión solo nos da la relación a corto plazo entre las variables. No proporciona ninguna información sobre el comportamiento a largo plazo de los parámetros del modelo. Esto constituye un problema ya que los investigadores están interesados principalmente en las relaciones de largo plazo entre las variables bajo consideración, y para resolver esto, el concepto de cointegración y el ECM se vuelve imperativo. Con la especificación de ECM, ahora tenemos incorporada información de corto y largo plazo.

El ECM no restringido asociado con el modelo ARDL  $(\hat{\rho}, \hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_k)$  puede obtenerse reescribiendo la **Ecuación (4.3.6.1.)** en términos de los niveles rezagados y las primeras diferencias de  $y_t, x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{kt}$  y  $w_t$ . Primero notemos que:

$$y_t = \Delta y_t + y_{t-1}$$

$$y_{t-1} = y_t - \sum_{j=1}^{s-1} \Delta y_{t-j}; \quad s = 1, 2, \dots, p$$

De manera similar,

$$w_t = \Delta w_t + w_{t-1}$$

$$x_t = \Delta x_t + x_{t-1}$$

$$x_{1t-s} = y_{1t-1} - \sum_{j=1}^{s-1} \Delta x_{1t-j}; \quad s = 1, 2, \dots, q_1$$

Si sustituimos estas relaciones en la **Ecuación (4.3.6.1.)** obtenemos:

$$\Delta y_t = -\phi(1, \hat{\rho})EC_{t-1} + \sum_{i=1}^k \beta_{i0} \Delta x_{it} + \delta \Delta w_t - \sum_{j=1}^{p-1} \phi_j \Delta_{t-j} - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\hat{q}_i-1} \beta_{ij} \Delta x_{i,t-j} + \mu_t$$

(4.3.6.3.10.)

$EC_t$  es el término de corrección de error definido por:

$$EC_t = \varepsilon_t = y_t - \sum_{i=1}^k \hat{\theta}_i x_{it} - \psi' w_t$$

El término  $EC_t$  como parámetro de velocidad de ajuste o efecto de retroalimentación se deriva como término de error de los modelos de cointegración (**Ecuaciones (4.3.6.3.3.)** y **(4.3.6.3.4.)**) cuyos coeficientes se obtienen normalizando la ecuación en  $X_t$  **(4.3.6.3.3.)** y  $Y_t$  **(4.3.6.3.4.)**, respectivamente.  $EC_t$  muestra cuánto del desequilibrio se está corrigiendo, es

decir, en qué medida se está ajustando cualquier desequilibrio en el período anterior en  $Y_t$ .

Un coeficiente positivo indica divergencia (proceso explosivo), mientras que un coeficiente negativo indica convergencia. Si la estimación de  $EC_t = 1$ , entonces el 100% del ajuste se realiza dentro del período, o el ajuste es instantáneo y total. Si la estimación de  $EC_t = 0.5$ , entonces el 50% del ajuste se realiza cada período o año.  $EC_t = 0$ , muestra que no hay ajuste, y por lo tanto afirmar que existe una relación de largo plazo ya no cobra sentido.

Recuerde que  $\phi(1, \hat{\rho}) = 1 - \hat{\phi}_1 - \hat{\phi}_2 - \dots - \hat{\phi}_p$  mide la importancia cuantitativa del término de corrección de error. Los coeficientes restantes,  $\hat{\phi}_j$  y  $\beta_{ij}$ , se relacionan con la dinámica de corto plazo de la convergencia al equilibrio del modelo.  $EC_t$  son los residuos que se obtienen del modelo de cointegración estimado de las **Ecuaciones (4.3.6.3.3.)** y **(4.3.6.3.4.)**. Los modelos ARDL y su ECM asociados pueden estimarse mediante el método OLS.

#### 4.3.7. Prueba de Causalidad.

Si dos variables  $Y$  y  $X$  están cointegradas, entonces puede existir cualquiera de las 3 relaciones: a)  $X$  afecta a  $Y$ , b)  $Y$  afecta a  $X$ , y c)  $X$  e  $Y$  se afectan entre sí. Los dos primeros muestran una relación unidireccional mientras que el tercero muestra una relación bidireccional. Si dos variables no están cointegradas, entonces una no afecta a la otra y son independientes. Para determinar el patrón de tal relación, (Granger C. , 1969) ha desarrollado un método de prueba de causalidad. Si los valores actuales y rezagados de  $X$  mejoran la predicción del valor futuro de  $Y$ , entonces se dice que  $X$  es causa a  $Y$  en el sentido de "Granger". El modelo simple de causalidad de Granger es el siguiente:

$$\Delta Y_t = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta Y_{t-i} + \sum_{j=1}^p \beta_j \Delta X_{t-j} + u_{1t} \quad (4.3.7.1.)$$

$$\Delta X_t = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta X_{t-i} + \sum_{j=1}^p \delta_j \Delta Y_{t-j} + u_{2t} \quad (4.3.7.2.)$$

La **Ecuación (4.3.7.1.)** muestra que el valor actual de  $\Delta Y$  está relacionado con los valores pasados de sí mismo y los valores pasados de  $\Delta Y$ . Del mismo modo, la **Ecuación (4.3.7.2.)** postula que  $\Delta X$  está relacionado con los valores pasados de sí mismo y de  $\Delta X$ . La  $H_0$  en la **Ecuación (4.3.7.1.)** es  $\beta_j = 0$  lo que significa, " $\Delta X$  no causa en el sentido de Granger a  $\Delta Y$ ". De manera similar, la  $H_0$  en la **Ecuación (4.3.7.2.)** es  $\delta_j = 0$  y denota que " $\Delta Y$  no causa en el sentido de Granger a  $\Delta X$ ". El rechazo o no rechazo de la hipótesis nula se basa en el estadístico de prueba  $F$ .

Retomando el método ARDL, esta prueba la existencia o ausencia de una relación de cointegración entre variables, pero no la dirección de la causalidad. Si no encontramos ninguna evidencia de cointegración entre las variables, entonces la especificación de la prueba de causalidad de Granger será un vector autorregresivo (VAR) en forma de primera diferencia. Sin embargo, si encontramos evidencia de cointegración, entonces necesitamos aumentar el modelo de prueba de causalidad de Granger con un término de corrección de error rezagado en un período ( $ECT_{t-1}$ ). Este es un paso importante porque (Engle & Granger, 1987) advierten que, si las series están integradas de orden uno, en presencia de cointegración, la estimación de un VAR en primeras diferencias pudiera tener resultados engañosos.

La forma aumentada de la prueba de causalidad de Granger con ECM se formula en un modelo multivariado de vectores de ECM (VECM) de orden  $q$ . El VECM nos permite capturar la causalidad de Granger tanto de corto como de largo plazo. Los efectos causales a corto plazo se pueden obtener mediante la prueba F de las variables explicativas rezagadas, mientras que las estadísticas t sobre el coeficiente del término de corrección del error rezagado indican la importancia del efecto causal a largo plazo.

#### 4.4. Pruebas de diagnóstico para modelos de series de tiempo

Para que el modelo estimado sea robusto e imparcial, necesitamos determinar la aptitud del modelo mediante la verificación de las estadísticas de bondad de ajuste y la realización de pruebas de diagnóstico.

##### 4.4.1. Bondad de Ajuste.

Se puede obtener una impresión aproximada de la solidez de los coeficientes estimados de la regresión examinando qué tan bien la línea de regresión explica los datos, si existe una correlación serial en los residuos y si el modelo general es significativo, entre otros. Los valores de la prueba de bondad de ajuste se muestran junto con los coeficientes estimados por casi todos los tipos de software.

Las pruebas comunes de bondad de ajuste incluyen la  $R^2$ , que muestra una correlación en el caso bivariado y, por lo tanto, el valor más cercano a 1 se considera mejor. En una regresión multivariada, se elige  $R^2$  *ajustada* en lugar de  $R^2$ . La  $R^2$  aumenta con el aumento en el número de variables, mientras que  $R^2$  *ajustada* aumenta solo cuando la nueva variable mejora el poder de predicción. Las estadísticas de Durbin Watson (DW) indican si existe una autocorrelación en los residuos. Si el valor de DW está cerca de 2, se considera que el modelo está "libre de autocorrelación".

#### **4.4.2. Pruebas de Diagnóstico.**

Las pruebas de diagnóstico nos informan sobre la solidez de los coeficientes estimados. Las estadísticas de las pruebas de diagnóstico generalmente no son reportadas automáticamente por el software o lenguaje de programación que se utilice y, por lo tanto, deben estimarse por separado. El tipo de prueba de diagnóstico depende de la técnica de modelado que se utilice. Sin embargo, los tipos más comunes de pruebas de diagnóstico son la estructura de rezagos, el diagnóstico de coeficiente y el diagnóstico residual. El diagnóstico de los residuales es la parte más crucial de las pruebas de diagnóstico en el modelado económico, ya que los modelos de regresión intentan minimizar los errores (o residuos). Los términos de error deben ser ruido blanco (variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, i.i.d.) con media cero y varianza finita.

Los diagnósticos de residuales examinan si los términos de error son i.i.d. La prueba del Multiplicador de Lagrange (LM), el correlograma y la prueba de heterocedasticidad son los principales métodos de prueba para el diagnóstico de residuales. Los diagnósticos de estabilidad examinan si los parámetros del modelo estimado son estables en varias submuestras de los datos.

En conclusión, dadas las deficiencias asociadas con el procedimiento de cointegración estándar de (Johansen & Juselius, 1990), se vuelve imperativo explorar (Pesaran, Smith, & Shin, 1996b) (Pesaran & Shin, 1995) (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) quienes propusieron el enfoque Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) para la cointegración. Algunas de las deficiencias incluyen: identificar los vectores de cointegración donde hay múltiples relaciones de cointegración; aplicabilidad cuando existe un vector cointegrante de diferente orden. Con base en esto, fue que se procedió a mencionar el enfoque ARDL para las pruebas de cointegración en términos de su aplicación, estimación e interpretación.

## Capítulo 5. Especificación del Modelo

### 5.1 Selección de la base de datos y descripción de las variables

El objetivo principal de este proyecto de investigación es examinar la relación entre el desarrollo humano (IDH), la generación de electricidad por fuentes renovables (GREN) y no renovables (GNREN), el desarrollo económico (PIB) y la contaminación medioambiental (CO<sub>2</sub>).

En el presente estudio la selección de las variables se realizó con base en la consulta de la revisión literaria del nexo energía-economía-medioambiente la cual contiene variables similares. Además, se decidió incorporar al análisis, indicadores que puedan representar la *dimensión social* del desarrollo sostenible, una de las principales aportaciones del presente proyecto de investigación. De tal manera, que se pueda realizar un análisis integral del papel que juega el desarrollo energético y su relación con el ámbito económico, social y medioambiental, y con esto evaluar los efectos e implicaciones de corto y largo plazo de la política energética en el desarrollo sostenible.

Este trabajo emplea observaciones anuales que cubren el período de 1985 al 2021 para todas las series de tiempo. La elección del período inicial y final se vio limitada por la disponibilidad de observaciones sobre la producción (generación) de electricidad seccionada por fuentes de energía renovables, así como del Índice de Desarrollo Humano. Por lo anterior, este estudio utiliza como variables *proxy* para medir el desempeño económico de México, el Producto Interno Bruto (PIB). Se utilizaron las Emisiones de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) como *proxy* de carácter ambiental. La producción de electricidad considera la generación de electricidad seccionada por fuentes de energías renovables (GREN) y no renovables (GNREN). Como se mencionó en el apartado 1.6.4. del capítulo 1, el concepto de energías limpias y renovables no es el mismo. El primero tiene una connotación local y el segundo es de carácter más internacional. Para fines de este análisis, adoptaremos el segundo término al referirnos por energías renovables a las provenientes del sol, viento, hidroeléctrica, geotermia, nuclear, biomasa y residuos. Las energías no renovables serán las destinadas a la generación de electricidad provenientes del carbón, petróleo y gas natural.

Por último, los indicadores utilizados para medir el carácter social del presente análisis están dados por el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Ver **Tabla 5.1.** para mayor información sobre las variables en relación a sus respectivas unidades de medida, fuentes y explicación.

**Tabla 5.1.**

*Unidades de medida y explicación de datos*

<b>Variable</b>	<b>Acrónimo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Explicación</b>	<b>Fuente</b>
<b>Emisiones de Dióxido de Carbono per cápita</b>	CO <sub>2</sub>	Millones de toneladas	Las emisiones de carbono son las provenientes del consumo de petróleo, gas y carbón para actividades relacionadas con la combustión, y se basan en los "Factores de emisión de CO <sub>2</sub> predeterminados para la combustión" enumerados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en sus Directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (2006).	Revisión estadística de la energía mundial 1965-2021, <i>British Petroleum</i> <a href="https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html">https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html</a>
<b>Producto interno bruto per cápita</b>	PIB	Precios constantes de 2015, expresados en dólares estadounidenses	El PIB per cápita es el producto interno bruto dividido por la población a mitad de año. El PIB es la suma del valor agregado bruto de todos los productores residentes en la economía más los impuestos sobre los productos y menos los subsidios no incluidos en el valor de los productos. Se calcula sin hacer deducciones por depreciación de bienes fabricados o por agotamiento y degradación de los recursos naturales.	Cuentas nacionales del Banco Mundial. <a href="https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD">https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD</a>
<b>Generación de electricidad por fuentes de energía</b>	GREN	Kilowatt horas	Generación de electricidad basada en la producción bruta proveniente de fuentes de energía como son la eólica, la geotérmica, la solar, la biomasa y residuos, hidroeléctrica y nuclear.	Revisión estadística de la energía mundial 1965-2021, <i>British Petroleum</i> <a href="https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-">https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-</a>

<b>renovables per cápita</b>				<a href="https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html">economics/statistical-review-of-world-energy.html</a>
<b>Generación de electricidad por fuentes de energía no renovables per cápita</b>	GNREN	Kilowatt horas	Generación de electricidad basada en la producción bruta proveniente de fuentes de energía como el carbón, petróleo y gas natural.	Revisión estadística de la energía mundial 1965-2021, British Petroleum <a href="https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html">https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html</a>
<b>Índice de desarrollo humano</b>	IDH	Índice	Índice compuesto que mide el logro promedio en tres dimensiones básicas del desarrollo humano: una vida larga y saludable, conocimiento y un nivel de vida digno.	Centro de datos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <a href="https://hdr.undp.org/en/indicators/137506#">https://hdr.undp.org/en/indicators/137506#</a>

Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar, que la información histórica del IDH solo se encuentra disponible a partir de 1990 al cierre del 2021. Lo anterior, implicó que al correr el modelo econométrico con las demás variables algunas pruebas de raíces unitarias y de cointegración arrojaron resultados no concluyentes, así como pruebas de diagnóstico con significancia débil. Por lo antes expuesto, fue necesario completar únicamente la serie del IDH de 1985 a 1989. Para ello se realizó extrapolación aplicando los cambios relativos observados de 1990 a 1995. Con esto, se pudo ampliar la muestra cinco años más hacia atrás y realizar nuevamente el análisis a partir de 1985 al 2021 para todas las variables. Al incrementar el tamaño de la muestra a 37 observaciones, los estimadores empleados para el cálculo de las estadísticas de prueba son más precisos (presentan menor error estándar) y con ello se robustecen las conclusiones obtenidas de las distintas pruebas estadísticas.

Los datos considerados se transforman en forma logarítmica pues de esta manera se obtienen mejores resultados, eficientes y consistentes (Ahmad & Du, 2017). La forma logarítmica de los datos no solo suaviza los datos para que sus primeras diferencias se aproximen a sus tasas de crecimiento, sino que también supera el problema de la heterocedasticidad (Boutabba, 2014). Además, todas las series de tiempo (excepto por el IDH) en el conjunto de datos se dividen por la población total para obtener la unidad per cápita para capturar las interacciones entre el desarrollo de la población humana y el medio ambiente, así como para fines de comparabilidad en estudios posteriores. Usamos la notación  $\ln$  delante de cada variable para indicar el logaritmo natural y  $\Delta$  delante de cada variable para indicar la primera diferencia de ellas. Además, debe reconocerse que el número de observaciones es limitado, lo que se agrava por la posible presencia de cambios estructurales en las series (Maddala & Kim, 1999). Por desgracia, no existen series consistentes más largas para el caso mexicano. Por tal motivo, se aplicaron pruebas para cambios estructurales y así robustecer el análisis.

Una vez descritas las variables a tratar, se procede a diseñar el modelo para este estudio como sigue:

### **Modelo de Desarrollo Social**

$$IDH_t = f(PIB_t, GLIMP_t, GNREN_t, CO2_t) \quad (5.1.1.)$$

Ahora, se procede a especificar el modelo y estimarlo en forma logarítmica, como sigue:

$$\ln IDH_t = \beta_0 + \beta_1 \ln PIB_t + \beta_2 \ln GLIMP_t + \beta_3 \ln GNREN_t + \beta_4 \ln CO2_t + \varepsilon_t \quad (5.1.2.)$$

### **5.2. Cointegración**

El hecho de que dos variables diferentes estén cointegradas o no tiene implicaciones sustancialmente diferentes sobre cómo se debe llevar a cabo el procedimiento de prueba para probar la causalidad entre ellas. En vista de esto, la prueba de cointegración es un procedimiento de prerrequisito para la prueba de causalidad.

En el presente estudio utilizaremos el método autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL) o prueba de límites de (Pesaran, Shin, & Smith, 2001), el cual se reconoce como uno de los métodos más flexibles en el análisis econométrico del nexo energía-crecimiento, particularmente cuando el marco de investigación está conformado por cambios de régimen y choques. Además, el enfoque ARDL es más

confiable para muestras pequeñas, como la del presente estudio ( $n=36$ ). Por lo anterior, se procede a especificar el modelo de desarrollo social ARDL no restringido:

ARDL – Desarrollo Social

$$\ln IDH_t = \alpha + \beta_1 \ln IDH_{t-1} + \beta_2 \ln PIB_t + \beta_3 \ln PIB_{t-1} + \beta_4 \ln GLIMP_t + \beta_5 \ln GLIMP_{t-1} + \beta_6 \ln GNREN_t + \beta_7 \ln GNREN_{t-1} + \beta_8 \ln CO2_t + \beta_9 \ln CO2_{t-1} + \varepsilon_t$$

(5.2.1.)

### 5.3. Causalidad

La presencia de relaciones de largo plazo entre las variables no provee información acerca de los efectos de causalidad entre ellas. Por tal motivo, se utiliza la prueba de (Engle & Granger, 1987) para analizar el curso de la causalidad entre las variables.

El enfoque de Granger funciona de tal manera que si, en una serie de datos de tiempo,  $\delta t$  es una posible causa de la otra serie de tiempo  $\beta t$  y si los valores previos de  $\delta t$ 's están contribuyendo en el pronóstico de  $\beta t$ , entonces podemos concluir que  $\delta t$  causa en sentido de Granger a  $\beta t$ . La dirección de la causalidad de  $\beta t$  a  $\delta t$  también se puede explicar de la misma manera. El modelo de corrección de errores vectoriales (VECM) puede determinar las relaciones de largo y corto plazo entre las variables y este enfoque puede identificar aún más las fuentes causales.

El procedimiento del enfoque de causalidad de Granger VECM se basa en dos pasos, en el primero se calcula el término de corrección del error (ECT) para posteriormente correr el modelo de regresión incluyendo el ECT. Si el valor del ECT es negativo y significativo, indica relación de causalidad en el largo plazo entre las variables. En el segundo paso, se utiliza el estadístico de Wald para calcular la relación de causalidad en el corto plazo. Por lo anterior, procedemos a especificar el modelo de causalidad de Granger VECM con la siguiente ecuación:

$$\Delta IDH_t = \theta_{1i} + \sum_{j=1}^q \theta_{1,1ij} \Delta PIB_{it-j} + \sum_{j=1}^q \theta_{1,2ij} \Delta GREN_{it-j} + \sum_{j=1}^q \theta_{1,3ij} \Delta GNREN_{it-j} + \sum_{j=1}^q \theta_{1,4ij} \Delta IDH_{it-j} + \sum_{j=1}^q \theta_{1,5ij} \Delta CO2_{it-j} + \lambda_{1i} ECT_{it-1} + \mu_{it} \quad (5.3.1)$$

El término de corrección de error o velocidad de ajuste se especifica como:

$$ECT_{it} = \beta_{1i}PIB_{it} + \beta_{2i}CO2_{it} + \beta_{3i}IDH_{it} + \beta_{4i}GLIMP_{it} + \beta_{5i}GNREN_{it} \quad (5.3.2.)$$

La longitud del rezago de la autorregresión ( $q$ ) se establece en dos, y el criterio de información de Schwarz (SIC) lo explica automáticamente. En las ecuaciones el símbolo  $\Delta$  está especificado como un primer operador diferencial en la ecuación,  $\mu$  define el error aleatorio término, y el valor de  $ECT$  representa el término de corrección de error resultante de la relación a largo plazo.

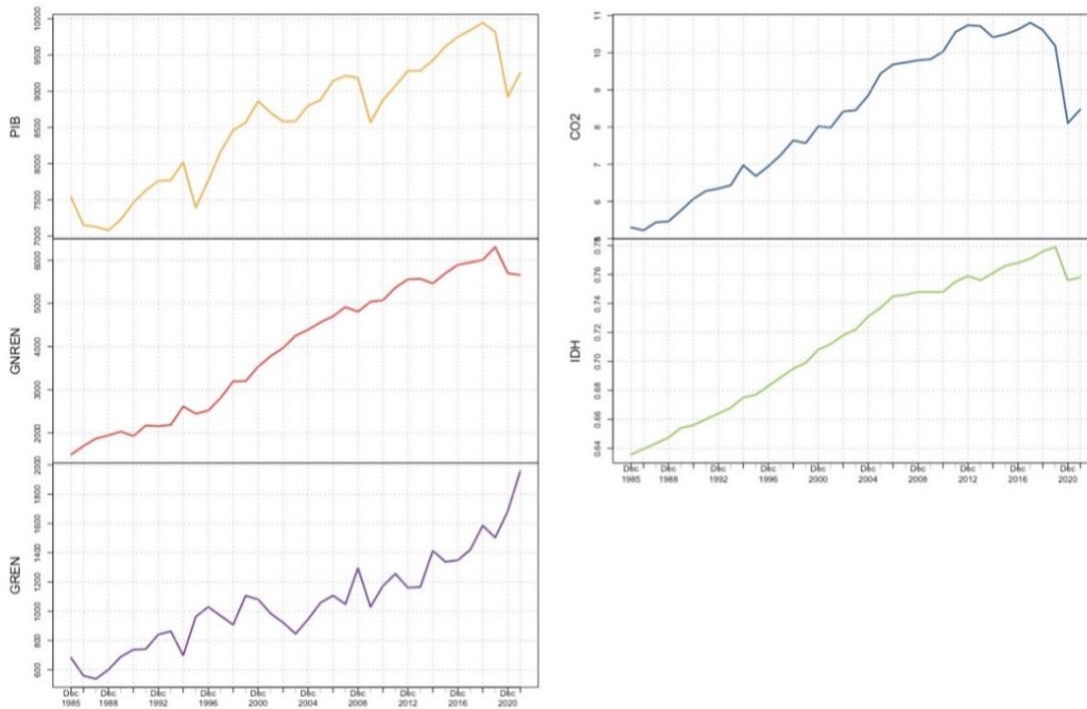
## Capítulo 6. Resultados empíricos y discusión

### 6.1. Análisis exploratorio de los datos

El primer paso en cualquier análisis empírico es una visión general de los datos en sí. En la **Figura 6.1.1.** se presentan las representaciones gráficas de las variables analizadas para proporcionar más explicaciones sobre las características visuales del comportamiento de las series de tiempo. Observamos a lo largo del período bajo escrutinio (1985-2021) casi todas las series presentan una tendencia ascendente a lo largo del tiempo.

**Figura 6.1.1.**

*Representación gráfica de las variables de estudio*



Fuente: elaboración con el lenguaje econométrico R con información de *BP Statistical Review 2022* para las series de GREN, GNREN y CO<sub>2</sub>; así como información del Banco Mundial para el PIB y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo para el IDH.

El CO<sub>2</sub> en el último periodo presenta una caída abrupta, este suceso se puede deber a las acciones de confinamiento llevadas a cabo en México derivado por la pandemia del COVID-19 en donde la actividad económica se vio reducida, este mismo suceso puede explicar las caídas en ese mismo periodo para PIB, GNREN e IDH. Tanto para la producción de electricidad no renovable (GNREN) como la producción de electricidad renovable (GREN) per cápita, ambas producciones han ido aumentando en los últimos años. Sin embargo, al observar desde el año 2012

al 2021 vemos que la curva para GNREN se suaviza hacia una tendencia más estable y la de GREN se observa un repunte hacia el alza en su producción, esto podría deberse a la liberalización del mercado eléctrico con la reforma energética aprobada en el año 2013.

Particularmente, para la serie del PIB y GREN se presentan cambios drásticos esto debido a la posible presencia de cambios estructurales en las series, situación a corroborarse más adelante con las debidas pruebas estadísticas. El impacto de la crisis económica 1994-95 y crisis financiera iniciada en 2008 está presente en las parcelas de los datos. El IDH presenta una curva suave y con tendencia positiva hasta en el periodo del año 2006 al 2019 en donde se observa un cambio de tendencia mucho más estable, seguido de una disminución en el indicador en el año 2020 que podría deberse también a la pandemia.

Conforme a los valores dispuestos en la **Tabla 6.1.1.**, donde se reportan las estadísticas descriptivas de las variables. El promedio más alto se reporta para el PIB y el promedio más bajo para el IDH. Todas las variables muestran un sesgo negativo, excepto por la generación de energías renovables. La variabilidad de los datos en la serie del IDH es casi nula. El valor promedio de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en México es de 8.30 toneladas per cápita anuales. La producción de electricidad per cápita provenientes de fuentes fósiles es aproximadamente 3.5 veces mayor a la producida por energías renovables. Además, tanto el IDH como la generación anual de electricidad per cápita por fuentes no renovables, en el año 2019 alcanzan su valor máximo por 0.77 y 6,305 kWh, respectivamente.

**Tabla 6.1.1.**  
*Descripción estadística de las variables de estudio*

Variables	PIB	GNREN	GREN	CO2	IDH
Observaciones	37	37	37	37	37
Mínimo	7,079.86	1,498.94	537.19	5.22	0.63
Máximo	9,945.78	6,305.78	1,957.24	10.80	0.77
Media	8,560.78	3,958.09	1,060.57	8.30	0.71
Varianza	714,512.40	241,106.20	105,090.80	3.50	0.00
Desviación estándar	861.11	425.37	66.55	0.37	0.05

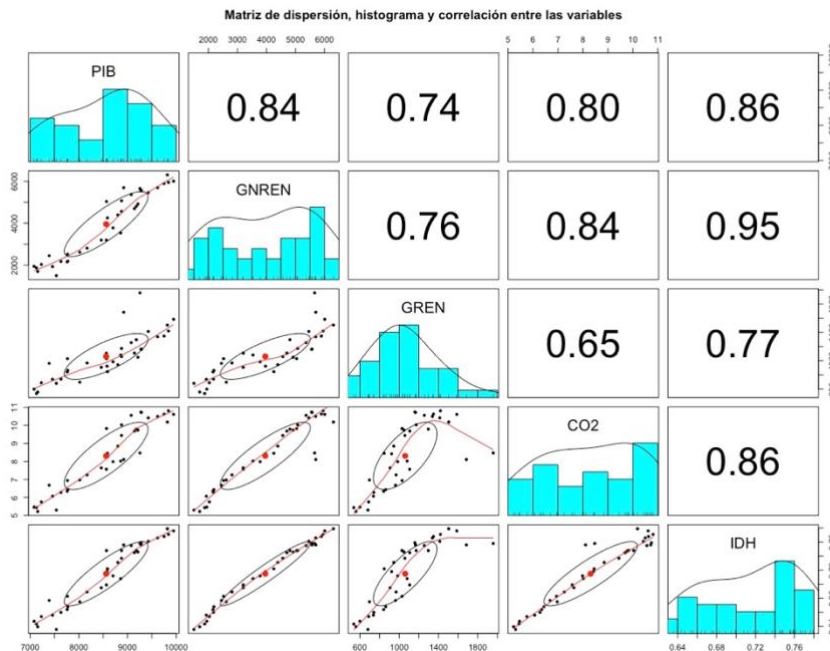
Sesgo	- 0.23	- 0.31	0.01	- 0.26	- 0.22
Curtosis	1.80	1.42	3.01	1.56	1.56

Fuente: elaboración propia con cálculos del lenguaje de programación R.

Ahora bien, para analizar cómo se correlacionan las variables la **Figura 6.1.2.** muestra el resumen de la matriz de dispersión, histograma y correlación de rangos de “kendall” entre las variables de estudio contra sus pares. Dada la naturaleza de las variables, y para medir de manera más objetiva la dependencia, resulta conveniente el uso de correlaciones de rango (Kendall) sobre la correlación lineal (pearson). La evidencia sugiere, una relación positiva fuerte entre todas las variables. El IDH y la GNREN muestran una correlación el PIB tiene una relación fuerte positiva con la GREN y el IDH. La GNREN presenta una correlación alta positiva con el IDH y con las emisiones de dióxido de carbono. El CO<sub>2</sub> tiene una correlación débil con la generación de energías limpias. Resultados de esperarse ya que a mayor consumo de energía por fuentes renovables apoya en la disminución de la huella de carbono.

**Figura 6.1.2.**

*Matriz de correlaciones transversales entre las variables*



Fuente: gráfico realizado con el comando *pairs.panels* del lenguaje de programación R.

El PIB, GNREN, y el IDH muestran distribuciones bimodales sesgadas a la derecha. Mientras que la GREN se distribuye como una normal. Se observa para la serie de CO<sub>2</sub> que los datos se comportan como una distribución asimétrica negativa.

En resumen, se visualiza que tanto para los niveles de producción de electricidad, desarrollo económico y humano, y emisiones de CO<sub>2</sub> han estado creciendo constantemente en el tiempo y altamente correlacionadas.

## 6.2. Resultados de las pruebas de raíces unitarias con cambios estructurales

Como se discutió anteriormente, el procedimiento de prueba de límites ARDL se puede aplicar independientemente de si las variables son  $I(0)$ ,  $I(1)$  (Pesaran & Pesaran, 1997). Sin embargo, según (Ouattara, 2004), en presencia de variables  $I(2)$ , los *estadísticos* –  $F$  calculados proporcionados por (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) dejan de ser válidos. Esto se debe a que la banda de ajuste se basa en la suposición de que las variables deben ser  $I(0)$  o  $I(1)$ . Por lo tanto, la implementación de pruebas de raíces unitarias en el procedimiento ARDL es necesaria para garantizar que ninguna de las variables se integre en un orden de  $I(2)$  o más.

El reconocimiento de rupturas o quiebres estructurales en una serie de tiempo es importante cuando se exploran sus condiciones estacionarias. Como se señala en (Perron, 1989), (Perron, 1990), (Lee & Chang, 2005), el cambio estructural y las raíces unitarias están estrechamente relacionados. Las series de tiempo dadas por fluctuaciones estacionarias alrededor de un nivel constante se describen mejor mediante una caminata aleatoria que una serie de tiempo estacionaria. Las pruebas de raíces unitarias convencionales están entonces sesgadas hacia una raíz unitaria falsa o nula cuando los datos tienen una tendencia estacionaria con un quiebre estructural. Para disminuir este potencial error de identificación, las pruebas de raíces unitarias como la de Perron y Zivot-Andrews, ZA en adelante, incorporan esas interrupciones en los modelos considerando una naturaleza exógena o endógena para el tiempo de ruptura en los datos (Zivot & Andrews, 1992).

Las pruebas estándar de (Dickey & Fuller, 1979) (ADF), (Phillips & Perron, 1988) (PP) y (Elliott, Rothenberg, & Stock, 1996) (ERS) que conducen al no rechazo de una raíz unitaria pueden ser sospechosas cuando la muestra en consideración incorpora eventos económicos capaces de causar cambios de régimen en las series. Por lo anterior, además de aplicar las pruebas estándar ya mencionadas también se aplicará la prueba de raíz unitaria ZA, para tener en cuenta este posible cambio de régimen.

En la **Figura 6.1.1**, las gráficas de las series sugieren que los datos pueden tener un quiebre estructural o más de un quiebre. Sin embargo, las pruebas clásicas de raíces unitarias pueden resultar sospechosas, al no tomar en cuenta posibles quiebres estructurales, estas pueden conducir a una decisión equivocada cuando no se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, también tomamos en cuenta una ruptura estructural cuando empleamos la prueba de raíz unitaria. Como se verá en las **Tablas 6.2.1.1** y **Figura 6.2.1.1**.

### 6.2.1. Identificación de cambios estructurales.

Teniendo en mente las propiedades de las raíces unitarias de las series de tiempo, se procede a comprobar la existencia de cambios estructurales utilizando la metodología de Chao y Bai-Perron (Bai & Perron, 1998), (Bai & Perron, 2003) para conocer las fechas en donde estos choques estructurales ocurren en las series, a ser presentados en la **Tabla 6.2.1.1** y representados gráficamente en la **Figura 6.2.1.1**.

Primero, se procedió a realizar una *prueba-F* (prueba estadística de Chao) para cada variable para probar cambios estructurales en cada serie. Las hipótesis de esta prueba se presentan a continuación:

**H<sub>0</sub>**: no existe cambio estructural en la serie.

**H<sub>1</sub>**: existe cambio estructural en la serie.

Posteriormente con la función genérica *sctest* del paquete “*strucchange*” se procedió a validar cada modelo y conocer el valor de la prueba *estadística-F* así como sus respectivos p-values, en donde bajo un criterio de rechazo de la hipótesis nula del 5% de nivel de significancia se demuestra que todas las series resultaron con presencia de cambios estructurales.

**Tabla 6.2.1.1.**  
*Cambios estructurales en las series*

Variables	PIB	GNREN	GREN	CO2	IDH
Bai & Perron (Prueba F)	118.87	168.64	54.789	52.141	151.70
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rechazo H <sub>0</sub>	Si	Si	Si	Si	Si

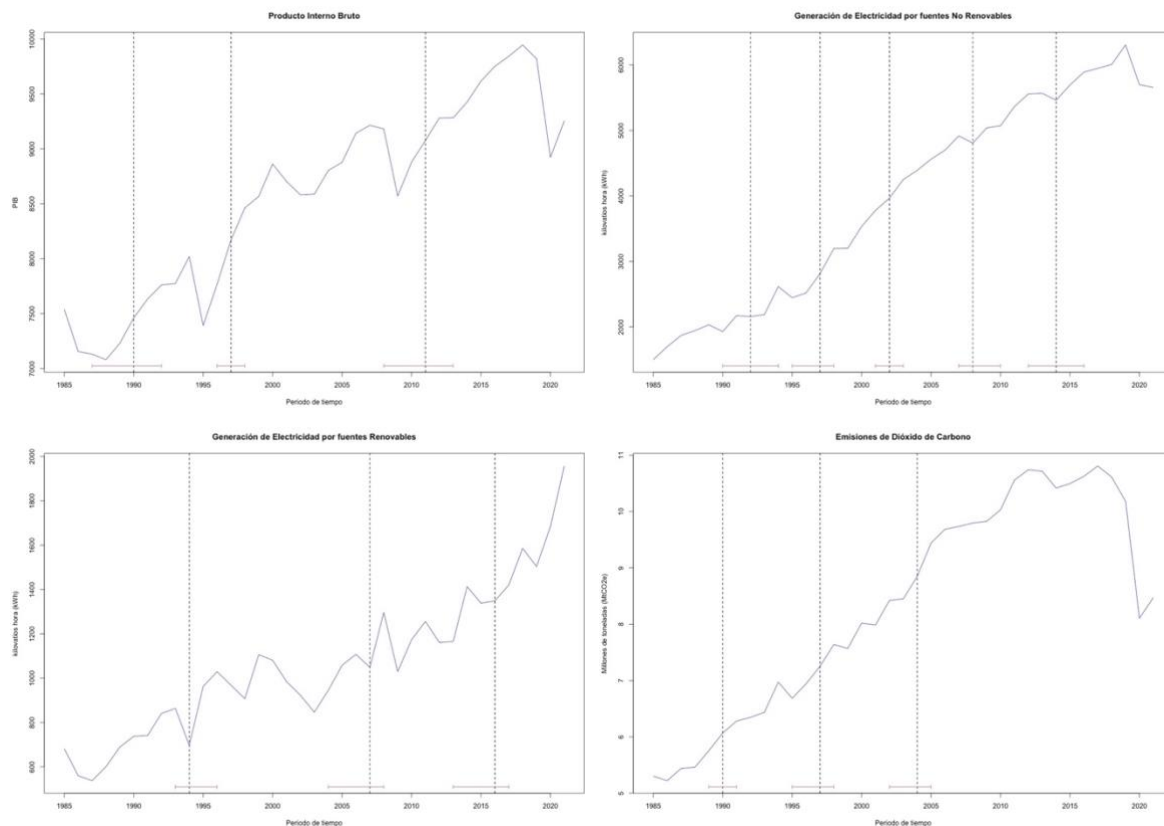
Resultado	Existencia de 3 puntos de quiebre	Existencia de 5 puntos de quiebre	Existencia de 3 puntos de quiebre	Existencia de 3 puntos de quiebre	Existencia de 5 puntos de quiebre
Años con quiebre	1990, 1997 y 2011	1992, 1997, 2002, 2008 y 2014	1994, 2007 y 2016	1990, 1997 y 2004	1989, 1994, 1999, 2004 y 2011

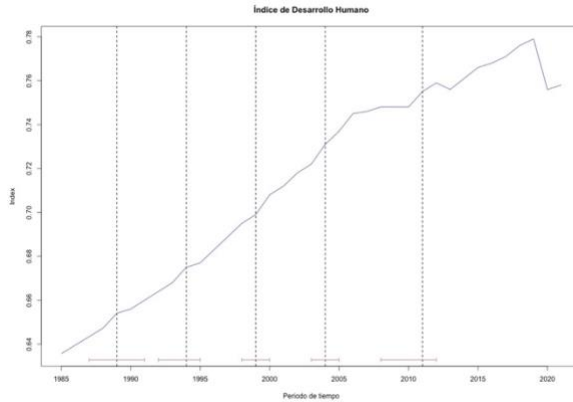
Fuente: elaboración propia con cálculos del programa econométrico R.

Una vez comprobado que las series presentan cambios estructurales, se procedió a conocer las fechas o puntos de quiebre en donde están presentes estos cambios de tendencia. Como se aprecia en la **Tabla 6.2.1.1**, se utilizó el comando *strucchange::breakpoints* para cada variable el cual arroja el número de segmentos óptimos y las fechas donde se presentan los puntos de quiebre.

**Figura 6.2.1.1.**

*Gráfica de las series de tiempo de las variables de estudio con cambios estructurales*





Fuente: elaboración propia con el lenguaje de programación R.

Para la selección óptima del número de puntos de quiebre, se utilizó el valor que minimiza el criterio de información bayesiano (BIC, *por sus siglas en inglés*) y la suma de residuales al cuadrado (RSS, *por sus siglas en inglés*). Una vez detectados los años de quiebre para cada serie, se procedió a graficarlas indicando su presencia mediante una línea negra punteada vertical, así como sus respectivos intervalos de confianza en color rojo.

Notemos que para las series PIB, GNREN y CO<sub>2</sub> exhiben puntos de quiebre en el año 1997 y para las series IDH y GREN ambas coinciden con punto de quiebre en 1994. Esta información resulta relevante al momento de analizar la estacionariedad de las variables, así como la especificación del modelo de cointegración mediante el establecimiento de variables *dummy* en esos posibles años.

### 6.2.2. Pruebas de raíces unitarias.

La prueba de la raíz unitaria se utiliza para determinar la estacionariedad y el grado de integración entre el IDH, la generación de electricidad (GREN y GNREN), las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico. Para el presente estudio, se utilizaron las pruebas de raíces unitarias Dickey-Fuller Aumentado (ADF), Phillips Perron (PP) y Elliott, Rothenberg and Stock (ERS), ampliamente aceptadas para investigar las características de estacionariedad de las series. Además, para lidiar con la posible presencia de cambios estructurales se utilizó la prueba de raíz unitaria Zivot-Andrews (ZA).

**Tabla 6.2.2.1.**  
Pruebas de raíces unitarias

Estadísticos de Prueba						
Variable	Rezagos	ADF	PP	ERS	ZA	Orden de Integración
<b>Niveles</b>						
ln(PIB)	1	-2.4783	-2.7806	-2.7116	-3.7477	
ln(GNREN)	1	0.2949	-0.4222	-0.4031	-2.6260	
ln(GREN)	1	-3.1086	-3.8333**	-3.2347**	-3.7528	
ln(CO <sub>2</sub> )	1	2.0484	0.9335	-0.7631	-1.9999	
ln(IDH)	1	1.1862	0.9575	-0.6138	-2.3387	
<b>Primera diferencia</b>						
Δln(PIB)	0	-6.4141***	-6.4325***	-4.8239***	-6.9165***	I(1)
Δln(GNREN)	0	-6.7603***	-6.8459***	-5.2839***	-9.2095***	I(1)
Δ(GREN)	0	-7.8457***	-8.4594***	-5.4309***	-8.1373***	I(1)
Δln(CO <sub>2</sub> )	0	-5.4499***	-5.4513***	-5.3892***	-10.1342***	I(1)
Δln(IDH)	0	-5.1525***	-5.1503***	-5.2215***	-11.2444***	I(1)

Valores Críticos	1%***	5%**	10%*
ADF	-4.15	-3.50	-3.18
ΔADF	-3.58	-2.93	-2.60
PP	-4.24	-3.54	-3.20
ΔPP	-3.64	-2.95	-2.61
ERS	-3.77	-3.19	-2.89
ΔERS	-2.63	-1.95	-1.62
ZA	-4.93	-4.42	-4.11
ΔZA	-5.34	-4.80	-4.58

Nota: Los asteriscos \*\*\*, \*\* y \* denotan rechazo de la hipótesis nula al 1, 5 y 10% nivel de significancia, respectivamente. Hipótesis nula: series no estacionaria.

Fuente: elaboración propia con apoyo del programa econométrico R.

Empezamos el análisis asegurándonos de que ni una de las series es  $I(2)$  o superior. La **Tabla 6.2.2.1.** presenta los resultados de las pruebas de raíces unitarias ADF, PP, ERS y con cambios estructurales ZA para todas las variables de estudio. Primero se procedió a estimar las variables con constante y tendencia, en correspondencia con las gráficas del análisis exploratorio, y posteriormente en diferencias con constante. Para las variables PIB, GNREN, CO<sub>2</sub> e IDH, los resultados de las pruebas indican que unánimemente todas las variables son estacionarias en primeras diferencias. La serie GREN, en un inicio pudiera ser

integrada de orden  $I(0)$  en un 5% de nivel de significancia, para las pruebas ADF y PP, respectivamente. No obstante, al aplicar la prueba de raíz unitaria con cambios estructurales Zivot-Andrew (ZA) indica que la serie es estacionaria en primera diferencia.

En conclusión, los resultados revelan que la hipótesis nula de la prueba de raíz unitaria, es decir, la no estacionariedad, se acepta para todas las variables en niveles. A medida que convertimos las series en primeras diferencias, la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significación del 1 por ciento. Esto prueba que todas las variables están integradas de orden  $I(1)$ . Por tal motivo, como ninguna de las variables está integrada de orden dos, es decir  $I(2)$ , se procede a realizar el análisis de cointegración bajo el enfoque de Johansen y ARDL para examinar la existencia de una relación de largo plazo en el siguiente apartado.

### 6.3. Análisis de Cointegración

El objetivo del presente estudio es analizar la cointegración de las variables mediante un modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) desarrollado recientemente por (Pesaran, Shin, & Smith, 2001). El ARDL tiene varias ventajas sobre otras técnicas de cointegración como las de (Engle & Granger, 1987) y (Johansen & Juselius, 1990). Primero, se puede aplicar independientemente de si las variables subyacentes son  $I(0)$ ,  $I(1)$  o una combinación de ambas (Pesaran & Pesaran, 1997). En segundo lugar, el procedimiento ARDL es estadísticamente más significativo para determinar la relación de cointegración en muestras pequeñas, como la del presente estudio ( $n = 37$ ) que la técnica de cointegración de Johansen y Juselius (Pesaran & Shin, 1995).

En tercer lugar, incluso cuando algunos de los regresores del modelo son endógenos, el enfoque de banda de ajuste generalmente proporciona estimaciones imparciales a largo plazo y *estadísticos* –  $F$  válidos (Narayan P. , 2005). Cuarto, el modelo toma la cantidad necesaria de rezagos para capturar el proceso de generación de datos en general y modelos específicos (Laurenceson & Chai, 2004). Quinto, el modelo de corrección de errores (ECM) se puede derivar de ARDL a través de una transformación lineal simple, que integra ajustes de corto plazo con equilibrio de largo plazo sin perder información de largo plazo (Pesaran & Shin, 1995). Básicamente, el enfoque ARDL para la cointegración implica dos pasos para estimar la relación a largo plazo. El primer paso es investigar la existencia de una relación de largo plazo entre todas las variables en la ecuación bajo estimación. Si hay evidencia de cointegración entre variables, el segundo paso es estimar los modelos de largo y corto plazo bajo un modelo de corrección de errores (ECM).

No obstante, en la literatura se menciona que, si todas las variables en el análisis se integran de orden uno, se debiera de realizar la prueba de cointegración de Johansen. Por tal motivo y dado los resultados de las pruebas de raíces unitarias se procederá a realizar en primer lugar el procedimiento de Johansen y posteriormente el enfoque ARDL.

### 6.3.1. Cointegración por procedimiento de Johansen.

Una vez seleccionadas las variables siendo estas integradas de orden  $I(1)$ , para determinar si existen relaciones de cointegración entre las variables de crecimiento, desarrollo social, contaminación y las de producción de electricidad, se procede a aplicar el test de Soren Johansen, el cual permite evidenciar si dos o más series de tiempo se mueven en la misma tendencia a lo largo del tiempo, teniendo a su vez estabilidad en las diferencias entre ellas. Así pues, este conjunto de series de tiempo no estacionarias de orden  $I(1)$ , estarán cointegradas si existe una combinación lineal de esas series que sea estacionaria (de orden  $I(0)$ ). Las hipótesis de esta prueba se presentan a continuación:

**H<sub>0</sub>:  $r = 0$** , es decir, no existe presencia de cointegración entre las variables en estudio.

**H<sub>1</sub>:  $r > 0$** , es decir, hay presencia de una relación de cointegración entre las variables.

Para realizar esta prueba en el lenguaje de programación R, se procede a utilizar la función *ca.jo()* que pertenece al paquete “urca”. Para este caso, Johansen presenta dos pruebas que pueden utilizarse (ambas basadas en el criterio de máxima verosimilitud), teniendo por tanto dos posibles estadísticos de prueba (*type*):

- El estadístico de prueba de la traza es introducido en la secuencia  $r = n - 1, \dots, 1, 0$  y verifica la **H<sub>0</sub>** de que el rango de cointegración es  $r$  en contraste a la **H<sub>1</sub>** de que dicho rango es  $n$ .
- El estadístico de prueba del valor propio máximo se efectúa en la secuencia  $r = 0, 1, \dots, n - 1$  y verifica la **H<sub>0</sub>** de que el rango de cointegración es  $r$  en contraste a la **H<sub>1</sub>** de que dicho rango es  $r + 1$ .

El criterio de decisión se basa aplicando el método del valor crítico, al rechazar **H<sub>0</sub> = 0**, se procede nuevamente a hacer el contraste de hipótesis, ahora con **H<sub>0</sub> = 1**,

teniendo  $H_1 = 2$ , y así sucesivamente se repite el proceso hasta que no se rechace  $H_0$ .

Al rechazar  $H_0 = 0$ , se entenderá que las series de tiempo analizadas presentan cointegración y por lo tanto el largo del vector de cointegración lo determinará el valor de que le correspondió a la última  $H_0$  no rechazada.

Aplicando esta metodología, seleccionamos el número de rezagos definiendo un VAR no restringido. Se aplican los criterios de información de Akaike, Schwarz y Hannan-Quinn, que en este caso el número óptimo de rezagos a ser aplicados fue de 2. Posteriormente procedemos a aplicar el procedimiento de Johansen. La **Tabla 6.3.1.1.** presenta los resultados del análisis de cointegración obtenidos aplicando el test de la traza y el del valor propio máximo. Se consideró como variable explicada la relativa al desarrollo humano (IDH) y como variables explicativas las relativas al crecimiento económico (PIB), producción de energía (GREN y GNREN) y contaminación ( $CO_2$ ).

**Tabla 6.3.1.1.**

*Resultados del procedimiento de cointegración de Johansen*

$H_0$	Estadístico de Prueba	10%	5%	1%	Resultado
<b>Prueba de la traza</b>					
$r = 0$	90.16	71.86	76.07	84.45***	
$r \leq 1$	55.32	49.65	53.12**	60.16	Existen como máximo
$r \leq 2$	30.94	32.00*	34.91	41.07	$r = 3$ relaciones de
$r \leq 3$	13.24	17.85	19.96	24.60	cointegración
$r \leq 4$	4.18	7.52	9.24	12.97	
<b>Prueba del valor propio máximo</b>					
$r = 0$	34.84	31.66	34.40**	39.79	
$r \leq 1$	24.38	25.56	28.14	33.24	Existe como máximo
$r \leq 2$	17.70	19.77	22.00	26.81	$r = 1$ relación de
$r \leq 3$	9.07	13.75	15.67	20.20	cointegración
$r \leq 4$	4.18	7.52	9.24	12.97	

Nota: \*\*\*, \*\*, \* indican el rechazo de la  $H_0$  (ausencia de cointegración) dado un nivel de significancia al 1, 5 y 10%, respectivamente.

Fuente: elaboración propia con datos del programa econométrico R.

Los resultados para la prueba de la traza de la **Tabla 6.3.1.1.** se interpretan considerando un nivel de confianza del 99%, cuando  $r = 0$  el estadístico de prueba es mayor al valor crítico ( $90.16 > 84.45$ ), lo que implica rechazar  $H_0$ . Por tanto, hay evidencia estadística de la presencia de al menos una relación de cointegración

entre las variables. Ahora, se procede a contrastar la  $H_0$  cuando  $r = 1$ , acá también el estadístico de prueba es superior al valor crítico aun 95% de nivel de confianza, por lo que se procede a rechazar la  $H_0$ , teniendo así que  $r > 1$ . De igual forma, se rechaza  $H_0$  cuando  $r = 2$  el estadístico de prueba es superior al valor crítico aun 90% de nivel de confianza. Ya en el momento de  $r < 3$ , es el valor crítico el que supera al estadístico de prueba (valor crítico  $19.96 > 13.24$ ), por lo que no se rechaza la  $H_0$ .

En conclusión, por la prueba de la traza, las 5 variables analizadas (IDH, PIB, GREN, GNREN y  $CO_2$ ), presentan cointegración en una presencia máxima de 3 relaciones.

Ahora bien, interpretando los resultados de la prueba del valor propio máximo tendiendo un nivel de significancia del 5%, cuando  $r = 0$ , el estadístico de prueba es mayor al valor crítico ( $34.84 > 34.40$ ), lo que implica rechazar  $H_0$ , por tanto, hay evidencia estadística de la presencia de cointegración entre las variables. Ya en el momento de  $r < 1$ , es el valor crítico el que supera al estadístico de prueba ( $28.14 > 24.38$ ), por lo que no se rechaza la  $H_0$ .

En conclusión, por la prueba del valor propio máximo, las 5 variables analizadas presentan al menos una relación de cointegración.

Puede observarse que, aunque las dos pruebas difieren en el número de relaciones de cointegración entre las variables, ambas pruebas validan la presencia de al menos una relación de cointegración entre las variables de desarrollo humano, crecimiento económico, producción de electricidad y contaminación ambiental.

### **6.3.2. Cointegración por modelo ARDL y prueba de límites F.**

A pesar de que, frecuentemente se utiliza la prueba de Johansen para medir la cointegración, y que para que está funcione las variables debieran de tener el mismo orden de integración. Es necesario, tomar en cuenta que en las pruebas de no estacionariedad un inconveniente que se presenta en el proceso de la generación de datos de series de tiempo, es la baja potencia de las pruebas de raíces unitarias. Además, la prueba de cointegración de Johansen es comúnmente usada con muestras grandes, es decir mayores a 100 observaciones.

En la solución a estos inconvenientes, para robustecer este análisis, una metodología que ha sido usada en los últimos años es el enfoque de cointegración del modelo autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL, *por sus siglas en inglés*)

desarrollada por (Pesaran & Shin, 1995). Una de las ventajas de utilizar el enfoque ARDL es que la información con respecto al orden de integración de las variables no es relevante; por lo tanto, las pruebas preliminares de raíces unitarias para otros procedimientos de cointegración pueden ser omitidas. Es decir, la técnica de cointegración ARDL no requiere pruebas previas para raíces unitarias a diferencia de otras técnicas.

En consecuencia, la técnica de cointegración ARDL es preferible cuando se trata de variables que están integradas de diferente orden,  $I(0)$ ,  $I(1)$  o una combinación de ambas y, robusta cuando existe una única relación de largo plazo entre las variables subyacentes en un tamaño de muestra pequeño, como es nuestro caso ( $n = 37$ ) (Narayan P. , 2005).

La relación de largo plazo de las variables subyacentes se detecta a través del *estadístico F* (prueba de Wald) o prueba de límites (F-Bound Test, *en inglés*). En este enfoque, se dice que la relación de largo plazo de la serie se establece cuando el *estadístico F* excede la banda de valores críticos. Es decir, se evalúa usando límites de valores críticos, los que son determinados por dos casos extremos donde todas las variables son  $I(0)$  y todas las variables son  $I(1)$ . Sin embargo, esta técnica colapsará en presencia de la tendencia estocástica integrada de  $I(2)$ . Para prevenir el esfuerzo inútil, es que se decidió como paso inicial probar las raíces unitarias, aunque no sea una condición necesaria.

Respecto a la interpretación de los resultados y de conformidad con (Narayan P. , 2005), los valores críticos existentes en (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) no se pueden aplicar a tamaños de muestra pequeños, ya que fueron construidos para tamaños de muestra grandes. Por lo tanto, (Narayan P. , 2005) proporciona un conjunto de valores críticos para tamaños de muestra pequeños, que van desde 30 a 80 observaciones. Se establecen dos conjuntos de valores críticos. Un conjunto suponiendo que todas las variables son  $I(0)$  (es decir, el límite crítico inferior que supone que todas las variables son  $I(0)$ , lo que significa que no hay cointegración entre las variables subyacentes) y otro suponiendo que todas las variables en el modelo ARDL son  $I(1)$  (es decir, el límite crítico superior que supone que todas las variables son  $I(1)$ , lo que significa que existe una cointegración entre las variables subyacentes). Para cada aplicación, existe una banda que cubre todas las clasificaciones posibles de las variables en  $I(0)$  e  $I(1)$ .

Es decir, cuando el *estadístico F* calculado es mayor que el valor crítico del límite superior, se rechaza la  $H_0$  (las variables se cointegran). Si el estadístico F está por debajo del valor crítico del límite inferior, entonces no se puede rechazar la  $H_0$  (no

hay cointegración entre las variables). Si existen múltiples relaciones de largo plazo no se puede aplicar el enfoque ARDL, por lo que el enfoque de (Johansen & Juselius, 1990) se convierte en la alternativa.

Si el estadístico calculado cae dentro (entre el límite superior e inferior) de la banda de ajuste de los valores críticos, el resultado de la inferencia no es concluyente o incierto y depende de si las variables subyacentes son  $I(0)$  o  $I(1)$ . Es en esta etapa del análisis, es donde se tendrían que realizar pruebas de raíces unitarias sobre las variables (Pesaran & Pesaran, 1997). Además, si las variables son  $I(2)$ , los estadísticos- $F$  calculados de la prueba de límites se invalidan porque se basan en la suposición de que las variables son  $I(0)$  o  $I(1)$  o están mutuamente cointegradas (Chigusiwa, Bindu, Mudavanhu, Muchabaiwa, & Muzambani, 2011). Por tal motivo, es que de primerio se procedió a realizar el análisis de raíces unitarias, para garantizar que ninguna de las variables sea  $I(2)$  o superior, antes de realizar la prueba de límites.

En ese sentido para robustecer el análisis y en línea con el enfoque ARDL, una vez ya asegurados que las variables no son  $I(2)$ , procedemos a proponer la siguiente ecuación, para investigar la presencia de alguna relación de largo plazo entre las variables en el modelo de desarrollo social.

Al agregar el logaritmo natural de la ecuación a las variables de estudio, y añadir el término de error, se obtiene la especificación econométrica del modelo ARDL ( $p, q_1, q_2, q_3, q_4$ ) de desarrollo social de largo plazo:

$$\ln IDH_t = \alpha + \beta_1 \ln IDH_{t-i} + \beta_2 \ln PIB_t + \beta_3 \ln PIB_{t-i} + \beta_4 \ln GREN_t + \beta_5 \ln GREN_{t-i} + \beta_6 \ln GNREN_t + \beta_7 \ln GNREN_{t-i} + \beta_8 \ln CO2_t + \beta_9 \ln CO2_{t-i} + \varepsilon_t$$

(6.3.2.1.)

Donde,  $IDH$  es el índice de desarrollo humano para México,  $PIB$  es el producto interno bruto,  $GREN$  es la generación de electricidad por fuentes de energía renovables,  $GNREN$  como la generación de electricidad por fuentes de energía no renovables,  $CO2$  las emisiones de dióxido de carbono y  $\varepsilon_t$  es el término de error de ruido blanco. Todas las variables están transformadas en logaritmos naturales ( $\ln$ ) y expresadas en términos per cápita dentro del periodo de análisis de 1985 a 2021.

La ecuación anterior se estimó con el lenguaje de programación R junto con el paquete "ARDL", utilizando la función de selección automática del modelo  $auto_ardl()$ . Este comando busca el mejor orden de especificación del modelo bajo el método de estimación "dynml" (modelos lineales dinámicos) como una forma

sencilla de construir especificaciones ARDL complejas, según el criterio seleccionado, teniendo en cuenta las restricciones proporcionadas que en este caso se eligió el número 3 como orden máximo de rezagos para todas las variables ( $p, q$ ). Bajo el Criterio de Información de Akaike (AIC), se procedió a seleccionar el número apropiado de rezagos para cada variable.

A continuación, se estimaron los 14 mejores modelos ARDL para obtener el mejor orden de especificación con el comando *top\_orders*. En un inicio se consideró introducir una variable *dummy* “Dumm1997” al modelo, correspondiente al año 1997. Sin embargo, al comprar el modelo ARDL sin considerar la variable *dummy* este último arrojó mejores resultados en la estabilidad y especificación del modelo.

La **Tabla 6.3.2.1.** presenta los resultados de esta metodología, en el cual la mejor estructura del número de rezagos óptimos en el modelo es de (1,0,0,0,1) siendo -306.36 la suma de los valores que minimizan el criterio AIC en cada uno de los regímenes, tanto para la variable dependiente ( $p$ ) como para las variables independientes ( $q_i$ ), respectivamente.

**Tabla 6.3.2.1.**

*Resultados de la prueba de límites bajo enfoque ARDL*

<b>Modelo</b> $\ln IDH_t = f(\ln PIB_t, \ln GREN_t, \ln GNREN_t, \ln CO2_t)$ Rezagos ARDL: (1,0,0,0,1)		
<b>Caso III: modelo no restringido y sin tendencia</b> <b>Valores críticos (k=4, n=35)</b>		
	Límite Inferior	Límite Superior
Nivel de significancia	$I(0)$	$I(1)$
1%	4.59	6.36
5%	3.27	4.63
10%	2.69	3.89*
<b>Estadístico-F</b> <b>(Prueba de Wald)</b> 4.296	<b>Conclusión</b> Al menos una relación de Cointegración	

Nota: \*\*\*, \*\*, \* nivel de significancia al 1, 5 y 10%, respectivamente. Los valores críticos para la prueba de límites o *Bound Test* son tomados del Apéndice de (Narayan P. , 2005). Caso III modelo no restringido y sin tendencia. Si el estadístico F sobrepasa el límite  $I(1)$  se concluye la existencia de cointegración, si el estadístico se posiciona entre las bandas se dice que la relación de cointegración es incierta o no concluyente, y si el estadístico no pasa la banda  $I(0)$  se concluye la no existencia de cointegración. La  $k$  = número de regresores no determinísticos en la relación de largo plazo. Hipótesis de la prueba de límites  $H_0$ : No Cointegración a largo plazo y  $H_1$ : Posible cointegración de largo plazo. Fuente: elaboración propia con datos calculados por el programa econométrico R.

Adicionalmente, en la literatura existe la posibilidad de seleccionar cinco casos para especificar nuestro modelo. Según (Pesaran, Shin, & Smith, 2001), distinguimos la relación de largo plazo (ecuación de cointegración) (y por lo tanto la prueba de

límites y los modelos de corrección de errores restringidos) entre 5 casos diferentes. Estos difieren en términos de si la 'intercepto' y/o la 'tendencia' están restringidas para participar en la relación a largo plazo o no están restringidas y, por lo tanto, participan en la relación a corto plazo. Estos casos son los siguientes:

- Caso I: Sin intercepto y sin tendencia
- Caso II: Intercepto restringido y sin tendencia
- Caso III: Intercepto sin restricciones y sin tendencia
- Caso IV: Intercepción sin restricciones y tendencia restringida
- Caso V: Intercepción sin restricciones y tendencia sin restricciones

Por lo tanto, seleccionar un modelo apropiado para ajustar los datos es tanto arte como ciencia. Sin embargo, hay algunas pautas. Cualquier modelo en el que las series no estén centradas alrededor de cero normalmente requerirá un término constante, mientras que cualquier modelo en el que las series muestren una tendencia, en general se ajustará mejor cuando se incorpore un término de tendencia.

Ya que las variables de estudio inician diferente de cero y al hacerlas estacionarias se eliminó la tendencia, en nuestro modelo se optó por considerar el **Caso III: modelo no restringido y sin tendencia**. En donde, si el valor calculado de “F” supera los valores críticos de la prueba de límites, entonces se rechaza la hipótesis nula de no cointegración y por lo tanto existe evidencia de al menos una relación de cointegración entre las variables de interés (Bouznit & Pablo-Romero, 2016). (Narayan P. , 2005) señala que los valores críticos proporcionados por (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) están sesgados a la baja, y puede producir resultados engañosos o espurios. Por lo tanto, se utilizan los valores críticos de las pruebas de límite desarrollados por (Narayan P. , 2005) en su Apéndice para muestras pequeñas como la nuestra (ver Anexo 1).

El valor del *estadístico* – *F* calculado (4.296) se contrastó con los valores críticos, de manera que, este es mayor al límite superior en el 10% del nivel de significancia. Este resultado confirmó la existencia de una relación de largo plazo.

### **6.3.3. Construcción de un ECM para ver la velocidad de ajuste y resultados de corto plazo.**

En econometría aplicada, la técnica de cointegración de (Granger C. , 1981) y (Engle & Granger, 1987), Autoregressive Distributed Lag (ARDL) o prueba de conjunta de cointegración (Pesaran & Shin, 1995) y (Pesaran, Shin, & Smith, 2001) y (Johansen & Juselius, 1990) las técnicas de cointegración se han convertido en la

solución para determinar la relación de largo plazo entre series no estacionarias, así como reparametrizarlas al Modelo de Corrección de Errores (ECM). El resultado reparametrizado da la dinámica a corto plazo y la relación a largo plazo de las variables subyacentes.

Una vez corroborada la cointegración entre el IDH y sus determinantes, el siguiente paso consiste en la reparametrización del modelo ARDL en el modelo corrección de error, con la finalidad de obtener la elasticidad de corto y largo plazo. Es decir, procedemos a estimar un modelo de corrección de errores (ECM) no restringido y sin tendencia para saber la relación de las variables en el corto y largo plazo. El modelo ECM se establece como sigue:

$$\Delta \ln IDH_t = \delta_0 + \sum_{i=1}^p \delta_{1i} \Delta \ln IDH_{t-1} + \sum_{j=0}^q \delta_{2j} \Delta \ln PIB_{t-j} + \sum_{k=0}^m \delta_{3k} \Delta \ln GLIMP_{t-k} + \sum_{l=0}^n \delta_{4l} \Delta \ln GNREN_{t-l} + \sum_{w=0}^s \delta_{5w} \Delta \ln CO2_{t-w} + \theta ECT_{t-1} + \varepsilon_t$$

(6.3.3.1.)

Con esto, procedemos a examinar el efecto y las relaciones de elasticidad de largo plazo y corto plazo entre las variables de estudio y como estas impactan en el desarrollo humano. Todos los resultados empíricos relevantes y sus principales hallazgos son presentados en la **Tabla 6.3.3.1.**

En el largo plazo, la relación entre el producto interno bruto (PIB) y la generación de electricidad por fuentes renovables (GREN) hacia el IDH para este modelo resulta ser positiva más no significativa, tanto en el largo como en el corto plazo. En otras palabras, ante aumento de un 1% en el nivel del PIB se esperaría un aumento positivo más no significativo del 0.034% el IDH, si todo lo demás permanece constante. De la misma manera, ante un aumento de un 1% en la GREN se esperaría un aumento positivo más no significativo del 0.008% el IDH, si todo lo demás permanece constante. En este sentido, se observa que un crecimiento económico y la producción de electricidad por fuentes renovables motivan de manera positiva más no significativa al desarrollo humano. El impacto no significativo por parte de la producción de electricidad puede deberse al hecho de que en las últimas dos décadas la tendencia de participación de las energías renovables en la matriz eléctrica y energética en México ha sido limitada por cuestiones políticas y económicas.

Por otro lado, la generación de electricidad por fuentes no renovables (GNREN) y el primer rezago de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ambas presentan un impacto positivo significativo (al 5% de nivel de significancia) en los niveles del desarrollo humano, además de presentar coeficientes (elasticidades) muy

parecidos. Respecto a las elasticidades, para estas dos variables se observa que son inelásticas al estar cercanas al cero, es decir, el IDH es poco sensible ante movimientos en GREN y CO<sub>2</sub>. Si aplicamos el concepto *ceteris paribus* (todas las demás variables permanecen constantes), un aumento del 1% en GNREN, es decir las provenientes del carbón, derivados del petróleo o gas, el aumento esperado en el índice de desarrollo humano se ubicaría en 0.031%. De igual manera, la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, tienen un impacto positivo y significativo al 5% en el desarrollo humano. Es decir, ante un aumento del 1% en las emisiones de CO<sub>2</sub> este conduce a un aumento en el IDH en 0.032%, si todo lo demás permanece constante. En otras palabras, el valor rezagado del CO<sub>2</sub> afecta positivamente el valor actual del IDH, así que por cada unidad que aumente CO<sub>2</sub> en su valor, generará un aumento del 0.032% en los niveles del IDH.

Estos resultados coinciden con la literatura desde la idea de tomar a la electricidad como un impulsor del desarrollo humano, y si a esto le sumamos que el país a lo largo de más de veinte años ha cubierto este acceso a la electricidad (que al día de hoy es del 99%) con un parque de generación eléctrico anclado a las fuentes fósiles (revisar capítulo 3), cobra sentido con los coeficientes, el signo e impacto significativo en las variables GREN y CO<sub>2</sub>. Sin embargo, esto también nos quiere decir que a medida que el país alcanza mejores niveles de desarrollo, el nivel de emisiones también aumenta, tal resultado hace referencia a que mejores niveles de desarrollo y calidad de vida redundan en una mayor contaminación ambiental.

**Tabla 6.3.3.1.**

*Resultados de la estimación del Modelo ARDL-ECM de corto y largo plazo*

<b>Variab</b> les	<b>C</b> oeficientes <b>e</b> stimados	<b>E</b> rror <b>e</b> stándar	<b>E</b> stadístico-t	<b>P</b> r(> t )	
(Intercepto)	-0.8385	0.215	-3.884	0.000	***
<b>Estimadores de largo plazo</b>					
PIB <sub>t</sub>	0.034	0.021	1.555	0.130	
GREN <sub>t</sub>	0.008	0.004	1.641	0.111	
GNREN <sub>t</sub>	0.031	0.014	2.153	0.039	*
CO <sub>2(t-1)</sub>	0.032	0.012	2.600	0.014	*
<b>Estimadores de corto plazo</b>					
Δ(CO <sub>2</sub> )	0.075	0.015	4.931	0.000	***
<b>Coefficiente de corrección de error</b>					
ECM <sub>t-1</sub>	-0.430	0.119	-3.613	0.001	**
---					
Nivel de significancia:	(***) 0.1%	(**) 1%	(*) 5%	10% (-)	

Nota: Todas las variables están expresadas en logaritmos naturales.  
Fuente: elaboración propia con datos calculados por el programa econométrico R.

Los resultados de corto plazo están descritos en la parte de en medio de la **Tabla 6.3.3.1**, en donde también se observa una relación positiva significativa de la variación relativa anual de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir de un periodo a otro, hacia el desarrollo humano. Lo que significa que, en el corto plazo un aumento del 1% en la variación relativa anual del CO<sub>2</sub> se reflejaría en un incremento del 0.075% en el IDH, *ceteris paribus*.

El coeficiente de corrección de error ( $ECM_{t-1}$ ) estimado es negativo<sup>32</sup> y significativo al 1%, como lo esperado. El coeficiente indica la velocidad de ajuste para restablecer el equilibrio en el modelo dinámico, es decir, un coeficiente de (-0.430) significa que un 43% de ese desequilibrio se disipa antes del siguiente periodo y un 57% permanece. Se puede decir que la mitad de ese desequilibrio se producirá en un 1 año y tres meses ( $t = \ln(1/2)/\ln(1 - 0.43)$ ) o que ante el efecto de un choque externo este se corregirá en un 57% dentro de un año, es decir de manera rápida.

De estos resultados, se puede concluir que la generación de electricidad (renovable y no renovable), tiene un impacto positivo sobre el Índice de Desarrollo Humano. En ese sentido, se puede decir que el acceso a la energía moderna, como la electricidad, apoya al crecimiento económico y progreso humano. Esto se debe a que la disponibilidad de energía tiene un efecto directo sobre la productividad, la salud, la educación, el abastecimiento de agua potable, los servicios de comunicación, y una larga lista de beneficios y servicios.

No obstante, bajo el presente modelo econométrico y particularmente para México, este impacto solo es significativo cuando la electricidad proviene de fuentes no renovables, es decir las derivadas del petróleo, carbón y gas. Lo anterior, se debe a que México es un país dependiente de los combustibles fósiles, cuya producción y oferta energética siguen estando cubiertas mayoritariamente por el gas y el petróleo. Aunque en los últimos diez años la energía renovable ha venido aumentando su participación en la matriz de generación de electricidad, en esta siguen predominando los hidrocarburos. De conformidad con datos estadísticos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, *por sus siglas en inglés*), la generación de electricidad del país al 2021 fue alrededor de 328,527 GWh: 73.6% (241,788 GWh) por centrales térmicas a través de la combustión de gas natural, derivados del petróleo y carbón; 26.4% (86,739 GWh) por fuentes que utilizan recursos renovables.

Por tal motivo, al tener una oferta eléctrica provista en su mayoría por fuentes fósiles, esto trae naturalmente un aumento en las emisiones de dióxido de carbono. Lo anterior, explica la relación positiva (signo positivo del estimador calculado) entre el CO<sub>2</sub> y el IDH, tanto en el corto como en el largo plazo. México, clasificado por el Banco Mundial como un país con ingresos medio alto, catalogado por el Comité de Asistencia para el Desarrollo como un país en desarrollo y con un índice de desarrollo humano alto por el Programa de las Naciones Unidas, al 2021 se

---

<sup>32</sup> El coeficiente del término de corrección del error se espera que oscile entre el -1 y el 0. El signo negativo indica el grado de corrección.

encuentra en el segundo lugar de los países más contaminantes de América Latina (AL), con una participación del 23.6% (373.8 millones de toneladas) respecto al total, el primer lugar lo ocupa Brasil con el 27.5% (436.6 millones de toneladas). En promedio, estos países tienen la segunda renta per cápita más elevada y la segunda tasa de pobreza más baja en AL. No obstante, presentan elevados niveles de contaminación.

Nuestros resultados coinciden con los de (Tezanos, 2018) quien hace una evaluación de los países en América Latina y el Caribe (ALyC) y encuentra que a mayores niveles de desarrollo económico y humano implican una alta contaminación, en forma de emisiones de dióxido de carbono. Asimismo, los hallazgos empíricos para ALyC de (Villegas, Molero, Rodríguez, & Andino, 2022) revelan que los cambios en el nivel de desarrollo humano aumentan las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita en todos los deciles, especialmente en países en donde el desempeño de las emisiones de CO<sub>2</sub> presentan valores elevados. Por otro lado, (Caraballo & García, 2017) mencionan que el modelo de desarrollo de algunos países de Europa propicia el consumo de energía no renovable, lo cual se traduce en un mayor impacto en la contaminación a pesar de que esos países cuentan con elevados niveles de desarrollo humano. En este sentido (Arias, 2006) menciona que el desarrollo podría coincidir con cierto grado de sostenibilidad débil, con depreciaciones en el patrimonio de los recursos naturales disponibles. Por tanto, cómo mejorar la calidad ambiental y lograr, al mismo tiempo, el desarrollo humano sigue siendo un problema importante de sostenibilidad (Kassouri & Altintas, 2020).

Finalmente, se implementaron pruebas de diagnóstico para probar la normalidad, la no autocorrelación y homocedasticidad de los residuales del modelo con el enfoque de especificación ARDL. La regresión ARDL de la **Ecuación (6.3.3.1.)** se ajusta muy bien y el modelo es globalmente significativo al nivel del 5%. También se satisfacen las hipótesis nulas asociadas a las pruebas diagnósticas contra correlación serial (prueba de Ljung-Box, Durbin Watson y de Breusch-Godfrey), heterocedasticidad (prueba de heterocedasticidad de Breusch-Pagan) y normalidad de errores (prueba de Jarque-Bera, Anderson-Darling, y de Shapiro-Wilk). Todos los resultados de estas pruebas se muestran en la **Tabla 6.3.3.2.**

**Tabla 6.3.3.2.**

*Validación estadística de los supuestos de los residuales del Modelo de Desarrollo Social*

Supuestos	Prueba estadística		Estadístico de Prueba	Valor-P
<b>NO AUTOCORRELACIÓN</b> H0: no autocorrelación en residuales ( $\rho=0$ )	Ljung-Box	X-cuadrada	0.0005	0.9805
	Durbin-Watson	DW	1.9471	0.4169

vs H1: residuales correlacionados	Breusch-Godfrey	LM	1.3274	0.5149
<b>HETEROCEDASTICIDAD</b> H0: homocedasticidad en residuales	Breusch-Pagan	BP	8.0056	0.2376
vs H1: heterocedasticidad en residuales	Goldfeld-Quandt	GQ	4.6695	0.0167**
	Harrison-McCabe	HMC	0.3302	0.0660*
<b>NORMALIDAD</b> H0: residuales se distribuyen como una normal	Jarque-Bera	JB	0.0840	0.9560
vs H1: residuales no se distribuyen como una normal	Anderson-Darling	A	0.3360	0.4888
	Shapiro-Wilk	W	0.9842	0.8769

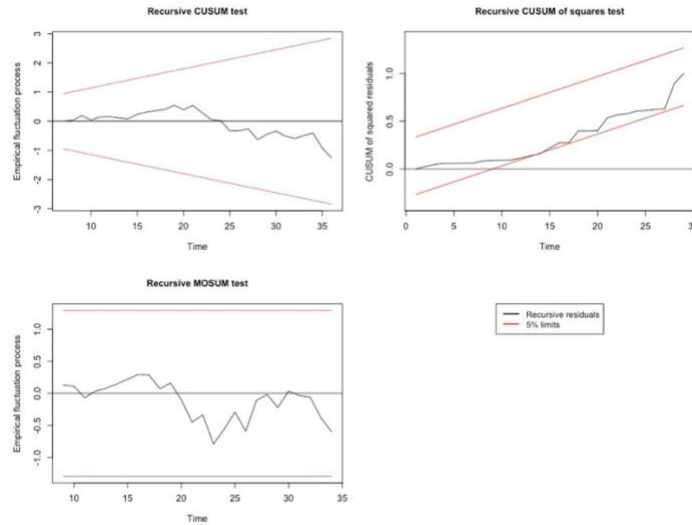
Nota: criterio de rechazo hipótesis nula; dado un nivel de significancia del 5%(\*\*), donde el valor-P < 0.05 se rechaza la H<sub>0</sub>. En estas pruebas, se busca no rechazar la Hipótesis Nula. Fuente: elaboración propia con cálculos del programa econométrico R.

De manera formal para probar la normalidad, homocedasticidad y no autocorrelación de los errores se llevaron a cabo pruebas estadísticas, con las cuales, no se rechaza la hipótesis nula de que estos siguen una distribución normal, se comportan de manera homocedástica y no están autocorrelacionados. A partir, de los resultados de la **Tabla 6.3.3.2.** se concluye que el presente modelo no presenta evidencia de autocorrelación y heterocedasticidad y los residuos se distribuyen normalmente.

Adicionalmente, se hacen pruebas para corroborar la estabilidad del coeficiente de largo plazo mediante la dinámica de corto plazo. Una vez estimado el modelo ECM, se aplican las pruebas de la suma acumulada de residuos recursivos (CUSUM) y la CUSUM del cuadrado (CUSUMSQ) para evaluar la estabilidad del parámetro (Pesaran, Smith, & Shin, 1996b), así como la prueba de cambio estructural basadas en sumas móviles (MOSUM) de residuales recursivos. La **Figura 6.3.3.1.** muestran los resultados de las pruebas CUSUM, CUSUMSQ y MOSUM.

### **Figura 6.3.3.1.**

*Pruebas CUSUM, CUSUMSQ y MOSUM*

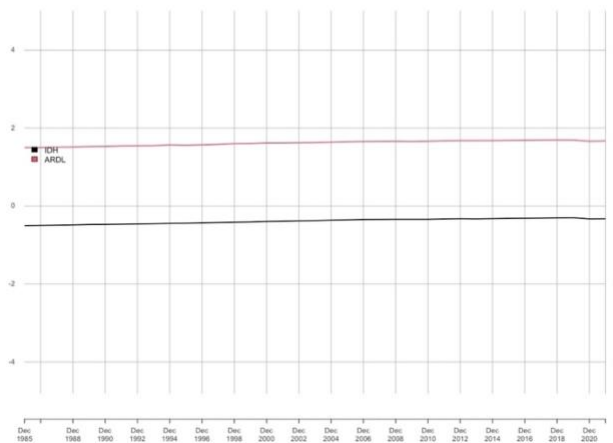


Fuente: gráfico elaborado con el lenguaje de programación R.

Los resultados indican la ausencia de inestabilidad de los coeficientes debido a que la gráfica de los estadísticos CUSUM, CUSUMSQ y MOSUM se encuentran dentro de las bandas críticas del intervalo de confianza del 5% de estabilidad de los parámetros. Esto indica que la estructura de los parámetros no ha divergido anormalmente durante el período de análisis.

Finalmente, se procede a graficar la serie real del IDH respecto a la serie bajo el modelo ARDL-ECM en donde se pueda apreciar (ver **Figura 6.3.3.2.**) la relación de cointegración se ajusta en buena medida a la serie real de IDH.

**Figura 6.3.3.1.**  
*Serie IDH vs Relación de cointegración ARDL*



Fuente: gráfico elaborado con el lenguaje de programación R.

En conclusión, y particularmente para México, enfrenta entonces una relación positiva entre estas dos variables: generación de electricidad por fuentes no renovables y emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que, de no adoptarse políticas específicas en la dimensión ambiental, la consecución de mayores niveles de desarrollo humano, representado por el IDH, tendría efectos perniciosos sobre las emisiones, haciendo que el desarrollo no esté acompañado de sostenibilidad ambiental.

Esto refuerza, la necesidad de disminuir nuestra huella de carbono a través de la generación de electricidad por fuentes renovables. Que GREN y GNREN tengan una relación positiva demuestra que la electricidad es un instrumento catalizador en largo plazo para el bienestar social. No obstante, las fuentes no renovables vienen acompañadas de emisiones de CO<sub>2</sub> y a la larga esto compromete la concepción de desarrollo sostenible desde la esfera ambiental. Por lo que la sustitución de energía no renovable por renovable podría conseguir efectos importantes sobre la disminución de la contaminación.

Por lo tanto, sería conveniente desde la gestión de la política económica tener muy claro el modelo que se pretende para México, a saber, un país en desarrollo con un modelo energético basado en fuentes convencionales, o un país en desarrollo con un crecimiento sostenido, aunque menor, en el que su modelo energético busque la sostenibilidad.

Cabe mencionar, la presencia de cointegración también implica la existencia de relaciones de causalidad entre las variables. No obstante, el análisis de la cointegración no debe considerarse como imprescindible ni como una prueba irrefutable para el análisis de causalidad entre las variables. En el siguiente apartado, se procederá a examinar la relación de causalidad entre las variables de estudio.

#### 6.4. Resultados de las pruebas de Causalidad

De los resultados obtenidos de las pruebas de cointegración de Johansen-Joselius y ARDL, se rechazó la hipótesis nula indicando la existencia de al menos una relación de cointegración en las variables. Entonces, se puede concluir que existe una combinación lineal entre las series que es estacionaria. Es decir, las variables comparten una relación de equilibrio de largo plazo entre ellas. Sin embargo, el análisis de cointegración no determina la dirección de la causalidad entre las variables.

Por tal motivo, y después de observar los impactos de corto y largo plazo de la generación de electricidad, emisiones de CO<sub>2</sub> y desarrollo económico en el desarrollo humano, procedemos a encontrar los vínculos dinámicos entre ellas. Es decir, relaciones causales entre la variable IDH y sus demás determinantes al utilizar

el enfoque de causalidad de Granger en un Modelo Vectorial Multivariado de Corrección de Errores (VECM, *por sus siglas en inglés*) para probar la causalidad intertemporal entre las variables que se consideran en el estudio.

Como las variables están cointegradas, las desviaciones del equilibrio responderán a los cambios en la variable dependiente para forzar movimientos hacia el equilibrio de largo plazo en el corto plazo. Entonces, la causalidad de Granger se ha realizado para determinar las relaciones causales a corto plazo entre las variables. Además, el modelo VECM se ha utilizado para encontrar las relaciones causales a largo plazo entre las variables que pueden causar una desviación del equilibrio a largo plazo.

Es por ello que se ha aplicado la causalidad de Granger bajo el modelo VECM, que es una forma restringida de un VAR sin restricciones y es adecuada una vez que las variables se integran en  $I(1)$ . Para encontrar esto, es necesario especificar una forma reducida de un modelo VAR y probar la significancia de las variables rezagadas en cada ecuación.

De acuerdo con la configuración de este modelo, la variable dependiente depende de sus propios valores rezagados, así como de los valores rezagados de las variables independientes, el término de corrección de error  $ECT_{it-1}$  y el término residual  $\mu_i$ . Esto se muestra en la siguiente ecuación. El modelo VECM puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \Delta \ln IDH_{t-p} \\ \Delta \ln PIB_{t-p} \\ \Delta \ln GLIMP_{t-p} \\ \Delta \ln GNREN_{t-p} \\ \Delta \ln CO2_{t-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \end{bmatrix} + \sum_{p=1}^q \begin{bmatrix} \theta_{11p} & \theta_{12p} & \theta_{13p} & \theta_{14p} & \theta_{15p} \\ \theta_{21p} & \theta_{22p} & \theta_{23p} & \theta_{24p} & \theta_{25p} \\ \theta_{31p} & \theta_{32p} & \theta_{33p} & \theta_{34p} & \theta_{35p} \\ \theta_{41p} & \theta_{42p} & \theta_{43p} & \theta_{44p} & \theta_{45p} \\ \theta_{51p} & \theta_{52p} & \theta_{53p} & \theta_{54p} & \theta_{55p} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \ln IDH_{t-p} \\ \Delta \ln PIB_{t-p} \\ \Delta \ln GLIMP_{t-p} \\ \Delta \ln GNREN_{t-p} \\ \Delta \ln CO2_{t-p} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \end{bmatrix} ECT_{it-1} + \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \end{bmatrix} \tag{6.4.1}
 \end{aligned}$$

Para realizar esta prueba en el lenguaje de programación R, se procede a utilizar la función  $VECM()$  que pertenece al paquete "tsDyn". Iniciamos con la creación de un VAR, el cual usa la base de datos en niveles, con la función  $VARselect$  especificando un máximo de 4 rezagos para cada variable con regresores determinísticos con intercepto y tendencia. Posteriormente, con los parámetros  $VARselect \$criteria$  y  $VARselect \$selection$  seleccionamos el número óptimo de rezagos eligiendo el valor que minimice la suma de residuales al cuadrado que arrojan los Criterios de

información de Akaike (AIC), Hannan-Quinn (HQ) y el Criterio de Schwarz (SC), los cuales en su mayoría arrojan que el modelo debiera de contar con un solo rezago. Los datos correspondientes a la menor suma de residuales bajo los criterios antes mencionados se muestran en la **Tabla 6.4.1**.

**Tabla 6.4.1.**

*Criterio de selección de rezagos del modelo VECM*

Rezagos	AIC	HQ	SC	Conclusión
1	-36.52	-35.99*	-34.94*	Se elige 1 solo rezago para el modelo VECM
2	-36.28	-35.36	-33.56	
3	-35.88	-34.96	-32.40	
4	-36.55*	-35.74	-32.43	
Selección	4	1	1	

Notas: \* indica el rezago óptimo seleccionado por cada criterio. AIC: Criterio de información de Akaike, HQ: Criterio de información de Hannan-Quinn (HQ) y SC: Criterio de información de Schwarz.  
Fuente: elaboración propia con cálculos del lenguaje de programación R.

Posteriormente, procedemos a crear el modelo VECM restringido y sin tendencia con un solo rezago bajo la estimación de máxima verosimilitud “ML”. Así, la siguiente **Tabla 6.4.2** muestra un resumen de los resultados donde las relaciones causales de corto plazo están indicadas por la prueba de Wald de las variables en diferencias, mientras que las relaciones de largo plazo están indicadas por el término de corrección de error. En otras palabras, el estadístico de Wald (*estadístico-F*) indica los efectos de relación causal en el corto plazo entre las variables, mientras que el *estadístico-t* en el término de corrección de error o velocidad de ajuste (*ECT-1*) representa los efectos de causalidad de Granger en el largo plazo.

Como resultado, en el largo plazo, observamos que el *ECT-1* es negativo, con valores entre 0 y 1 y significativo para cuando se toman como variables dependientes a  $\Delta$ PIB,  $\Delta$ GNREN, el  $\Delta$ CO<sub>2</sub> y con el propio valor del  $\Delta$ IDH. Es decir, que existe una relación de causalidad unidireccional que va del IDH, PIB, GNREN y CO<sub>2</sub> al IDH. La velocidad de ajuste para converger al equilibrio, ante la presencia de algún choque externo, es de 0.04% para el IDH, 0.16% para el PIB, 0.40% para GNREN y 0.29% para el CO<sub>2</sub>. Estos hallazgos sustentan la *hipótesis de crecimiento* en el largo plazo (Destek & Aslan, 2017), esto se refiere que, al aplicar políticas ambientales, que limiten la generación de electricidad por fuentes no renovables, estas puedan debilitar el desarrollo humano en el país. Esto sugiere que el IDH en México, depende en cierta proporción de la producción de electricidad no renovable, del crecimiento económico y de la contaminación ambiental del país, lo que indica que el país es una economía energéticamente dependiente.

Por el lado de la electricidad renovable, en el largo plazo no existe evidencia significativa de una relación causal con el desarrollo humano. La ausencia de causalidad de Granger entre la generación de electricidad renovable y el IDH respalda la hipótesis de “neutralidad” en el largo plazo. Estos hallazgos coinciden con los de (Wang, y otros, 2020) quienes indican que la generación de electricidad renovable no mejora de manera significativa el progreso del desarrollo humano y que, a la larga, un desarrollo humano alto conduce a la contaminación ambiental. En este caso, las políticas de crecimiento o conservación de electricidad renovable pueden no tener un impacto significativo en el desarrollo humano.

Ahora, se procede a analizar la causalidad en el corto plazo, los resultados del modelo VECM en la **Tabla 6.4.2.** en primeras diferencias, cuando el IDH funciona como variable dependiente (primera columna de la tabla) el estadístico de Wald (0.007) para el  $\Delta$ PIB es estadísticamente insignificativo. Por lo tanto, no existe relación causal a corto plazo que vaya desde el PIB hasta el  $\Delta$ IDH. El mismo criterio se utiliza para analizar el resto de las variables, es decir  $\Delta$ GREN,  $\Delta$ GNREN y  $\Delta$ CO<sub>2</sub> las cuales de igual forma no presentan evidencia de una relación causal hacia el  $\Delta$ IDH en el corto plazo. De la misma manera, cuando revisamos los resultados para las ecuaciones donde la variable dependiente es  $\Delta$ PIB,  $\Delta$ GNREN y  $\Delta$ CO<sub>2</sub>, llegamos a la misma conclusión, en el corto plazo no existe suficiente evidencia estadística para validar la existencia de causalidad entre las variables.

No obstante, se observa una relación de causalidad unidireccional inversa que va del IDH  $\rightarrow$  GREN hacia la generación de energía renovable. Se puede notar que la influencia del IDH a la generación de electricidad renovable es débilmente significativa y en sentido negativo al nivel del 10%. Por inversa, nos referimos al signo negativo del estadístico-*t* por (-14.22), que quiere decir que ante un aumento en un punto en el score del IDH se desincentivaría la generación por fuentes de energía renovables en un -14.22% en el corto plazo, lo que valida la *hipótesis de conservación* en el corto plazo. Esto se puede deber a que (Heal, 2009), la generación de electricidad a partir de fuentes renovables representa un proceso costoso que requiere más tiempo para ver los efectos positivos de tal avance tecnológico e inversión en una central de energía renovable.

Es más, este hallazgo se refuerza cuando las emisiones de CO<sub>2</sub> funcionan como la variable dependiente, los resultados muestran que la generación de electricidad renovable, aunque negativo (-0.30), es insignificante. Esto podría interpretarse, que México no logra tener un efecto beneficioso sobre la calidad ambiental, aunque disfrutan en promedio de un consumo razonable de energías renovables en su combinación de suministro de electricidad, lo que representa alrededor del 27% y un 12% en su consumo de energía (revisar capítulo 3). Estos resultados son

similares a los de (Amer, 2020) (Apergis N. , Payne, Menyah, & Wolde-Rufael, 2010) quienes encontraron, para un grupo de 19 países desarrollados y en desarrollo, que el consumo de energía renovable no contribuye a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a corto plazo. Esto podría deberse a que se necesita más tiempo y capacidad para que estas fuentes contribuyan significativamente a la descarbonización del sector eléctrico y reduzcan la degradación ambiental.

Cabe señalar también que el impacto insignificante de las energías renovables en la contribución a menos emisiones de CO<sub>2</sub> podría deberse al hecho de que la energía renovable consumida ha sido principalmente por la hidroeléctrica y biomásas tradicionales, como se indicó anteriormente en el capítulo 3, en lugar de fuentes de energía renovable limpias y modernas. Resultados similares fueron hallados por (Hasnisah, Azlina, & Che Taib, 2019) quien encontró que el efecto del consumo de energía renovable es insignificante para contribuir a una menor contaminación con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> en un panel de países en desarrollo en Asia, incluidos India, Indonesia, Bangladesh y Filipinas. Sugirieron que el consumo de energía de fuentes renovables era insuficiente para reducir el impacto del clima.

Adicionalmente, se observa en la ecuación del IDH que las emisiones de CO<sub>2</sub> influyen positivamente (0.05) en este indicador aunque no de manera significativa. Esto significa que se está logrando de manera ineficiente un mayor desarrollo representado a expensas de la calidad ambiental. Por lo tanto, aunque un mayor desarrollo en el país tenga en su agenda el fomento y uso cada vez mayor de energías renovables, aún se está logrando niveles más altos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que los países de ingresos medios altos actualmente están experimentando grandes cambios estructurales hacia economías más industrializadas. (Sohag, Mamun, Uddin , & Ahmed, 2017) concluyeron que los sectores industrial y de servicios generaron más emisiones de CO<sub>2</sub> en las economías de ingresos medios durante el período (1980-2012).

**Tabla 6.4.2.***Resultados de la Prueba de Causalidad de Granger por un Modelo de Vectores de Corrección de Errores*

Ecuación de Cointegración		$\Delta IDH_{t-1} = 0.008 \Delta PIB_{t-1} - 0.145 \Delta GREN_{t-1} + 0.064 \Delta GNREN_{t-1} + 0.087 \Delta CO2_{t-1}$				
Variable Dependiente	Estadísticos de corto plazo / Variables independientes					Estadístico de largo plazo
	$\Sigma \Delta IDH_{t-1}$	$\Sigma \Delta PIB_{t-1}$	$\Sigma \Delta GREN_{t-1}$	$\Sigma \Delta GNREN_{t-1}$	$\Sigma \Delta CO2_{t-1}$	ECT-1
Ecuación para $\Delta IDH$	...	0.0077 (0.0516)	0.0222 (0.0160)	0.0036 (0.0426)	0.0571 (0.0471)	<b>-0.0453**</b> (0.0155)
Ecuación para $\Delta PIB$	-0.9278 (1.6228)	...	0.0181 (0.0781)	-0.2507 (0.2082)	0.1058 (0.2300)	<b>-0.1632*</b> (0.0758)
Ecuación para $\Delta GREN$	<b>-14.2226*</b> (5.5551)	-0.0667 (0.8631)	...	1.2995 (0.7129)	0.6352 (0.7874)	-0.3381 (0.2596)
Ecuación para $\Delta GNREN$	3.9872 (2.6970)	0.5031 (0.4190)	-0.1469 (0.1299)	...	-0.3394 (0.3823)	<b>-0.4070**</b> (0.1261)
Ecuación para $\Delta CO_2$	-2.4719 (2.5015)	0.0027 (0.3886)	0.0406 (0.1205)	-0.3000 (0.3210)	...	<b>-0.2916*</b> (0.1169)
Pruebas de diagnóstico multivariadas del modelo VECM						
	<b>Estadístico de Prueba</b>	<b>Valor-P</b>	<b>Resultado</b>			
Portmanteau	241.87	0.712	Residuales no autocorrelacionados.			
ARCH-LM	450	1	Residuales homocedásticos.			
Jarque-Bera	179.34	0.000***	Residuales no se comportan como una normal.			

Nota: \*\*\*, \*\*, \*, . , denotan rechazo de la hipótesis nula al nivel de significancia de 0.1%, 1%, 5% y 10%, respectivamente. Cada variable cuenta con su estadístico de Wald y debajo su error estándar entre paréntesis.

Posteriormente, se aplicaron las pruebas de diagnóstico multivariadas a los residuales del modelo. La prueba portmanteau para la autocorrelación de los residuos, la prueba ARCH-LM para analizar si los residuales al cuadrado son homocedásticos y la prueba Jarque-Bera la cual se formula bajo la hipótesis nula de normalidad de los residuos, todas estas se encuentran en la parte inferior de la **Tabla 6.4.2.**, en donde se concluye que los residuales del modelo no están autocorrelacionados y son homocedásticos. La prueba de normalidad no la paso, no obstante, lo que más nos atiende es que los residuales no estuvieran autocorrelacionados.

En conclusión, en el corto plazo  $IDH \rightarrow GREN$  de manera negativa lo que valida para México la hipótesis de “conservación” en este periodo. Por otro lado, en el largo plazo se valida la hipótesis de neutralidad entre la generación de electricidad por fuentes renovables y el IDH, así como la hipótesis de “crecimiento” al hallar una relación unidireccional que va del crecimiento económico, la generación por fuentes no renovables y las emisiones de  $CO_2$  hacia el desarrollo humano. Ver **Figura 6.4.1.** en donde se resumen los canales causales.

**Figura 6.4.1.**

*Resultados de las relaciones de Causalidad de Granger*

Relación de causalidad en el corto plazo



Relación de causalidad en el largo plazo



Fuente: elaboración propia.

#### 6.4.1. Análisis Funciones Impulso – Respuesta.

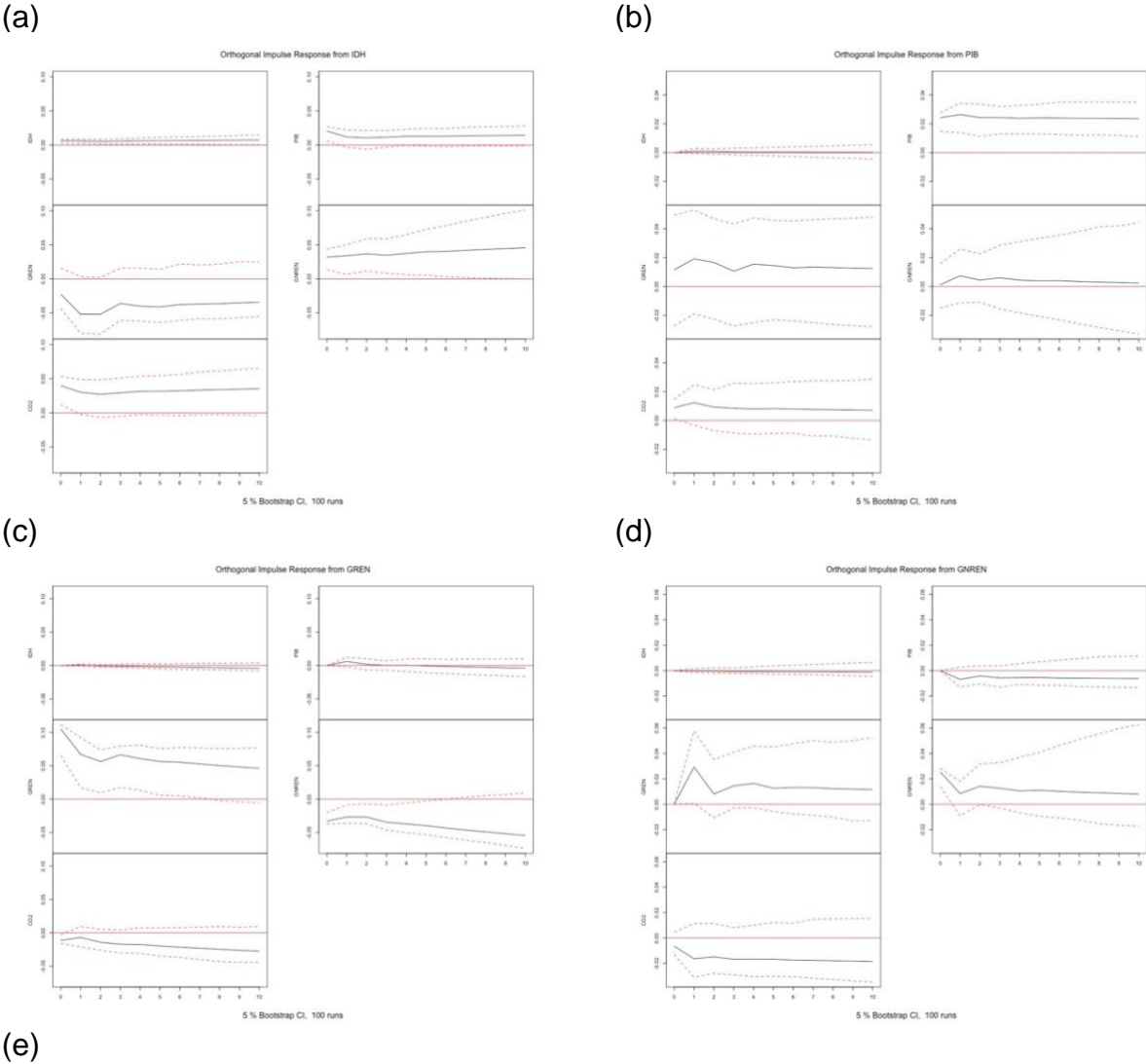
El modelo VECM propuesto en esta investigación, conlleva a realizar simulaciones donde las variables exógenas las cuales son las variables externas están siendo sometidas a fluctuaciones transitorias y así poder evaluar el impacto en las variables endógenas, de especial manera sobre el IDH, este modelo también nos permite cuantificar la velocidad de convergencia al estado estacionario.

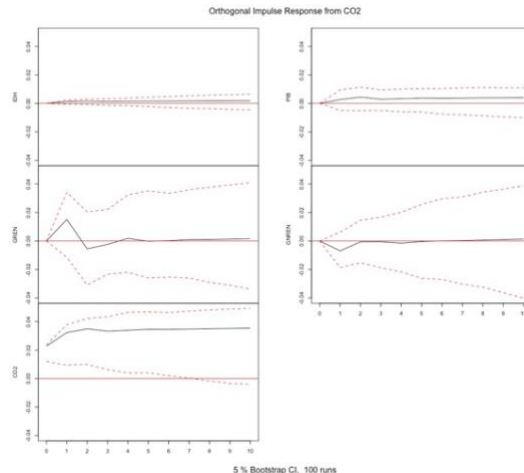
Según, (Ramirez, 2009) la “Función de Impulso-Respuesta” (IRF, *por sus siglas en inglés*), se define como la respuesta relativa de la variable endógena con respecto a su senda base esto es la desviación transitoria de alguna de las variables

exógenas en el modelo. Es por ello que, para facilitar una mejor interpretación, esta respuesta se expresa en términos porcentuales, por lo que el multiplicador es la respuesta en  $t$  de la variable endógena en  $\Delta\%$ , por cada cambio porcentual que se realice por cualquier shock en las variables, manteniendo el resto de las variables constantes (*ceteris paribus*).

Por lo tanto, se estudiarán cinco fluctuaciones externas: (a) desarrollo humano; (b) crecimiento económico; (c) generación de electricidad por fuentes renovables; (d) generación de electricidad por fuentes no renovables, y (e) contaminación ambiental. Todas las simulaciones son transitorias y con un impacto de 1% del escenario base del modelo. Los resultados de la IRF se presentan en la **Figura 6.4.1.1.**, siendo el horizonte empleado de 10 años.

**Figura 6.4.1.1.**  
*Funciones de Impulso y Respuesta del modelo VECM*





Nota: El panel (a), (b), (c), (d) y (e) son las respuestas a cambios de  $\pm 1$  en desviación estándar.  
 Fuente: elaboración propia gráficos proporcionados por la función `irf()` del paquete "vars" disponible en el lenguaje de programación R.

Los gráficos muestran que la respuesta a de las demás variables ante shocks en el IDH, PIB, GREN, GNREN y CO<sub>2</sub>. El recuadro (**Figura 6.4.1.1.a**) se observa que ante un shock positivo del 1% en el IDH la generación de electricidad por fuentes renovables presentaría una disminución del 5% en el primer periodo recuperándose a partir del tercer año. Respecto a los shocks transitorios en el PIB (**Figura 6.4.1.1.b**) del 1% su respuesta relativa es en la misma magnitud para el CO<sub>2</sub> (1%) y GNREN (1%) en el primer periodo mayor a ese 1% en GREN (2%) para el mismo periodo. Respecto a shocks en GREN (**Figura 6.4.1.1.c**), este provocaría disminuciones progresivas en las emisiones de CO<sub>2</sub> y la generación por fuentes no renovables, sin impactos en el IDH y PIB.

Respecto a la generación de electricidad por fuentes no renovables (**Figura 6.4.1.1.d**) ante un shock relativo del 1%, este generaría impactos positivos más que proporcionales (3%) en la generación por fuentes de energías renovables que a su vez se traducen en una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> en 1% para el primer periodo. Finalmente, en el apartado (**Figura 6.4.1.1.e**) algún choque en los niveles de CO<sub>2</sub> propiciaría un aumento en la generación de electricidad por fuentes renovables y una disminución en las no renovables, solo en el primero periodo posteriormente este regresaría a su convergencia estacionaria.

## Conclusiones e implicaciones de política pública

La emergencia climática, la dependencia de las importaciones energéticas para abastecer una demanda creciente en energía y el carácter finito de los recursos fósiles han inducido una preocupación generalizada sobre la energía en lo que a la seguridad del suministro se refiere, y a los impactos ambientales asociados a su producción y consumo, por lo que muchos países han aumentado las inversiones en fuentes de energía renovable como parte de la solución a estos problemas, y desde las Naciones Unidas se ha hecho especial hincapié en que los gobiernos actúen en favor de conseguir un crecimiento y desarrollo sostenibles.

El presente estudio ha investigado el nexo energía-desarrollo humano en México, mediante la evaluación de la sostenibilidad del modelo de desarrollo de la economía mexicana en el periodo 1985-2021. Este estudio es el primero en arrojar luz sobre el impacto de la generación de electricidad seccionada por fuentes renovables y no renovables sobre el desarrollo humano, al tiempo que incluye otras variables que analizan su relación con el crecimiento económico y la contaminación ambiental. Lo anterior, mediante el análisis de series de tiempo anuales para evaluar la relación de largo y corto plazo con el enfoque de cointegración ARDL y de causalidad VECM para examinar la relación causal entre el desarrollo humano (IDH), el crecimiento económico (PIB), la generación de electricidad por fuentes renovables (GREN) y no renovables (GNREN) y la contaminación ambiental (CO<sub>2</sub>) en México. Este estudio, considera características específicas del país para dar sentido y explicación a los hallazgos de las relaciones causales entre las variables y mencionar las implicaciones de política pública del sector energético nacional.

Las principales conclusiones pueden sintetizarse de la siguiente manera: en primer lugar, en el análisis de cointegración se identificó al menos una relación de largo plazo estable entre las variables de estudio. Los resultados apuntan hacia un impacto positivo, tanto de la generación de electricidad por fuentes renovables como no renovables y de las emisiones de CO<sub>2</sub> sobre el desarrollo humano, observándose un impacto mayor y significativo de las fuentes no renovables y la contaminación ambiental. Como era de esperar, la producción de electricidad apoya el desarrollo humano. No obstante, para México este desarrollo social viene acompañado por un mayor nivel de contaminación ambiental. Esto podría relacionarse, a que el 70% de la matriz eléctrica del país desde hace más de dos décadas ha venido alimentándose de hidrocarburos, transitando del petróleo al gas natural. Por lo tanto, conciliar el objetivo de aumentar el desarrollo humano con el de reducción de la contaminación parece ser todavía una tarea compleja que implicaría empezar a aceptar la idea de que un desarrollo “sostenible” precisa unas tasas de crecimiento

y desarrollo más moderadas al mismo tiempo que se mitiga la degradación ambiental.

En segundo lugar, al analizar la causalidad entre las variables, en el corto plazo se halló la existencia de una relación unidireccional que va del IDH  $\rightarrow$  GREN en sentido negativo en el corto plazo, respaldando la *hipótesis conservacionista* para México, es decir establecer políticas de mitigación de gases de efecto invernadero pudiera no afectar negativamente el desarrollo económico social. No obstante, es necesario considerar que México al ser una economía en crecimiento con retos sustanciales de infraestructura para transportar la electricidad, lo que dificulta una apropiada gestión de los recursos energéticos y considerando que el desarrollo humano del país ha sido acompañado por la generación de electricidad por fuentes no renovables, lo más viable sea la aplicación de políticas de enfocadas a la eficiencia energética.

Por otro lado, en el largo plazo, se respaldan dos hipótesis: la primera la *hipótesis de neutralidad* entre GREN e IDH, es decir una ausencia de causalidad entre estas dos variables lo que nos diría que la generación de electricidad por fuentes renovables representa una proporción muy pequeña en el desarrollo humano, lo cual cobra sentido dadas las características de desarrollo energético y social del país.

La segunda, *hipótesis de crecimiento*, al hallarse una relación unidireccional que va del PIB, CO<sub>2</sub> y GNREN hacia el IDH en sentido positivo, es decir que el modelo de crecimiento en México por sí solo estimula el consumo de energía no renovable, pero no el de las renovables. Analizando la causalidad por el lado del producto interno bruto se puede argumentar que el desarrollo humano es un resultado ante aumento del PIB, es decir, un aumento del PIB implicaría la reducción de la tasa de desempleo y aumento en los salarios, por tal motivo la población sus recursos en educación, alimentación y salud, todo lo cual contribuye directamente al desarrollo humano. En pocas palabras, el crecimiento económico amplía las opciones de las personas y promueve el desarrollo social.

La relación unidireccional de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la generación de electricidad no renovable al IDH, implicaría que las políticas de conservación relacionadas con el consumo de carbón, gas, electricidad y petróleo pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero al mismo tiempo pueden obstaculizar el crecimiento económico y el nivel de desarrollo humano. Bajo esta hipótesis, políticas conservacionistas en el sector energético pudieran afectar en el largo plazo de manera negativa al IDH, es decir, en disminuir sus niveles de progreso. Sin embargo, si no se implementan políticas de conservación, los efectos perjudiciales de la degradación ambiental también

podrían afectar los niveles en la calidad de vida. Por lo tanto, los formuladores de políticas deben desarrollar planes estratégicos para reducir las emisiones de carbono que no afecten negativamente a su población objetivo. Una posible forma de lograrlo es aumentando la eficiencia en el uso de la energía. Se ha demostrado que la huella ecológica, el consumo de energía no renovable y las emisiones de carbono tienen un impacto positivo en el desarrollo humano. Lo anterior, puede decirse en un desempeño mediocre por parte de México al frente de la acción climática y el desempeño promedio en energía renovable, a pesar de un crecimiento económico y desarrollo humano razonable.

Esto apunta hacia el requerimiento en el diseño de políticas medioambientales y energéticas enfocadas por el lado de la productividad y eficiencia de los recursos energéticos, puesto que el modelo energético actual parece conducir al protagonismo de las no renovables y, por lo tanto, a la degradación ambiental, conscientes de que lo anterior pudiera implicar menores tasas de crecimiento y desarrollo humano (Amer, 2020).

Lo anterior denota, que cualquier política de conservación relacionadas con la generación de energía renovable puede disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>; sin embargo, simultáneamente impedirán un mayor crecimiento en el IDH. Por el contrario, si no se implementan las políticas conservadoras, el efecto perjudicial de la disminución de la calidad ambiental en el país podría afectar la salud humana, la productividad agrícola, los recursos hídricos y, en última instancia, el crecimiento económico. Por lo tanto, los legisladores deben desarrollar planes estratégicos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a fin de proteger el medio ambiente para las generaciones futuras. En consecuencia, las políticas adecuadas asociadas con el uso eficiente de los recursos energéticos y el uso de recursos renovables son necesarias tanto para el bienestar humano como para un medio ambiente sostenible.

Estos resultados coinciden con otros autores como (Ouedraogo, 2013), quien sostiene que “los países desarrollados ahora están comenzando a desvincular su consumo de energía del crecimiento económico. Sigue existiendo una fuerte relación directa entre el consumo de energía y el desarrollo económico en los países en desarrollo”. Así como para, (Bedir & Yilmaz, 2016) sus resultados revelan que el desarrollo de los países miembros de la OCDE depende de la energía. Esto es particularmente cierto en los países de ingresos relativamente altos donde el efecto del CO<sub>2</sub> en el IDH es mayor, con emisiones de CO<sub>2</sub> relativamente altas. En conclusión, los países con ingresos relativamente altos entre los miembros de la OCDE deberían asumir una mayor responsabilidad para reducir sus emisiones y proteger el medio ambiente. Los países deben ser conscientes de la necesidad de

promover un medio ambiente sostenible mientras intentan alcanzar altas tasas de desarrollo. Además, para facilitar futuras investigaciones, se debe mejorar el IDH para considerar la necesidad de promover un medio ambiente limpio para las generaciones futuras.

También se puede concluir que, bajo el alcance y limitaciones de esta metodología, bajo el enfoque de causalidad ARDL-VECM se demostró que uno de los hallazgos de mayor relevancia es el impacto poco significativo de la generación de electricidad por fuentes renovables en el índice de desarrollo humano. Este resultado podría justificarse debido a que en la medida en que el país intenta seguir adelante y tomar el camino hacia un país con mayor ingreso (ingresos altos), al mismo tiempo intenta cambiar su matriz eléctrica hacia fuentes de energía renovables. Esta es la razón del impacto negativo en el IDH, ya que estas fuentes limpias suelen ser costosas en su primera etapa de implementación.

Adicionalmente, se encuentra evidencia estadística de que el impacto de la generación de electricidad por fuentes renovables en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> es poco significativa. Esta conclusión tiene sentido cuando observamos la tasa de crecimiento promedio anual de las energías renovables en la generación total de electricidad la cual apenas aumentó un 3.5% en los últimos veinte años (entre los años 2001 al 2021), alcanzando un 27.33% en 2021, revisar el capítulo 3.4. La alta dependencia de los hidrocarburos para satisfacer nuestras necesidades diarias, hace que sea muy difícil aumentar la participación de las energías renovables en la producción total de energía final. Esto aclara la razón por la cual la energía renovable se ha expandido gradualmente, a pesar del notable acceso a la electrificación esta expansión marginal aún hace que su influencia tanto en el IDH como en las emisiones de carbono sea insignificante. Como nunca antes, más personas tienen acceso a la electricidad, pero los avances no son suficientes para alcanzar los objetivos en materia de energía sostenible (Banco Mundial, 2019).

En México, el sector energético, dominado por las fuentes no renovables de energía, ha jugado un papel decisivo para el desarrollo económico y social del país por su clara influencia sobre todo en el aparato productivo del país. Si bien toda la sociedad requiere, ineludiblemente, producir y consumir la energía para sus procesos productivos, es importante considerar que los patrones de producción y consumo de energía tienen incidencia en las transformaciones del medio ambiente. Las fuentes energéticas de mayor impacto al ambiente son el carbón mineral y los hidrocarburos los cuales afectan principalmente a los cuerpos de agua, suelos y vida silvestre, así como a la salud humana (SENER, 2018). Los resultados de esta investigación respaldan la idea de que las mejoras en la calidad de vida de las economías industrializadas hasta ahora han dependido principalmente de la

explotación de fuentes de energía no renovables, teniendo en cuenta el importante papel de la energía hidroeléctrica durante las primeras etapas de la industrialización, así como para muchos países en desarrollo en la actualidad. Independientemente de su importancia para fines productivos, el acceso a energía limpia y confiable representa un requisito previo importante para los determinantes fundamentales del desarrollo humano, incluida la salud, la educación, la igualdad de género y la seguridad ambiental (PNUD, 2007).

Esta investigación también tiene algunas limitaciones que vale la pena señalar: primero, debido a la dificultad de recolectar los datos de las variables propuestas por períodos más largos, el estudio solo cubre un período de 37 años. En segundo lugar, este análisis solo contempla el impacto de la producción de electricidad en el IDH, sería conveniente realizar el mismo análisis, pero seccionado por sectores la economía (industrial, servicios y transporte). En tercer lugar, aunque las emisiones de CO<sub>2</sub> contribuyen en gran medida a las emisiones contaminantes, es útil observar el impacto adverso de otras emisiones de Gases de Efecto Invernadero, como el metano, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el óxido nitroso, así como sus posibles implicaciones en la salud humana. En cuarto lugar, el propio IDH presenta limitantes en su medición, ya que fue diseñado sobre la base de tres dimensiones: salud, educación e ingreso; se fundamenta solo en tres medidas que, además, tienen un problema común: son promedios que ocultan amplias diferencias en la población. Por lo tanto, estas son las preguntas de investigación abiertas para que los investigadores exploren más a fondo.

## Bibliografía

- Adams, S., Klobodu, E. K., & Apio, A. (2018). Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. *Renewable Energy*, 125, 755-767 ; <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.135>.
- Adjaye, A. (2000). The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. *Energy Economics*, 22, 615-625; DOI: 10.1016/S0140-9883(00)00050-5.
- Ahmad, N., & Du, L. (2017). Effects of energy production and CO2 emissions on economic growth in Iran: ARDL approach. *Energy*, 521-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.144>.
- Akbari, A., Vahidinasab, V., Arasteh, H., & Kazemi-Robati, E. (2022). 7 - Rural and residential microgrids: concepts, status quo, model, and application. *Residential Microgrids and Rural Electrifications*, 131-161.
- Alam, J., Begum, M., & Buysse, I. (2012). Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: Cointegration and dynamic causality analysis. *Energy Policy*, 45, 217-225. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.022
- Ali, H., Law, S., & Zannah, T. (2016). Dynamic impact of urbanization, economic growth, energy consumption, and trade openness on CO2 emissions in Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12), 12435–12443. doi:10.1007/s11356-016.
- Ali, W., Abdullah, A., & Azam, M. (2017). Re-visiting the environmental Kuznets curve hypothesis for Malaysia: Fresh evidence from ARDL bounds testing approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 990–1000. doi:10.1016/j.rser.2016.
- Al-mulali, U., Fereidouni, H. G., & Lee, J. Y. (2014). Electricity consumption from renewable and non-renewable sources and economic growth: Evidence from Latin American countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 290-298. doi:10.1016/j.rser.2013.10.006
- Amer, H. (2020). The Impact of Renewable Energy Consumption on the Human Development Index in Selected Countries: Panel Analysis (1990-2015).

- International Journal of Economy, Energy and Environment*, 47-68. doi:10.11648/j.ijeeee.20200504.12
- Ang, J. (2007). CO2 emissions, energy consumption, and output in France. *Energy Policy*, 4772–4778. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.032
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). Energy consumption and economic growth in Central America: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy Economics*, 31(2), 211-216. doi: 10.1016/j.eneco.2008.09.002.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010a). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656-660. doi: 10.1016/j.enpol.2009.09.002.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010b). Renewable energy consumption and growth in Eurasia. *Energy Economics*, 32(6), 1392-1397. doi:10.1016/j.eneco.2010.06.001.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010c). A panel study of nuclear energy consumption and economic growth. *Energy Economics*, 32(3), 545-549. doi: 10.1016/j.eneco.2009.09.015.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2011a). The renewable energy consumption–growth nexus in Central America. *Applied Energy*, 88, 343-347. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.013.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2011b). A dynamic panel study of economic development and the electricity consumption-growth nexus. 33(5), 770-781. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.12.018
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2011b). Renewable and non-renewable electricity consumption-growth nexus: Evidence from emerging market economies. *Applied Energy*, 88(12), 5226-5230. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.041.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2012). The Electricity Consumption-Growth Nexus: Renewable Versus Non-Renewable Electricity in Central America. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(4), 423-431. doi: 10.1080/15567249.2011.639336.

- Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecological Economics*, 69(11), 2255-2260. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.06.014.
- Arias, F. (2006). Desarrollo sostenible y sus indicadores. *Revista Sociedad y Economía*(11), 200-229. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99616177008>.
- Arouri, M., Youssef, A., M'henni, H., & Rault, C. (2012). Energy consumption, economic growth and CO2 emissions in Middle East and North African countries. *Energy Policy*, 45, 342-349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.042>
- Atems, B., & Hotaling, C. (2018). The effect of renewable and nonrenewable electricity generation on economic growth. *Energy Policy*, 111-118; doi: 10.1016/j.enpol.2017.10.015.
- Bai, J., & Perron, P. (1998). Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes. *The Econometric Society*, 66(1), 47-78. doi:<https://doi.org/10.2307/2998540>
- Bai, J., & Perron, P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of Applied Econometrics*, 18, DOI: 10.1002/jae.659.
- Bai, J., & Perron, P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of Applied Econometrics*, 18, 1-22. doi:10.1002/jae.659
- Bakirtas, T., & Akpolat, A. G. (marzo de 2018). The Relationship between Energy Consumption, Urbanization, and Economic Growth in New Emerging-Market Countries. *Energy*, 110-121. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.011.
- Banco Mundial. (18 de Abril de 2018). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/home>: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/04/18/access-energy-sustainable-development-goal-7>
- Banco Mundial. (22 de Mayo de 2019). *www.bancomundial.org*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2019/05/22/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2019>

- Banday, U., & Kocoglu, M. (2022). Modelling Simultaneous Relationships Between Human Development, Energy, and Environment: Fresh Evidence from Panel Quantile Regression. *Journal of the Knowledge Economy*. doi:<https://doi.org/10.1007/s13132-022-00921-2>
- Bayer, C., & Hanck, C. (2013). Combining non-cointegration tests. *Journal of Time Series Analysis*, 34(1), 83-95. DOI:10.1111/j.1467-9892.2012.00814.x .
- Bayraktutan, Y., Yilgör, M., & Uçak, S. (2011). Renewable Electricity Generation and Economic Growth: Panel-Data Analysis for OECD Members. *International Research Journal of Finance and Economics*, 66, 59-66. Obtenido de <http://www.eurojournals.com/finance.htm>
- Becker, G. S., & Murphy, K. M. (1990). Human Capital, Fertility, and Economic Growth. *Journal of Political Economy*, 98(5), S12-S37. doi: 10.1086/261723.
- Bedir, S., & Yilmaz, V. M. (2016). CO2 emissions and human development in OECD countries: granger causality analysis with a panel data approach. *Eurasian Economics Review*, 6, 97-110. DOI 10.1007/s40822-015-0037-2.
- Beenstock, M., & Willcocks, P. (1981). Energy consumption and economic activity in industrialized countries: the dynamic aggregate time series relationship. *Energy Economics*, 3(4), 225-232; DOI: 10.1016/0140-9883(81)90023-2.
- Belke, A., Dobnik, F., & Dreger, C. (2011). Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship. *Energy Economics*, 782-789. doi: 10.1016/j.eneco.2011.02.005.
- Belloumi, M. (2009). Energy consumption and GDP in Tunisia: Cointegration and causality analysis. *Energy Policy*, 37(7), 2745-2753. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.027>
- Bergman, L. (1988). Energy policy modeling: a survey of general equilibrium approaches. *Journal of Policy Modeling*, 10(1), 377-399. doi: 10.1016/0161-8938(88)90028-2 .
- Bernt, E. (1980). Energy price increases and the productivity slowdown in United States manufacturing: decline in productivity growth. *Federal Reserve Bank*.

- Bernt, E. (1990). Energy Use, Technical Progress and Productivity Growth: A Survey of Economic Issues. *Journal of Productivity Analysis*, 2(1), 67-83. doi:<https://www.jstor.org/stable/41769828>.
- Bernt, E., & Wood, D. (1979). Engineering and economic interpretation of energy-capital complementarity". *American Economic Review*, 69(3), 342-354. doi: <http://www.jstor.org/stable/1807369>.
- Bhargava, N., Singh, B., & Gupta, S. (2009). Consumption of electricity in Punjab: Structure and growth. *Energy Policy*, 37(6), 2385–2394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.035>
- Bienestar. (2023). *Secretaría de Bienestar*. Obtenido de <https://www.gob.mx/bienestar/es/articulos/uso-domestico-de-combustibles>: <https://www.gob.mx/bienestar/es/articulos/uso-domestico-de-combustibles>
- Bo, S. (2019). Testing for Unit Roots and Cointegration 2019 -A Guide. *ResearchGate*, DOI: 10.13140/RG.2.2.25971.45607.
- Bodel, W., Butler, G., & Matthews, J. (2021). Nuclear energy for net zero: a strategy for action. *The University of Manchester*. Obtenido de <https://www.dalton.manchester.ac.uk/nuclear-energy-for-net-zero/>
- Boutabba, M. A. (2014). The impact of financial development, income, energy and trade on carbon emission: Evidence from de Indian economy. *Economic Modelling*, 40, 33-41. doi:10.1016/j.econmod.2014.03.005.
- Bouznit, M., & Pablo-Romero, M. (2016). CO2 emission and economic growth in Algeria. *Energy Policy*, 93-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.036>.
- Bowden, N., & Payne, J. (2009). The causal relationship between U.S. energy consumption and real output: A disaggregated analysis. *Journal of Policy Modeling*, 31(2), 180-188. doi:10.1016/j.jpolmod.2008.09.001
- Bozoklu, S., & Yilanci, V. (2013). Energy consumption and economic growth for selected OECD countries: Further evidence from the Granger causality test in the frequency domain. *Energy Policy*, 877-881. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.037>

- Bridge, B., Adhikar, D., & Fontenla, M. (2016). Household-level effects of electricity on income. *Energy Economics*, 58, 222–228. doi:10.1016/j.eneco.2016.06.008
- Caraballo, M. Á., & García, J. M. (2017). Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas. *EL TRIMESTRE ECONÓMICO*, LXXXIV(3), 571-609.
- CFE. (2022). *Informe Anual 2021*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad. Obtenido de <https://www.cfe.mx/finanzas/reportes-financieros/Informe%20Anual%20Documentos/Informe%20Anual%202021.pdf>
- Chen, S.-T., Kuo, H.-I., & Chen, C.-C. (2007). The relationship between GDP and electricity consumption in 10 Asian countries. *Energy Policy*, 2611-2621. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.001>
- Cheng, B. (1997). Energy consumption and economic growth in Brazil, Mexico and Venezuela: a time series analysis. *Applied Economics Letters*, 4(11), 671-674; DOI: 10.1080/758530646.
- Cheng, B., & Lai, T. (1997). An investigation of co-integration and causality between energy consumption and economic activity in Taiwan. *Energy Economics*, 19(4), 435-444; DOI: 10.1016/S0140-9883(97)01023-2.
- Cheong-Fatt, N., Suet-Ling, C., Chee-Keong, C., & Lin-Sea, L. (2019). The impact of electricity production from renewable and on-renewable sources on CO2 emissions: evidence from OECD countries. *International Journal of Business and Society*, 20, 365-382.
- Chigusiwa, L., Bindu, S., Mudavanhu, V., Muchabaiwa, L., & Muzambani, D. (2011). Export-Led Growth Hypothesis in Zimbabwe: Does Export Composition Matter? *International Journal of Economic Resources*, 2, 111-129.
- Chontanawat, J., Hunt, L., & Pierse, R. (2008). Does energy consumption cause economic growth?: Evidence from a systematic study of over 100 countries. *Journal of Policy Modeling*, 209-220. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2006.10.003>

- Cleveland, C., Costanza, R., Hall, C., & Kaufmann, R. (1984). Energy and the US economy: a biophysical perspective. *Science*, 225, 890-897. <https://www.jstor.org/stable/1693932>.
- Costantini, V., & Monni, S. (2005). Sustainable Human Development for European Countries. *Journal of Human Development*, 6(3). doi:10.1080/14649880500287654
- Da Silveira Bezerra, P., Callegari, C. L., Ribas, A., Lucena, A., Portugal-Pereira, J., Koberle, A., . . . Schaeffer, R. (2017). The power of light: socio-economic and environmental implications of a rural electrification program in Brazil. *Environmental Research Letters*, 12(9). doi:10.1088/1748-9326/aa7bdd
- DeCanio, S. J. (2009). The political economy of global carbon emissions reductions. *Ecological Economics*, 68(3), 915–924. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.10.003>
- Destek, M., & Aslan, A. (octubre de 2017). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: Evidence from bootstrap panel causality. *Renewable Energy*, 111, 757-763, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.008.
- Dias, R. A., Mattos, C. R., & Balestieri, J. A. (2006). The Limits of Human Development and the Use of Energy and Natural Resources. *Energy Policy*, 34(9), 1026-1031. doi:10.1016/j.enpol.2004.09.008
- Dias, R., Mattos, C., & Balestieri, J. (2006). The limits of human development and the use of energy and natural resources. *Energy Policy*, 1026-1031. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.09.008>
- Dickey, D., & Fuller, W. (1979). Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427-431. doi:10.2307/2286348 .
- Dickey, D., & Fuller, W. (1981). Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Econometrica*, 49(4), 1057-1072. doi:10.2307/1912517 .

- Doignon, Y. (26 de septiembre de 2022). *Banco Mundial* . Obtenido de [www.bancomundial.org](http://www.bancomundial.org):  
<https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Eassterly, W., & Levine, R. (2001). It's not factor accumulation: stylized facts and growth models. *The World Bank Economic Review*, 15(2), 177-219. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/3990260>
- Ehigiamusoe, K. U. (2020). A disaggregated approach to analyzing the effect of electricity on carbon emissions: Evidence from African countries. *Energy Reports*, 6, 1286-1296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.039>
- Elliott, G., Rothenberg, T., & Stock, J. (1996). Efficient Tests for an Autoregressive Unit Root. *Econometrica*, 64(4), 813-836. DOI:10.2307/2171846 .
- Enders, W. (2014). *Applied Econometric Time Series* (Vol. 4ta edición). Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Energy, O. o. (marzo de 2021). *3 Reasons Why Nuclear is Clean and Sustainable*. Obtenido de <https://www.energy.gov/ne/articles/3-reasons-why-nuclear-clean-and-sustainable>
- Engle, R. F., & Granger, C. (1987). Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing. *The Econometric Society*, 55(2), 251-276. DOI: 10.2307/1913236.
- Engo, J. (2019). Decoupling of greenhouse gas emissions from economic growth in Cameroon. *Resources and Environmental Economies*, 16-28; DOI: 10.25082/REE.2019.01.003.
- EPA. (2018). <https://espanol.epa.gov/>. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Erol, U., & Yu, E. (1987). On the relationship between energy and income for industrialized countries. *Journal of Energy and Employment*, 13(1), 113-122.
- Ferguson, R., Hill, R., Craggs, C., & Forbes, I. (1997). Benefits of electricity generation. *IEE Engineering Science and Education Journal*, 6(6), 255-259. doi:10.1049/esej:19970605

- Ferguson, R., Wilkinson, W., & Hill, R. (2000). Electricity use and economic development. *Energy Policy*, 28(13), 923-934.
- Galindo, L. M., & Sánchez, L. (2005). El consumo de energía y la economía mexicana: un análisis empírico con VAR. *Economía Mexicana NUEVA ÉPOCA*, 18(2), 271-298.
- García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, Sociedad y Territorio.*, 16(51), 289-337.
- Georgescu-Roegen, N. (1979). Myth about Energy and Matter. *Growth and Change*, 10(1), 16-23. doi: 10.1111/j.1468-2257.1979.tb00819.x.
- German-Soto, V. (2020). Causality and Stationarity with Structural Break in Electricity Consumption and GDP per capita in Mexico. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas, Nueva Época*, 15, 725-744. DOI: <https://doi.org/10.21919/remef.v15i4.496>.
- German-Soto, V. (2020). Causality and Stationary with Structural Break in Electricity consumption and GDP per capita in Mexico. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas, Nueva Época*, 725-744. DOI: <https://doi.org/10.21919/remef.v15i4.496>.
- Ghosh, S. (2002). Electricity consumption and economic growth in India. *Energy Policy*, 30, 125-129.
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2015). Electricity Consumption and Economic Growth: The Case of Mexico. *International Journal of Economics and Management Engineering*, 9(8), 2803-2808.
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2016). Analysis of causality between economic growth and carbon emissions: The case of Mexico 1971-2011. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1086-1091. DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.1128099>.
- Gómez, M., Ciarreta, A., & Zarraga, A. (2018). Consumo de energía, crecimiento económico y comercio: Un análisis de causalidad para México. *EconoQuantum*, 15(1), 53-72.

- Gómez, M., Ciarreta, A., & Zarraga, A. (2018). Linear and Nonlinear Causality between Energy Consumption and Economic Growth: The Case of Mexico 1965–2014. *Energies*, 11(4), 1-15.
- Granger, C. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica*, 37(3), 424-438. DOI: 10.2307/1912791.
- Granger, C. (1981). Some properties of time series data and their use in econometric model specification. *Journal of Econometrics*, 16(1), 121–130. doi:10.1016/0304-4076(81)90079-8 .
- Greenpeace. (15 de Mayo de 2022). *Greenpeace*. Obtenido de <https://www.greenpeace.org/mexico/>: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/8406/que-es-la-pobreza-energetica-y-por-que-la-sufrimos-en-mexico/>
- Griffin, J. M., & Gregory, P. R. (1976). An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses. *The American Economic Review*,, 845-857. doi: <http://www.jstor.org/stable/1827496>.
- Gujarati, D. N. (2010). *Econometría*. California: Mc Graw Hill Education.
- Halicioglu, F. (2007). Residential electricity demand dynamics in Turkey. *Energy Economics*, 29, 199-210.
- Harris, R., & Sollis, R. (2003). *Applied Time Series Modelling and Forecasting*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Hashemizadeh, A., Bui, Q., & Zaidi, S. A. (2022). A blend of renewable and nonrenewable energy consumption in G-7 countries: The role of disaggregate energy in human development. *Energy*, 241, 122520. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122520>
- Hasnisah, A., Azlina, A., & Che Taib, C. (2019). The Impact of Renewable Energy Consumption on Carbon Dioxide Emissions: Empirical Evidence from Developing Countries in Asia. *Energy Economics and Policy*, 9(3), 135–143. Obtenido de <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/7535>

- Haug, A. (2002). Temporal aggregation and the power of cointegration tests: A Monte Carlo study. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*(64), 399-412. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-0084.00025>.
- Heal, G. M. (2009). The Economics of Renewable Energy. *NBER Working Paper No. w15081*, <https://ssrn.com/abstract=1418939>.
- Heo, J.-Y., Yoo, S.-H., & Kwak, S.-J. (2011). The Causal Relationship Between Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in India. *Energy sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 6(2), 111-117. doi:10.1080/15567240802533971
- Hiranmoy, R., Rajaiah, J., & Anshunan, G. (2015). Energy consumption and human development: Global perspective. *Economics and Policy of Energy and the Environment*, 111-131. doi:DOI:10.3280/EFE2015-001008
- Hosier, R. D., & Dowd, J. (1987). Household fuel choice in Zimbabwe: An empirical test of the Energy Ladder Hypothesis. *Resources and Energy*, 9, 347-361. doi: 10.4236/tel.2021.113027.
- IEA. (2003). *Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future*. Paris, Francia.: International Energy Agency. .
- IEA. (2009). *World Energy Outlook 2009*. Paris, Francia: International Energy Agency.
- IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. Paris, Francia: International Energy Agency.
- Jalil, A., & Ma, Y. (2008). Financial development and economic growth: Time series evidence from Pakistan and China. *Journal of Economic Cooperation among Islamic Countries*, 29-68. .
- Johansen, S. (1988). Statistical Analysis of Cointegration Vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12, 231-254. DOI: 10.1016/0165-1889(88)90041-3.
- Johansen, S. (1995). Likelihood Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models. *Journal of Money Credit and Banking*, 10.
- Johansen, S., & Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with applications to the demand for money. *Bulletin of the*

- Oxford University Institute of Economics & Statistics*, 52(2), 169-210. DOI: 10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x.
- Jorgenson, D., & Wilconxen, P. (1993). Reducing US carbon emissions: an econometric general equilibrium assessment. *Resource and Energy Economics*, 15, 7-25. doi: 10.1016/0928-7655(93)90016-n.
- Jumbe, C. (2004). Cointegration and causality between electricity consumption and GDP: empirical evidence from Malawi. *Energy Economics*, 26, 61-68.
- Kapetanios, G. (2005). Unit-root testing against the alternative hypothesis of up to m structural breaks. *Journal of Time Series Analysis*, 26(1), 123–133. doi:10.1111/j.1467-9892.2005.00393.x .
- Karekezi, S., McDade, S., Boardman, B., & Kimani, J. (2012). Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future. *Cambridge University Press*, 151-190.
- Kassouri, Y., & Altıntas, H. (2020). Human well-being versus ecological footprint in MENA countries: A trade-off? *Journal of Environmental Management*, 263, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110405>.
- Kazar, G., & Kazar, A. (2014). The Renewable Energy Production—Economic Development Nexus. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4, 312-319.
- Kemfert, K., & Welsch, H. (2000). Energy-capital-labor substitution and the economic effects of CO2 abatement: evidence for Germany. *Journal of Policy Modeling*, 26, 641-660. doi: 10.1016/s0161-8938(98)00036-2.
- Korsakienė, R., Breivyte, I., & Wamboye, E. (2011). Sustainable development and human development index. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 103-112.
- Kraft, J., & Kraft, A. (1978). On the Relationship Between Energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 3(2), 401-403.
- Kwiatkowski, D., Phillips, P., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*, 54(1-3), 159-178.

- Lambert, J. G., Hall, C. A., Balog, S., Gupta, A., & Arnold, M. (2014). Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*, 64, 153-167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>
- Laurenceson, J., & Chai, C. (2004). Financial Reform and Economic Development in China. *The China Journal*, 51, 164–165. doi:10.2307/3182162 .
- Leach, G. (1992). The Energy Transition. *Energy Policy*, 20(2), 116-123. doi: 10.1016/0301-4215(92)90105-b.
- Lean, H., & Smyth, R. (2010). Multivariate Granger causality between electricity generation, exports, prices and GDP in Malaysia. *Energy*, 35(9), 3640-3648; doi: 10.1016/j.energy.2010.05.008.
- Lee, C. (2005). Energy consumption and GDP in developing countries: A cointegration panel analysis. *Energy Economics*, 415-427. doi: 10.2016/j.eneco.2005.03.00.
- Lee, C., & Chang, C. (2005). Structural breaks, energy consumption, and economic growth revisited: evidence from Taiwan. *Energy Economics*, 27, 857-872. DOI: 10.1016/j.eneco.2005.
- Lee, C.-C., & Chang, C.-P. (2007). Energy Consumption and GDP Revisited: A Panel Analysis of Developed and Developing Countries. *Energy Economics*, 29(6), 1206-1223. doi:10.1016/j.eneco.2007.01.001
- Lee, C.-C., & Chiu, Y.-B. (2011a). Oil prices, nuclear energy consumption, and economic growth: New evidence using a heterogeneous panel analysis. *Energy Policy*, 39(4), 2111-2120. doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.002.
- Lee, C.-C., & Chiu, Y.-B. (2011b). Nuclear energy consumption, oil prices, and economic growth: Evidence from highly industrialized countries. *Energy Economics*, 33(2), 236-248. doi: 10.1016/j.eneco.2010.07.001.
- Lee, J., & Strazicich, M. (2003). Minimum Lagrange multiplier unit root test with two structural breaks. *Review of Economics and Statistics*, 1082-1089. DOI: 10.1162/003465303772815961.
- Lee, J., & Strazicich, M. (2004). Minimum Lagrange multiplier unit root test with one structural break. *Economics Bulletin*, 33(4).

- Lee, S.-J., & Yoo, S.-H. (16 de septiembre de 2016). Energy consumption, CO2 emission, and economic growth: Evidence from Mexico. *Energy Sources, Part B: Economic, Planning and Policy*, 11(8), 711-717. DOI: 10.1080/15567249.2012.726695.
- Levy, A., Messina, D., & Contreras, R. (2021). *Hacia una planificación sostenible para una transición energética justa en América Latina y el Caribe: análisis de mejores prácticas en países seleccionados*. CEPAL.
- Li, J., & Ayres, R. U. (2008). Economic Growth and Development. *Environmental and Resource Economics*, 40(1), 1-36. doi:10.1007/s10640-007-9138-z
- Lumsidaine, R., & Papell, D. H. (1997). Multiple Trend Breaks and the Unit-Root Hypothesis. *The Review of Economics and Statistics*, 2012-2018. DOI:10.2307/2951453.
- Maddala, G., & Kim, I.-M. (1999). Unit Roots, Cointegration, and Structural Change. Cambridge University. doi:DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511751974>
- Maddala, G., & Kim, I.-M. (2003). *Unit Roots, Cointegration, and Structural Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Maquin, A., & Sidharta, I. (2017). The Relationship of Economic Growth with Human Development. *International Journal of Energy Economics and*, 7(3), 201-207.
- Marques, L. M., Fuinhas, J., & Marques, A. (2019). The impacts of China's effect and globalization on the augmented energy–nexus: evidence in four aggregated regions. *The Extended Energy-Growth Nexus*, 97–139. doi:10.1016/b978-0-12-815719-0.00004-8.
- Marques, L., Fuinhas, J., & Marques, A. (2017). Augmented energy-growth nexus: economic, political and social globalization impacts. *Energy Procedia*, 136, 97–101. doi:10.1016/j.egypro.20.
- Martínez, D. M., & Ebenhack, B. W. (2008). Understanding the role of energy consumption in human development through the use of saturation phenomena. *Energy Policy*, 36(4), 1430-1435. doi:10.1016/j.enpol.2007.12.016

- Massa, R., & Rosellón, J. (2020). Linear and nonlinear Granger causality between electricity production and economic performance in Mexico. *Energy Policy*, 142, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111476>.
- Massa, R., & Rosellón, J. (2017). Links between production and consumption of electricity with economic performance in México. *14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EEM.2017.7981859>.
- Mazur, A. (2011). Does increasing energy or electricity consumption improve quality of life in industrial nations? *Energy Policy*, 39(5), 2568-2572. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.024>
- Meade, J. E. (1961). *A neoclassical theory of economic growth*. London: Allen and Unwin.
- Melgar, L. (Mayo de 2010). Energy Transition: A Path Toward Sustainable Development for Mexico. *Latin American Policy*, 98-113.
- Menegaki, A. (2011). Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis. *Energy Economics*, 33(2), 257-263. doi: 10.1016/j.eneco.2010.10.004.
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2010). A human needs approach to reducing atmospheric carbon. *Energy Policy*, 38(2), 695-700. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.043
- Moritomo, R., & Hope, C. (2004). The impact of electricity supply on economic growth in Sri Lanka. *Energy Economics*, 26, 77-85.
- Mulugetta, Y., Ben Hagan, E., & Kammen, D. (2019). Energy access for sustainable development. *Environmental Research Letters*, 14. Obtenido de <https://goi.org/10.1088/1748-9326/aaf449>
- Murray, D., & Nan, G. (1994). A DEFINITION OF THE GROSS DOMESTIC PRODUCT-ELECTRIFICATION INTERRELATIONSHIP. *The Journal of energy and Development*, 19(2), 275-283. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/24808049>

- Nachane, D. M., Nadkarni, R. M., & Karnik, A. V. (1988). Co-integration and causality testing of the energy-GDP relationship: a cross-country study. *Applied Economics*, 20, 1511-1531.
- Naciones Unidas. (2022). *Energía - Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Nadimi, R., & Tokimatsu, K. (2018). Energy use analysis in the presence of quality of life, poverty, health, and carbon dioxide emissions. *Energy*, 671-684. doi:10.1016/j.energy.2018.03.150
- Narayan, P. (2005). The saving and investment nexus for China: evidence from cointegration tests. *Applied Economics*, 37(17), 1979–1990. doi:10.1080/00036840500278103 .
- Narayan, P. K., & Prasad, A. D. (Octubre de 2008). Electricity consumption–real GDP causality nexus: Evidence from a bootstrapped causality test for 30 OECD countries. *Energy Policy*, 36(2), 910-918.
- Narayan, P. K., & Smyth, R. (2008). Energy Consumption and Real GDP in G7 Countries: New Evidence from Panel Cointegration with Structural Breaks. *Energy Economics*, 30(5), 2331-2341. doi:10.1016/j.eneco.2007.07.006
- Narayan, P., & Smyth, R. (2005). Electricity consumption, employment and real income in Australia: evidence from multivariate Granger causality tests. *Energy Policy*, 33, 1109-1116.
- Ng, S., & Perron, P. (2001). LAG Length Selection and the Construction of Unit Root Tests with Good Size and Power. *Econometrica*, 1519-1554. doi:<https://doi.org/10.1111/1468-0262.00256>
- Niu, S., Jia, Y., Wang, W., He, R., Hu, L., & Liu, Y. (2013). Electricity consumption and human development level: A comparative analysis based on panel data for 50 countries. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 338-347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.05.024>
- Noorbakhsh, F. (1998). A Modified Human Development Index. *World Development*, 26(3), 517-528. doi:10.1016/s0305-750x(97)10063-8

- Odhiambo, N. M. (2009). Energy consumption and economic growth nexus in Tanzania: An ARDL bounds testing approach. *Energy Policy*, 37(2), 617–622. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.077 .
- Odugbesan, J. A., & Rjoub, H. (2020). Relationship Among Economic Growth, Energy Consumption, CO2 Emission, and Urbanization: Evidence from MINT Countries. *SAGE Open*, 1-5 ; DOI: <https://doi.org/10.1177/2158244020914648>.
- Omri, A. (2014). An international literature survey on energy-economic growth nexus: Evidence from country-specific studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 951-959. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.084>.
- ONU. (2020). *What is renewable energy?* Obtenido de United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Renewable%20energy%20is%20energy%20derived,plentiful%20and%20all%20around%20us>.
- ONU. (31 de Marzo de 2021). *Noticias Naciones Unidas*. Obtenido de <https://news.un.org/es>: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490372>
- Ouattara, B. (2004). The impact of project aid and programme aid inflows on domestic savings: A case study of Côte d'Ivoire. *Poverty Reduction and Human Development in Africa*, 44, DOI: 10.1.1.580.2589.
- Ouedraogo, N. S. (2013). Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy Reports*, 63, 10464-10477. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.067>
- Ozturk, I. (2010). A literature survey on energy-growth nexus. *Energy Economics*, 38, 340-349. DOI:10.1016/j.enpol.2009.09.024.
- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2010a). The causal relationship between energy consumption and GDP in Albania, Bulgaria, Hungary and Rumania: Evidence from ARDL bound testing approach. *Applied Energy*, 87(6), 1938-1943. doi:10.1016/j.apenergy.2009.10.10

- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2010b). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3220-3225. doi:10.1016/j.rser.2010.07.005
- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2011). Electricity consumption and real GDP causality nexus: Evidence from ARDL bounds testing approach for 11 MENA countries. *Applied Energy*, 88(8), 2885-2892. doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.065
- Panos, E., Densing, M., & Volkart, K. (2016). Access to electricity in the World Energy Council's global energy scenarios: An outlook for developing regions until 2030. *Energy Strategy Reviews*, 9, 28-49. doi:https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.11.003
- Pao, H.-T., & Fu, H.-C. (2013). Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 25, 381-392. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.004
- Pasten, C., & Santamarina, J. (2012). Energy and quality of life. *Energy Policy*, 49, 468-476. doi:10.1016/j.enpol.2012.06.051
- Pasternak, A. D. (2000). *Global Energy Futures and Human Development: a Framework for Analysis*. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory. Obtenido de [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/031/33031115.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/031/33031115.pdf?r=1)
- Payne, J. E. (2010). A survey of the electricity consumption-growth literature. *Applied Energy*, 87, 723-731. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.034.
- Payne, J. E. (2010). Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth. *Journal of Economic Studies*, 37, 53-95. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443581011012261>.
- Payne, J. E., & Taylor, J. P. (2010). Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in the U.S.: An Empirical Note. *Energy Sources, Part B*, 5(3), 301-307. doi:10.1080/15567240808533955
- Pedroni, P. (2002). Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, 653-670. doi:https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1653

- Pedroni, P. (2004). Panel Cointegration: Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests with an Application to the Ppp Hypothesis. *Econometric Theory*, 20, 597-625. doi:<https://doi.org/10.1017/S0266466604203073>
- Perron, P. (1989). The Great Crash, the Oil Price Shock, and the Unit Root Hypothesis. *Econometrica*, 57(6), 1361-1401. <https://doi.org/10.2307/1913712>.
- Perron, P. (1990). Testing for unit root in a time series with a changing mean. *Journal of Business & Economic Statistics*, 8, 153-162.
- Perron, P. (1997). Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variables. *Journal of Econometrics*, 355-385. DOI: 10.1016/s0304-4076(97)00049-3.
- Perron, P., & Vogelsang, T. J. (1992). Nonstationarity and Level Shifts with an Application to Purchasing Power Parity. *Journal of Business & Economic Statistics*, 10(3), 301-320. <https://doi.org/10.2307/1391544>.
- Pervaiz, R., Faisal, F., Rahman, S., Chander, R., & Ali, A. (2021). Do health expenditure and human development index matter in the carbon emission function for ensuring sustainable development? Evidence from the heterogeneous panel. *Air Qual Atmos Health.*, 1773–1784. doi:10.1007/s11869-021-01052-4
- Pesaran, H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326.
- Pesaran, M. H. (1999). Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. *Journal of the American statistical Association*, 94, 621-634.
- Pesaran, M., & Pesaran, B. (1997). *Working with Microsoft 4.0: Interactive Economic Analysis*. Oxford: Oxford University Press.
- Pesaran, M., & Shin, Y. (1995). An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. *Department of Applied Economics, University of Cambridge, England*, DOI: 10.1017/CCOL521633230.011.

- Pesaran, M., Smith, R., & Shin, Y. (1996b). Testing for the existence of a long-run relationship between UK consumption, income and inflation using Pesaran et al. bounds test procedure: A comparative study. *University of Cambridge*, DOI: 10.13140/RG.2.1.4498.1605.
- Pettersson, F., Soderholmb, P., & Lundmark, R. (2012). Fuel switching and climate and energy policies in the European power generation sector: a generalized Leontief model. *Energy Economics*, 34(1), 183–98. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.09.001.
- Phillips, P. C., & Hansen, B. E. (1990). Statistical Inference in Instrumental Variables Regression with I(1) Processes. *The Review of Economic Studies*, 57(1), 99-125. doi:10.2307/2297545 .
- Phillips, P., & Perron, P. (1988). Testing for a Unit Root in Time Series Regression. *Biometrika*, 75(2), 335-356. doi:10.2307/2336182 .
- Pîrlogea, C. (2012). The Human Development Relies on Energy. Panel Data Evidence. *Procedia Economics and Finance*, 3, 496-501. doi:https://doi.org/10.1016/S2212-5671(12)00186-4
- PNUD. (1990). *Human Development Report 1990*. Reino Unido: Oxford University Press.
- PNUD. (2007). *Informe Anual 2007: Globalización Inclusiva*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <https://www.undp.org/es/publications/informe-anual-2007-globalizacion-inclusiva>
- PNUD. (2015). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Informe Anual 2015*. Nueva York: One United Nations Plaza.
- PNUD. (2020). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Informe Anual 2019*. Nueva York: One United Nations Plaza.
- PNUD. (2021). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Informe Anual 2020*. Nueva York: Programa de las Naciones Unidas.
- PNUDb. (2015). *UNDP and Energy Access for the Poor: Energizing the Millennium Development Goals*. New York: Environment & Energy.

- Rahman, M., & Kashmen, M. (2017). Carbon emissions, energy consumption and industrial growth in Bangladesh: Empirical evidence from ARDL cointegration and Granger causality analysis. *Energy Policy*, 110, 600-608. doi:10.1016/j.enpol.2017.09.006 .
- Ramirez, F. (2009). Perturbaciones Internacionales y Fluctuaciones del Producto Interno Bruto en una Economía en Desarrollo: Evidencia de República Dominicana para el Período 1998-2008. *MPRA Paper 38987*.
- Razmjoo, A. A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2019). Development of sustainable energy indexes by the utilization of new indicators: A comparative study. *Energy Reports*, 5, 375-383. doi:https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.03.006
- Reddy, B., & Assenza, G. (2009). The great climate debate. *Energy Policy*, 37(8), 2997–3008. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.064
- Rej, S., & Nag, B. (2019). Does socio-economic development impact energy consumption? A causality test for India. *The Journal of Energy and Development*, 44(1), 143-159. doi:10.2307/26863984
- Rosellón, J., & Massa, R. (2017). Links between Production and Consumption of Electricity with Economic Performance in Mexico. *International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1-6, doi: 10.1109/EEM.2017.7981859.
- Saboori, B., Sulaiman, J., & Mohd, S. (2012). Economic growth and CO2 emissions in Malaysia: A cointegration analysis of the Environmental Kuznets Curve. *Energy Policy*, 51, 184-191. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.065
- Salazar-Núñez, H. F., Venegas-Martínez, F., & Tinoco-Zermeño, M. (2020). Impact of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions on Economic Growth: Cointegrated Panel Data in 79 Countries Grouped by Income Level. *International Journal of energy Economics and Policy*, 10(2), 218-226. DOI: https://doi.org/10.32479/ijee.8783.
- Samouilidis, J., & Mitropoulos, C. S. (1984). Energy and economic growth in industrializing countries: the case of Greece. *Energy Economics*, 6(3), 191-206.

- Sanchez-Loor, D. A., & Zambrano-Monserrate, M. A. (2015). Causality Analysis between Electricity Consumption, Real GDP, Foreign Direct Investment, Human Development and Remittances in Colombia, Ecuador and Mexico. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(3), 746–753. Obtenido de <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/1271>
- Santillán-Salgado, R. J., Valencia-Herrera, H., & Venegas-Martínez, F. (2020). On the Interaction among Economic Growth, Energy-Electricity Consumption, CO2 Emissions, and Urbanization in Latin America. *evista Mexicana de Economía y Finanzas, Nueva Época*, 15(4), 745-767. DOI: <https://doi.org/10.21919/remef.v15i4.553>.
- Santillán-Salgado, R. J., Valencia-Herrera, H., & Venegas-Martínez, F. (2020). On The Relations among CO2 Emissions, Gross Domestic Product, Energy Consumption, Electricity Use, Urbanization, and Income Inequality for a sample of 134 Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10, 195-207. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.10070>.
- Sarkodiea, S. A., & Adams, S. (2020). Electricity access, human development index, governance and income inequality in Sub-Saharan Africa. *Energy Reports*, 6, 455-466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.009>
- Sen, A. (1989). Food and Freedom. *World Development*, 17, 769-781. doi: 10.1016/0305-750x(89)90001-6.
- Sen, A. K. (1999). *Development as Freedom*. Alfred A. Knopf.
- SENER. (23 de noviembre de 2018). *Secretaría de Energía*. Obtenido de Prospectivas del Sector Energético: <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>
- Shiu, A., & Lam, L. (2004). Electricity consumption and economic growth in China. *Energy Policy*, 30, 47-54.
- Shobande, O. (2020). The effects of energy use on infant mortality rates in Africa. *Environmental and Sustainability Indicators*, 5, 100015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100015>

- Shrestha, M. B., & Chowdhury, K. (2005). A Sequential Procedure for Testing Unit Roots in the Presence of Structural Break in Time Series Data. *Economics Working Paper Series University of Wollongong*.
- Sierra, A. P. (2015). Uso de variables de actividad económica en la estimación del PIB per cápita microterritorial. *Cuadernos de Economía*, 34(65), 349-376. doi:<https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v34n65.45936>
- Sims, C. A., Goldfeld, S. M., & Sachs, J. D. (1982). Policy analysis with econometric models. *Brookings Papers on Economic Activity*, 107-164 . <https://doi.org/10.2307/2534318>.
- Sinha, A., & Sudipta, S. (2016). Atmospheric consequences of trade and human development: A case of BRIC countries. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 980-989. doi: 10.1016/j.apr.2016.06.003.
- Smulders, S., & Nooij, M. (2003). The impact of energy conservation on technology and economic growth. *Energy Economics*, 25, 33-37. doi: [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(02\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(02)00017-9).
- Sohag, K., Mamun, M., Uddin , G., & Ahmed, A. (2017). Sectoral output, energy use, and CO2 emission in middle-income countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 9754–9764. doi:DOI 10.1007/s11356-017-8599-z
- Solow, R. M. (Febrero de 1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>.
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. doi:10.2307/1884513
- Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312-320. doi:10.2307/1926047
- Soukiazis, E., Proença, S., & Cerqueiraa, P. (2019). The Interconnections between Renewable Energy, Economic Development and Environmental Pollution: A Simultaneous Equation System Approach. *The Energy Journal*, 40(4). doi:DOI: 10.5547/01956574.40.4.esou

- Soytas, U., & Sari, R. (2009). Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member. *Ecological Economics*, 1667-1675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.06.014>
- Squalli, J. (2007). Electricity consumption and economic growth: hounds and causality analyses of OPEC countries. *Energy Economics*, 29, 1192-1205.
- Stern, D. (2000). A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy. *Energy Economics*, 22(2), 267-283.
- Stern, D. (2004). Economic growth and energy. *Encyclopedia of Energy*, 2, 35-51.
- Stern, D. I. (2012). Modeling International Trends in Energy Efficiency. *Energy Economics*, 34(6), 2200-2208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.03.009>.
- Stigler, S. M. (1981). Gauss and the invention of Least Squares. *The Annals of Statistics*, 9(3), 465-474. doi:10.1214/aos/1176345451.
- Swan, T. W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334-361. doi:10.1111/j.14754932.1956.tb00434.x
- Tezanos, S. (2018). Geografía del desarrollo en América Latina y el Caribe: hacia una nueva taxonomía multidimensional de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Revista CEPAL*(125), 7-28. <http://hdl.handle.net/11362/43989>.
- Tiba, S., & Omri, A. (2016). Literature survey on the relationships between energy, environment and economic growth. *Renewable and Sustainable Energy*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.113>.
- Tong, T., Ortiz, J., Xu, C., & Li, F. (2020). Economic growth, energy consumption, and carbon dioxide emissions in the E7 countries: a bootstrap ARDL bound test. *Energy, Sustainability and Society*, 10-20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00253-6>.
- Tugcu, C. T., Ozturk, I., & Aslan, A. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries. *Energy Economics*, 34(6), 1942-1950. doi:10.1016/j.eneco.2012.08.021

- UNCTAD. (2017). Informe sobre los países menos adelantados 2017: El acceso a la energía para la transformación estructural de la economía. *Naciones Unidas*.
- Verbeek, M. (2017). *A guide to modern econometrics*. Australia: Jhon Wiley & Sons.
- Villegas, E. M., Molero, L. E., Rodríguez, V. E., & Andino, T. S. (2022). Los efectos del IDH sobre las emisiones de CO2 en América Latina y el Caribe. *Apuntes del Cenes*, 41(74), 141-175. <https://doi.org/10.19053/01203053.v41.n74.2022.13996>.
- Wang, S., Zhou, D., Zhou, P., & Wang, Q. (2011). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China: A panel data analysis. *Energy Policy*, 39(9), 4870-4875. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.032>
- Wang, Z., Danish, Zhang, B., & Wang, B. (2018). Renewable energy consumption, economic growth and human development index in Pakistan: Evidence form simultaneous equation model. *Journal of Cleaner Production*, 184, 1081-1090. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.260
- Wang, Z., Mansoor, M., Haider, A., Nawaz, K., Wang, B., Zhao, W., & Xu, F. (2020). The Dynamic Relationship between Economic Growth and Life Expectancy: Contradictory Role of Energy Consumption and Financial Development in Pakistan. *Structural Change and Economic Dynamics*, 53(6), 257-266. doi:10.1016/j.strueco.2020.03.004
- WHO. (2022). *Frequently Asked Questions about Ambient and Household Air Pollution and Health*. Obtenido de World Health Organization: <https://www.who.int/vietnam/news/feature-stories/detail/frequently-asked-questions-about-ambient-and-household-air-pollution-and-health>
- Wolde-Rufael, Y. (2004). Disaggregated industrial energy consumption and GDP: the case of Shanghai. *Energy Economics*, 26, 69-75.
- Wolde-Rufael, Y., & Menyah, K. (2010). Nuclear energy consumption and economic growth in nine developed countries. *Energy Economics*, 32(3), 550-556. doi: 10.1016/j.eneco.2010.01.004.
- Wooldridge, J. M. (2010). *Introducción a la econometría. Un enfoque moderno 4ta edición*. Cengage Learning Editores.

- World Energy Council. (2013). *World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050*. doi:ISBN: 978 0 946121 32 8
- Wu, Y., Chau, K., Lu, W., Shen, L., Shuai, C., & Chen, J. (2018). Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 60-69.
- Yang, H. (2000). Coal consumption and economic growth in Taiwan. *Energy sources*, 22(2), 109-115.
- Yildirim, E., Sarac, S., & Aslan, A. (2012). Energy consumption and economic growth in the USA: Evidence from renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 16(9), 6770-6774. doi:10.1016/j.rser.2012.09.004
- Yoo, S. (2005). Electricity consumption and economic growth: evidence from Korea. *Energy Policy*, 33, 1627-1632.
- Yu, E., & Choi, J. (1985). The casual relationship between energy and GNP: an international comparison. *Journal of Energy and Development*, 10(2), 249-272.
- Yuan, J.-H., Kang, J.-G., Zhao, C.-H., & Hu, Z.-G. (2008). Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from China at both Aggregated and Disaggregated Levels. *Energy Economics*, 30(6), 3077-3094. doi:10.1016/j.eneco.2008.03.007
- Yumashev, A., Ślusarczyk, B., Kondrashev, S., & Mikhaylov, A. (2020). Global Indicators of Sustainable Development: Evaluation of the Influence of the Human Development Index on Consumption and Quality of Energy. *Energies*, 13(11), 3–13. doi:10.3390/en13112768
- Zahnd, A., & Kimber, H. M. (2009). Benefits from a renewable energy village electrification system. *Renewable Energy*, 34(2), 362-368. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.011
- Zilio, M. (2008). Emisiones de dióxido de carbono en América Latina. Un aporte al estudio del cambio climático. *Economía y Sociedad*, 133-161.
- Zivot, E., & Andrews, D. (1992). Further Evidence on the Great Crash, the Oil-Price Shock, and the Unit-Root Hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics.*, 10(3), 251-270. doi:10.2307/1391541.

# Anexo 1

Valores críticos para la prueba de límites "bound test" del Caso III: constante no restringida y sin tendencia

n	k=0		k=1		k=2		k=3		k=4		k=5		k=6		k=7	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
<b>1% nivel de significancia</b>																
30	13.680	13.680	8.170	9.285	6.183	7.873	5.333	7.063	4.768	6.670	4.537	6.370	4.270	6.211	4.104	6.151
35	13.290	13.290	7.870	8.960	6.140	7.607	5.198	6.845	4.590	6.368	4.257	6.040	4.016	5.797	3.841	5.686
40	13.070	13.070	7.625	8.825	5.893	7.337	5.018	6.610	4.428	6.250	4.045	5.898	3.800	5.643	3.644	5.464
45	12.930	12.930	7.740	8.650	5.920	7.197	4.983	6.423	4.394	5.914	4.030	5.598	3.790	5.411	3.595	5.225
50	12.730	12.730	7.560	8.685	5.817	7.303	4.865	6.360	4.306	5.874	3.955	5.583	3.656	5.331	3.498	5.149
55	12.700	12.700	7.435	8.460	5.707	6.977	4.828	6.195	4.244	5.726	3.928	5.408	3.636	5.169	3.424	4.989
60	12.490	12.490	7.400	8.510	5.697	6.987	4.748	6.188	4.176	5.676	3.783	5.338	3.531	5.081	3.346	4.895
65	12.400	12.400	7.320	8.435	5.583	6.853	4.690	6.143	4.188	5.694	3.783	5.300	3.501	5.051	3.310	4.871
70	12.240	12.240	7.170	8.405	5.487	6.880	4.635	6.055	4.098	5.570	3.747	5.285	3.436	5.044	3.261	4.821
75	12.540	12.540	7.225	8.300	5.513	6.860	4.725	6.080	4.168	5.548	3.772	5.213	3.496	4.966	3.266	4.801
80	12.120	12.120	7.095	8.260	5.407	6.783	4.568	5.960	4.096	5.512	3.725	5.163	3.457	4.943	3.233	4.760
<b>5% nivel de significancia</b>																
30	8.770	8.770	5.395	6.350	4.267	5.473	3.710	5.018	3.354	4.774	3.125	4.608	2.970	4.499	2.875	4.445
35	8.640	8.640	5.290	6.175	4.183	5.333	3.615	4.913	3.276	4.630	3.037	4.443	2.864	4.324	2.753	4.209
40	8.570	8.570	5.260	6.160	4.133	5.260	3.548	4.803	3.202	4.544	2.962	4.338	2.797	4.211	2.676	4.130
45	8.590	8.590	5.235	6.135	4.083	5.207	3.535	4.733	3.178	4.450	2.922	4.268	2.764	4.123	2.643	4.004
50	8.510	8.510	5.220	6.070	4.070	5.190	3.500	4.700	3.136	4.416	2.900	4.218	2.726	4.057	2.593	3.941
55	8.390	8.390	5.125	6.045	3.987	5.090	3.408	4.623	3.068	4.334	2.848	4.160	2.676	3.999	2.556	3.904
60	8.460	8.460	5.125	6.000	4.000	5.057	3.415	4.615	3.062	4.314	2.817	4.097	2.643	3.939	2.513	3.823
65	8.490	8.490	5.130	5.980	4.010	5.080	3.435	4.583	3.068	4.274	2.835	4.090	2.647	3.921	2.525	3.808
70	8.370	8.370	5.055	5.915	3.947	5.020	3.370	4.545	3.022	4.256	2.788	4.073	2.629	3.906	2.494	3.786
75	8.420	8.420	5.140	5.920	3.983	5.060	3.408	4.550	3.042	4.244	2.802	4.065	2.637	3.900	2.503	3.768
80	8.400	8.400	5.060	5.930	3.940	5.043	3.363	4.515	3.010	4.216	2.787	4.015	2.627	3.864	2.476	3.746
<b>10% nivel de significancia</b>																
30	6.840	6.840	4.290	5.080	3.437	4.470	3.008	4.150	2.752	3.994	2.578	3.858	2.457	3.797	2.384	3.728
35	6.810	6.810	4.225	5.050	3.393	4.410	2.958	4.100	2.696	3.898	2.508	3.763	2.387	3.671	2.300	3.606
40	6.760	6.760	4.235	5.000	3.373	4.377	2.933	4.020	2.660	3.838	2.483	3.708	2.353	3.599	2.260	3.534
45	6.760	6.760	4.225	5.020	3.330	4.347	2.893	3.983	2.638	3.772	2.458	3.647	2.327	3.541	2.238	3.461
50	6.740	6.740	4.190	4.940	3.333	4.313	2.873	3.973	2.614	3.746	2.435	3.600	2.309	3.507	2.205	3.421
55	6.700	6.700	4.155	4.925	3.280	4.273	2.843	3.920	2.578	3.710	2.393	3.583	2.270	3.486	2.181	3.398
60	6.700	6.700	4.145	4.950	3.270	4.260	2.838	3.923	2.568	3.712	2.385	3.565	2.253	3.436	2.155	3.353
65	6.740	6.740	4.175	4.930	3.300	4.250	2.843	3.923	2.574	3.682	2.397	3.543	2.256	3.430	2.156	3.334
70	6.670	6.670	4.125	4.880	3.250	4.237	2.818	3.880	2.552	3.648	2.363	3.510	2.233	3.407	2.138	3.325
75	6.720	6.720	4.150	4.885	3.277	4.243	2.838	3.898	2.558	3.654	2.380	3.515	2.244	3.397	2.134	3.313
80	6.720	6.720	4.135	4.895	3.260	4.247	2.823	3.885	2.548	3.644	2.355	3.500	2.236	3.381	2.129	3.289

Fuente: tabla tomada y adaptada de (Narayan, 2005).