



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ECONOMÍA  
FACULTAD DE ECONOMÍA ♦ DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO

“RELACIÓN ENTRE EL CONSUMO DE GAS NATURAL Y  
CRECIMIENTO ECONÓMICO: UN ANÁLISIS DE DATOS PANEL  
PARA MÉXICO”

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN ECONOMÍA

P R E S E N T A:  
LEONEL IVÁN MOLINA CARREÓN

TUTOR:  
Dr. SAÚL BASURTO HERNÁNDEZ  
Facultad de Economía, UNAM

MIEMBROS DEL JURADO:  
Mtro. EDUARDO VEGA LÓPEZ  
Facultad de Economía, UNAM

Mtra. KARINA CABALLERO GÜENDULAIN  
Facultad de Economía, UNAM

Dr. DAVID BONILLA VARGAS  
IIEc, UNAM

Dr. BENJAMÍN GARCÍA PÁEZ  
Facultad de Economía, UNAM





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





## **Resumen**

Históricamente las formas en las que el hombre ha dispuesto de las fuentes de energía externas a lo largo de la historia han evolucionado en paralelo con la sociedad en sí, el desarrollo a pasos agigantados de la sociedad moderna y sus grandes requerimientos de energía para mantener este proceso han ocasionado un gran interés en conocer el vínculo entre el consumo de energía y el crecimiento económico, por lo que el objetivo principal de esta tesis es determinar la relación que existe entre el consumo de gas natural y el Producto Interno Bruto (PIB) en México. Para dar cumplimiento a este objetivo se empleó un análisis de datos panel conformado por el consumo sectorial de gas natural en los estados del país en el periodo 2005 – 2019, los resultados mostraron que en los modelos estáticos el consumo de gas natural no es determinante en los niveles de PIB en el país, sin embargo, la cointegración de las variables permitió determinar su relación en el largo plazo, donde el consumo de gas natural tiene una relación positiva con el PIB, finalmente, estos resultados demuestran que en el largo plazo es requerida una política tal que incentive el consumo de gas natural entre los sectores.

**Palabras clave:** datos panel, consumo de gas natural, crecimiento económico, largo plazo.

# Índice

<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Marco Teórico</b> .....	5
II.I. Teorías del crecimiento.....	5
II.I.I. Modelo de crecimiento exógeno: Modelo de Solow.....	5
II.I.II. Modelo de crecimiento endógeno .....	7
II.II. Crecimiento económico, recursos naturales y energía.....	9
II.II.I. Modelo de Solow .....	9
II.II.II. Modelo de Romer.....	11
II.II.III. Consumo de energía y crecimiento económico.....	12
<b>III. Revisión de literatura sobre consumo de gas natural y crecimiento económico</b> .....	15
III.I. Evidencia .....	15
III.I.I. Variables .....	19
III.I.II. Metodología .....	20
III.I.III. Resultados .....	21
III.I.IV. Evidencia para México.....	22
<b>IV. Situación de México en materia de Gas Natural</b> .....	23
IV.I. Perfil energético de México .....	23
IV.II. Mercado de gas natural .....	25
IV.III. Oferta y demanda del gas natural en México.....	28
IV.IV. El gas natural, clave en la transición energética .....	31
IV.V. Seguridad energética: El caso del gas natural.....	33
<b>V. Marco metodológico y Materiales</b> .....	36
V.I. Modelos de regresión.....	36
V.I.I. Pooled OLS (POLS).....	36
V.I.II. Efectos fijos (FE) .....	36
V.I.III. Efectos aleatorios (RE) .....	38
V.I.IV. Prueba de Hausman.....	39
V.II. Estacionareidad: Prueba de raíz unitaria.....	39
V.II.I. Prueba Dickey – Fuller Aumentada (ADF) .....	40
V.II.II. Prueba Phillips – Perron (PP).....	41
V.II.III. Prueba Pesaran & Shin (IPS) .....	41

V.III. Cointegración.....	42
V.III.I. Prueba de Kao .....	42
V.III.II. Prueba de Pedroni .....	44
V.IV. Fully Modified OLS (FMOLS).....	45
V.V. Materiales .....	47
V.V.I. Construcción de la base de datos .....	48
<b>VI. Resultados</b> .....	<b>50</b>
V.I. Resultados empíricos .....	50
V.I.I. Regresiones .....	50
V.I.II. Estacionareidad .....	52
V.I.III. Cointegración .....	53
V.I.IV. Largo plazo .....	54
V.II. Discusión de resultados .....	55
<b>VII. Conclusiones</b> .....	<b>58</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>62</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>65</b>
a. Modelo de Solow .....	65
b. Modelos de crecimiento endógeno .....	67
<b>Anexo 2</b> .....	<b>69</b>
a. Resultados empíricos a nivel de actividades industriales .....	70
a.I. Regresiones .....	70
a.II. Estacionareidad .....	71
a.III. Cointegración .....	71
a.IV. Largo plazo .....	72
b. Discusión de resultados .....	73

## Índice de tablas

Tabla 1. Estudios empíricos sobre el consumo de gas natural y crecimiento económico ....	16
Tabla 2. Descripción de variables.....	48
Tabla 3. Coeficientes estimados .....	50
Tabla 4. Resultados prueba de Hausman.....	51
Tabla 5. Pruebas de Raíz Unitaria .....	52
Tabla 6. Pruebas de Cointegración.....	53
Tabla 7. Resultados FMOLS .....	54
Tabla 8. Descripción de variables actividades industriales .....	69
Tabla 9. Coeficientes estimados a nivel de actividades industriales .....	70
Tabla 10. Resultados prueba de Hausman actividades industriales .....	70
Tabla 11. Pruebas de Raíz Unitaria actividades industriales.....	71
Tabla 12. Pruebas de Cointegración actividades industriales.....	72
Tabla 13. Resultados FMOLS actividades industriales.....	72

## Índice de figuras

Fig. I. Suministro energético de México. ....	24
Fig. II. Producción nacional de gas natural. ....	26
Fig. III. Composición de la oferta nacional de gas natural.....	29
Fig. IV. Composición de la demanda nacional de gas natural .....	31
Fig. V. Modelo de Solow. Comportamiento de las inversiones .....	66

## I. Introducción

Los cada vez más altos requerimientos de energía a nivel global han ocasionado que en las últimas décadas se haya generalizado el estudio de la relación que guardan el consumo de energía y el crecimiento económico. Los planteamientos teóricos que han emanado de la necesidad de determinar esta relación sugieren que la energía es un factor determinante en el proceso de producción que, al igual que el capital y el trabajo, incorpora valor agregado al producto final, por lo que la disponibilidad de esta y su consumo son elementos sobre los cuales se ha de prestar atención.

Los estudios empíricos que se han llevado a cabo para investigar esta relación no han permitido homologar los resultados y establecer una secuencia específica sobre el cómo determinarla, los resultados difieren de país a país y entre estudios realizados para un mismo país, consecuencias de las metodologías y los datos empleados en cada uno de estos.

Autores como Awodumi y Adewuyi (2020) sostienen que efectuar estudios sobre las distintas fuentes de energía de manera desagregada permiten tener mejores aproximaciones a la relación existente entre consumo de energía y crecimiento económico. La mayoría de estos estudios se han abordado con el consumo total de energía y crecimiento económico, aunque en México se han realizado estudios para determinar esta relación, estos se han abordado a partir de la relación entre el consumo total de energía y el crecimiento económico, o sobre el consumo de electricidad y el crecimiento económico, Gómez (2015), o de manera conjunta con otros países, no se ha hecho un estudio desagregado sobre todas las fuentes de energía, en este caso, sobre el consumo de gas natural y crecimiento económico.

El gas natural como fuente de energía ha cobrado una relevancia importante en los últimos años, esto debido a su carácter como el energético de transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables [CNH, 2018, p. 18], además de ser de los hidrocarburos más baratos<sup>1</sup> por millón de BTU<sup>2</sup>. En México su consumo se ha mantenido al alza por décadas en los distintos sectores, producto de su implementación cada vez mayor como fuente de energía en el sector industrial y su uso para generar energía eléctrica en las centrales de ciclo

---

<sup>1</sup> Según los datos reportados por la SENER en marzo del 2022 el gas natural promedió 4.76 USD/MMBTU, el combustóleo 17.72 USD/MMBTU, el gas licuado a presión 30.63 USD/MMBTU, el diésel 34.79 USD/MMBTU y el gas natural licuado 38.79 USD/MMBTU.

<sup>2</sup> Unidad térmica británica: Cantidad de energía que se requiere para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales.

combinado, finalmente, la situación del país con respecto a este hidrocarburo es privilegiada, es un país productor de petróleo y gas con altos valores prospectivos y tiene acceso a uno de los mercados de gas natural con los precios más bajos del mercado, el de Estados Unidos.

Dentro de los círculos político y económico se discute sobre el consumo del gas natural como determinante del crecimiento económico del país. En documentos oficiales como el Plan Quinquenal de Expansión del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural 2020-2024, SENER (2020), en el apartado 2.2 sobre Principales políticas y programas se plantea que el consumo de gas natural tiene una relación positiva con el Producto Interno Bruto de las entidades federativas por lo que alentar su consumo generará crecimiento económico dadas las cualidades de este. La tesis busca determinar si existe o no justificación de este señalamiento.

Al conocer la relevancia del gas natural en el país, observar los datos estadísticos recabados por instancias gubernamentales, y con base en los planteamientos anteriores sobre la relación positiva entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico se plantea la siguiente interrogante: ¿Aumentar el consumo de gas natural en el sector productivo de México contribuye con el crecimiento económico del país?

Considerando que la energía es vital para el desempeño de la economía como un factor que crea valor y que por ende se debe incorporar en la lista de factores de producción al igual que el capital y el trabajo en la teoría económica, la hipótesis aquí planteada es que al incrementar el consumo de gas natural como *proxy* del consumo de energía en el sector productivo de México contribuye con su crecimiento económico.

Además, se plantean las siguientes hipótesis particulares:

- El Producto Interno Bruto y el consumo de gas natural son variables que se cointegran en tiempo.
- En el largo plazo el consumo de gas natural incide en el crecimiento económico al incrementar el Producto Interno Bruto en México.

Con la finalidad de corroborar las hipótesis antes planteadas, se establece como objetivo general la determinación de la relación que existe entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico en México en el periodo 2005 – 2019 a través del análisis econométrico de datos tipo panel obtenidos a nivel estatal. Los objetivos particulares son:

- Determinar si el consumo de gas natural y el Producto Interno Bruto cointegran en el tiempo a través de las pruebas de Pedroni y Kao.
- Si existe cointegración entre los parámetros, determinar la relación de equilibrio que guardarán el consumo de gas natural y el Producto Interno Bruto en largo plazo a través de un análisis dinámico, finalmente,
- Evaluar y proponer política pública enfocada en la relación del consumo de gas natural y el crecimiento económico en México.

Por lo anterior resulta fundamental cumplir con el objetivo de esta tesis sobre la determinación de la relación entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico en México ya que esto permite desarrollar políticas energéticas como bastión para el crecimiento económico del país.

Para cumplir con estos fines, esta tesis se encuentra dividida en siete capítulos . En el Capítulo I se establecen los fundamentos bajo los cuales se sustenta esta tesis tal y como lo es la identificación del problema, pregunta de investigación, justificación, hipótesis y objetivos.

En el Capítulo II se presentan el marco teórico donde se describen las distintas teorías que se han planteado sobre el crecimiento económico, transitando del modelo de crecimiento exógeno de Solow a los modelos de crecimiento endógeno, y cómo a partir de estos últimos los recursos naturales se incorporaron en los modelos de crecimiento, todo esto para finalmente aterrizar en la incorporación de la energía como un factor de producción más dentro de las funciones que describen el crecimiento económico.

El Capítulo III hace un recuento de la literatura empírica que se ha desarrollado en torno a la determinación sobre la relación que guarda el consumo de gas natural como proxy del consumo de energía y el crecimiento económico a nivel internacional.

En el Capítulo IV se presenta la situación del gas natural en México con una descripción del mercado de este hidrocarburo, cómo se encuentra formada su oferta y demanda, su relevancia en la transición energética y finalmente lo concerniente a la seguridad energética nacional.

En el Capítulo V se describen los modelos y pruebas econométricas que se emplearán en esta tesis para determinar la relación que existe entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico de México, iniciando con el modelo más simple OLS, prosiguiendo

con los modelos FE, RE y la prueba de Hausman para determinar cuál resulta en una mejor aproximación. Para establecer la relación dinámica se inicia con las pruebas de raíz unitaria, siguiendo con las de cointegración y finalmente estimando el modelo FMOLS para determinar la relación en el largo plazo de las variables. Además, el capítulo sirve para hacer una descripción de las variables empleadas en este estudio y la conformación de la base de datos.

En el Capítulo VI se muestran los resultados de las regresiones Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés), Efectos Fijos (FE), Efectos Aleatorios (RE) y Mínimos Cuadrados Ordinarios Completamente Modificados (FMOLS), así como el análisis de estos. Finalmente, en el Capítulo VII se establecen una serie de conclusiones y recomendaciones desprendidas del análisis desarrollado en esta tesis.

## II. Marco Teórico

Las distintas teorías del crecimiento han sido la respuesta que muchos economistas han dado sobre cómo funciona el sistema productivo y la forma en la que este se relaciona con la sociedad en su conjunto, cada economista ha efectuado sus planteamientos bajo términos distintos, sin embargo, generalmente se ha utilizado al Producto Interno Bruto (PIB) como medida del crecimiento económico.

Para el análisis actual del crecimiento económico son dos los enfoques que más predominan, el primero en surgir, el neoclásico, se caracteriza por modelar el crecimiento económico a partir de elementos externos a la economía (ya sea como limitante o por búsqueda de simplificar el análisis) lo que ha derivado en una serie de críticas sobre la exclusión de elementos internos de cada economía que contribuyen en el crecimiento. El modelo de crecimiento exógeno más reconocido es el desarrollado por Robert Solow. El segundo enfoque surge con la justificación de contrarrestar el problema de la exogeneidad de elementos, los modelos de crecimiento endógeno reconocen la importancia de las condiciones específicas de cada país en el crecimiento económico más allá de solo considerar como elementos causales al trabajo y capital. Estos modelos incorporan algunos de los elementos neoclásicos, pero recalando la importancia de elementos como la política económica y el capital humano en el crecimiento económico.

Los modelos de crecimiento endógeno y su particularidad de incorporar elementos específicos de cada economía contribuyeron al estudio del nexo entre el crecimiento económico y los recursos naturales, conocer como las dotaciones limitadas de estos recursos se ven involucradas en las posibilidades de crecimiento de los países, y de manera más específica, el nexo entre el consumo de energía y crecimiento.

### II.I. Teorías del crecimiento

#### II.I.I. Modelo de crecimiento exógeno: Modelo de Solow

La función de producción sobre la que se basa el modelo de Solow (1956) está compuesta por cuatro variables: *producción* Y, *capital* K, *trabajo* L y *tecnología* A. Uno de los primeros supuestos de este modelo es que en cualquier periodo de tiempo la economía está dotada de determinada cantidad de K, L y A.

$$Y(t) = F(K(t), A(t)L(t)) \dots 1$$

En la ec. 1 se representa esta función,  $t$  representa el tiempo. El término  $AL$  de la función se denomina *trabajo efectivo*, el cual, en conjunto con los otros supuestos, implica que el ratio capital – producción  $\left(\frac{K}{Y}\right)$  se estabiliza al cabo de cierto tiempo [Romer, 2006, p. 11]. Es necesario acotar que en este caso el tiempo no interviene directamente en la función, como se observa, el tiempo se encuentra vinculado a las variables explicativas  $K$ ,  $A$  y  $L$ , por lo que un cambio de  $Y$  en el tiempo solo es posible si las dotaciones de  $K$ ,  $L$  y  $A$  cambian.

La hipótesis básica del modelo es que la función de producción cuenta con rendimientos constantes a escala en los factores de  $K$  y  $AL$ , lo que significa que, al multiplicarse la cantidad de  $K$  y  $L$ ,  $Y$  aumentará en la misma proporción. Esta consideración surge a partir de que Solow considera que la economía es lo suficientemente grande (desarrollada) como para que si se duplican las cantidades de trabajo y capital los nuevos factores se exploten básicamente de la misma forma que los ya existentes y la producción se duplique [Romer, 2006, p. 12], la segunda consideración para que ocurra esto es que factores distintos a  $K$  y  $L$ , tierra y recursos naturales, son irrelevantes. La siguiente ecuación representa este punto.<sup>3</sup>

$$F(cK, cAL) = cF(K, AL) \quad \dots 2$$

Aceptada de manera generalizada, la función que mejor describe la forma en la cual el capital y el trabajo es transformado en producción (PIB) en las economías es la desarrollada por el matemático Charles Cobb y el senador Paul Douglas en la década de 1920, esta función, denominada función de producción Cobb – Douglas se describe de la siguiente manera:

$$Y = F(K, L) = AK^\alpha L^{1-\alpha}$$

donde  $\alpha$  es una constante entre 1 y 0 que mide la proporción del capital en la producción.

Surgen varios señalamientos a este modelo de crecimiento comenzando por el hecho de que conlleva una simplificación extrema de varios aspectos, como lo es la consideración de que se produce un solo bien, prescinde totalmente de la intervención del Estado en la economía, ignora las fluctuaciones del empleo y considera constante las tasas de crecimiento de la población y el progreso tecnológico, así como la tasa de depreciación [Romer, 2006, p. 15], y, como se mencionó antes, el modelo considera irrelevante otros factores productivos como la tierra y los recursos naturales. Finalmente, estos modelos explican que se presenta

---

<sup>3</sup> Para mayor desglose del modelo de Solow ver Anexo 1.

crecimiento en el largo plazo solo si hay mejoras tecnológicas, pero no hay progreso tecnológico dentro del propio modelo [Jiménez, 2011, p. 431].

Otra consideración derivada de los resultados de Solow, objeto también de observaciones, es que los distintos niveles de renta entre países solo se explican a través de las diferencias entre la eficacia del trabajo en cada uno, dejando de lado un sin fin de factores determinantes, por otro lado, este modelo se extiende para economías desarrolladas, por lo que su aplicación a economías en desarrollo presenta complicaciones.

### II.I.II. Modelo de crecimiento endógeno

Como respuesta a las limitantes en los modelos neoclásicos de crecimiento surge una nueva teoría, *la teoría del crecimiento endógeno*, la cual abandona algunos de los supuestos neoclásicos, principalmente la exogeneidad de algunos factores de producción, abocándose en un crecimiento económico desde dentro del sistema [Jiménez, 2011, p. 431], además de explicar otros elementos en los cuales la teoría neoclásica falló, como la explicación del desarrollo de la fuerza de trabajo efectivo resultante de nuevas tecnologías y la divergencia entre el crecimiento de las economías de los países. Estas teorías de crecimiento pueden dividirse en las de primera generación, Arrow (1962) y Frankel (1962), y en las de la segunda generación, Paul Romer (1986), Robert Lucas (1988) y Barro (1990).

El modelo de Romer (1986) se deriva del modelo de Arrow (1962)<sup>4</sup> pero plantea su propia modificación de los modelos neoclásicos, donde el producto per cápita puede crecer ilimitadamente y este puede no converger en todos los países ya que el crecimiento puede ser más lento en países subdesarrollados o simplemente no ocurrir, y destaca que estos resultados no dependen de cambios tecnológicos exógenos [Romer, 1986, p. 1003], también asegura que la población de los países puede ser constante, así como las preferencias y tecnología, y hace explícito el abandono de los rendimientos decrecientes del capital, además, la acumulación de conocimiento permite el crecimiento económico en el largo plazo, la *productividad marginal* del conocimiento es *creciente* ya que genera una externalidad positiva en la producción de las firmas que no pueden patentar o resguardar perfectamente su conocimiento [Romer, 1986, p. 1003], hay una *retroalimentación* entre el conocimiento y aumento de la producción, con el aumento del conocimiento crece la producción, y si la

---

<sup>4</sup> Para el desglose de los modelos de Arrow (1962) y Frankel (1962) ver Anexo.1

producción crece, también lo hace el conocimiento. Se obtiene así un modelo de crecimiento endógeno con retornos crecientes a escala de  $Y$ .

Arrow (1962) y Romer (1986) parten de la misma función de producción  $Y = AK^{\alpha+\gamma(1-\alpha)}L^{1-\alpha}$ , con la diferencia de que Romer establece  $\gamma = 1$ , con lo que el progreso técnico (variable endógena de cada economía) queda definido como  $H = K$ , siendo proporcional a la acumulación de capital. El siguiente supuesto planteado por Romer es que la fuerza laboral se mantiene constante, por lo que  $L$  toma el valor de 1, siendo así que la tasa de crecimiento de la economía no va a depender de  $n$ , ya que busca que su explicación del crecimiento económico se efectúe sin hacer alusión de variables exógenas [Jiménez, 2011, p. 482]. Su función de producción queda definida como la ec. 3:

$$Y = AK^{\alpha}(HL)^{1-\alpha} = AK^{\alpha}(KL)^{1-\alpha} = AK^{\alpha+(1-\alpha)} = AK \dots 3$$

A partir de las derivaciones correspondientes (remitirse a [Jiménez, 2011, p. 480 - 484]), y gracias a la forma del modelo  $AK$ , se obtiene que la tasa de crecimiento del producto es igual a la tasa de crecimiento del capital:

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{K}}{K} = sA \dots 4$$

donde el stock de capital está formado por un componente físico y otro humano, este último es el derivado de la externalidad que genera el conocimiento a partir de la acumulación de  $K$ . Por la ec. 4, en el modelo de Romer el crecimiento de  $K$  es consecuencia de la inversión que se haga en investigación  $(sA)^5$ .

Algunas consideraciones finales sobre estos modelos que han sido tema de debate entre los economistas son las referentes a la convergencia de las economías, a diferencia de los modelos de crecimiento neoclásicos, en los modelos endógenos de primera generación existe la posibilidad de que se alcance o no el estado estacionario debido a la incorporación del progreso técnico, mientras que en el modelo de Romer (1986) se supone un crecimiento ilimitado de la economía. Algunos estudios empíricos han demostrado que entre las economías se presenta una *convergencia condicional* a los parámetros de cada una de ellas, y siendo que se reconoce que los modelos neoclásicos predicen convergencias condicionadas, son mejores aproximaciones que los endógenos, sin embargo, el debate primordial es establecer si existe o no un estado estacionario [Jiménez, 2011, p. 500].

---

<sup>5</sup>  $s$  es la proporción de  $K$  destinada a la inversión.

## II.II. Crecimiento económico, recursos naturales y energía

Los modelos de crecimiento endógeno han servido de ejemplo para presentar nuevas variantes de modelos que expliquen de mejor forma a las economías, se facilita la incorporación de variables endógenas en las funciones de producción como la energía y los recursos naturales, condiciones que son variables en cada país ya que la dotación de recursos y la eficiencia energética varía entre estos. Considerar estos recursos supone su importancia dentro del crecimiento a largo plazo de las economías.

La incorporación de los recursos naturales en la teoría económica no se remonta al siglo pasado, el análisis efectuado por los economistas clásicos incorporaba el factor de la tierra: Malthus (1798) destacó que la población humana crece según una progresión geométrica mientras que la capacidad de aprovechar los recursos naturales lo hace con una progresión aritmética, es decir, más lentamente, lo que desembocaría en una catástrofe. Ricardo (1817) incorpora los rendimientos decrecientes de la tierra, ya que con el crecimiento de la población la productividad de las tierras disminuiría al incorporar tierras de menor calidad, aún con esto se alcanza en el largo plazo un estado estacionario. Stuart Mill (1862) analizó cómo la tierra finita puede imponer límites al crecimiento, pero dicho límite se contrarresta por el avance tecnológico. Por su parte, Marx considera a la tierra (como elemento natural) junto con la fuerza de trabajo como las bases primordiales de toda producción capitalista, *Como en el primer día de la producción, convergen aquí el hombre y la naturaleza, esto es, los creadores originarios del producto, y por tanto los creadores también de los elementos materiales del capital* [Marx, 2009, p. 747]. Sin embargo, los modelos neoclásicos, y aquellos que rescatan elementos de esta corriente, son los que actualmente tienen mayor aceptación en el análisis económico, por lo que en las secciones siguientes son estos modelos los que se desarrollan.

### II.II.I. Modelo de Solow

En 1978 Solow presenta un análisis de cómo los recursos naturales, específicamente los no renovables, interfieren en el crecimiento económico en EE. UU. partiendo de la pregunta ¿cuál ha sido el efecto sobre el crecimiento económico pasado de la disponibilidad diferencial de recursos naturales? [Solow, 1978, p. 52]. Para Solow la relación entre los recursos naturales y el crecimiento se basa en 3 factores: la importancia de los recursos naturales como

factores, el grado de sustitución entre ellos y los otros factores (es posible la sustitución), y el progreso tecnológico [Solow, 1978, p. 53], gracias a los dos primeros factores, los recursos pueden ser incorporados en la función de producción para el análisis.

El tema de la sustitución entre recursos naturales y los otros factores de producción se asume desde el hecho de que en la producción se puede hacer una modificación para utilizar menos bienes que son intensivos en recursos naturales, y que dicha sustitución, o ajuste, es más fácil en el largo plazo. El análisis de Solow se basa en el precio de los recursos naturales, si se considera una función de producción  $Q = F(K, L, R)$ , donde  $R$  representa el flujo de recursos naturales, propone que la producción neta en la economía es la ec. 5.

$$Y = Q - pR \quad \dots 5$$

donde  $p$  es el precio del recurso natural. A partir de la ec. 5 se considera el efecto del comercio de recursos naturales en la producción, ya que su precio afecta a  $Y$ . Solow define a la elasticidad de  $Y$  con respecto a  $p$  como  $-\frac{s}{1-s}$ , donde  $s$  es la elasticidad de  $Q$  con respecto a  $R$ . Solow muestra que para economías desarrolladas  $s$  es un número mínimo, por lo que estas economías son invulnerables a cambios en los precios de los recursos al no ser tan importantes en la producción agregada [Solow, 1978, p. 54].

Para simplificar su análisis, separando los efectos de  $R$ ,  $K$  y  $L$  en la producción y para considerar que la sustitución entre factores es constante, Solow recurre a una función de producción Cobb – Douglas:

$$F(K, L, R) = [aR^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + bC^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\sigma/(\sigma-1)} \quad \dots 6$$

donde  $C = f(K, L)$ ,  $a$  y  $b$  son medidas de la importancia de  $R$  y  $C$  en la producción y  $\sigma$  es la elasticidad de sustitución entre  $R$  y  $C$ , por lo que si  $\sigma = \infty$  se presenta una sustitución 1:1 entre  $R$  y  $C$ . En esta forma Solow redefine a  $s$  como  $s = a^\sigma p^{1-\sigma}$ .

Del análisis anterior se desprenden 3 conclusiones: 1. Si  $p$  y  $\sigma$  están dados,  $a$  determina si  $s$  es mayor o menor, para este caso, un aumento en  $p$  es más perjudicial para el crecimiento si para la economía los recursos naturales son importantes. 2. Si  $a$  y  $p$  están dados,  $s$  aumenta si  $\sigma$  disminuye y viceversa, por lo que aumentos en  $p$  afectan el crecimiento cuando la sustitución entre  $R$  y  $C$  es difícil. 3. Si  $a$  y  $\sigma$  están dados,  $s$  aumenta si  $p$  aumenta cuando  $\sigma < 1$ , si  $\sigma > 1$  con un  $p$  mayor,  $s$  disminuye, a medida que los recursos se vuelven cada vez más

escasos, su escasez se vuelve cada vez menos capaz de dañar la producción neta de la economía [Solow, 1978, p. 55].

Lo anterior se justifica debido a que los incrementos en los precios de los recursos naturales incentivan el progreso tecnológico, por lo que si  $a$  aumenta en el tiempo constituye un *resource-aumenting technological progress*, si el consumo de los recursos naturales cae puede ser compensado en la misma proporción por este progreso tecnológico o por el aumento en  $K$  y/o  $L$ . Finalmente, Solow destaca que la economía se vuelve más vulnerable a la escasez de recursos si  $s$  aumenta con el transcurso del tiempo [Solow, 1978, p. 56-57].

### II.II.II. Modelo de Romer

El modelo de Romer (2006) incorpora no solo a los recursos naturales y la tierra, sino también la contaminación generada por el proceso productivo. Su modelo parte de una función de producción bajo los supuestos neoclásicos para simplificar el análisis:

$$Y = K^{\alpha} R^{\beta} T^{\gamma} (AL)^{1-\alpha-\beta-\gamma} \text{ con } 1 > \alpha + \beta + \gamma \dots 7$$

con  $R$  como el flujo de recursos naturales y  $T$  la superficie de tierra. Considera que las dotaciones de  $R$  y  $T$  son finitas y disminuyen con el tiempo. La incorporación de  $R$  y  $T$  hace que la convergencia a un estado estacionario no sea clara [Romer, 2006, p. 40].

En sus resultados coincide con el hecho de que la disminución de  $R$  limita el crecimiento económico, sin embargo, el progreso tecnológico compensa esto y estimula el crecimiento al ser un estímulo más grande que la limitante de los recursos permitiendo el crecimiento sostenido cuando la elasticidad de sustitución entre factores es mayor a 1 [Romer, 2006, p. 42], la limitante de los recursos naturales aumenta cuando la participación de estos en la economía es grande. Por el contrario, si se tiene una elasticidad de sustitución menor a 1,  $R$  tiene mayor participación en la producción, y considerando que su stock disminuye, la renta lo hará con este, sustentando su hipótesis de que en el largo plazo un stock fijo de  $R$  sustenta la caída de la renta (limita el crecimiento) [Romer, 2006, p. 44].

Finalmente, en su análisis incorpora de manera cualitativa las implicaciones de la generación de contaminación en el crecimiento económico, la primera limita a la segunda. Destaca que la contaminación no se incorpora adecuadamente en las estimaciones del crecimiento, ya que de hacerlo se observaría como se reducen las estimaciones convencionales sobre la producción [Romer, 2006, p. 44, 45].

### II.II.III. Consumo de energía y crecimiento económico

Desde el punto de las ciencias naturales, el concepto de energía tomará distintas formas según el campo de estudio en el cual se encuentre. La energía fue conceptualizada por primera vez desde el campo de la física donde se definió como la capacidad para llevar a cabo un trabajo (energía mecánica), su unidad es el joule, actualmente son distinguidas varias formas de energía: mecánica, química, térmica, eléctrica, radiante y nuclear.

Toda la energía, en todas sus formas, se ve regida por las dos primeras leyes de la termodinámica. Bajo la *primera ley* en todo sistema cerrado (sin intercambio de materia y energía) la cantidad de energía es constante, además la energía no se crea ni se consume, solo se transforma, lo que se consume, en cualquier actividad económica, es la *fuerza de energía* (petróleo, gas, biomasa, etc.), a su vez, esta fuerza de energía se divide en dos, la parte que puede ser transformada en trabajo *exergy* y aquella que no *anergy*. La *segunda ley* establece que la energía capaz de efectuar trabajo, *exergy*, disminuye en un sistema cerrado y se incrementa la entropía y por tanto la *anergy*.

Los intentos de incorporar a la energía dentro de la teoría económica datan del siglo XIX, por ejemplo, Sergei Podolinsky, un médico y economista socialista, trató de convencer a los marxistas de que la energía era un principio de valor más correcto que el trabajo incorporado [Mirowski, 1988, p. 812], y hasta ahora, la discusión gira en torno a la determinación de una identidad entre la energía y el valor económico. Fue a partir de la crisis petrolera de la OPEP en 1973 que el análisis entre economía y energía obtuvo un gran interés y se masificaron los estudios entorno a ello.

Gran parte de la justificación de la creación de la *economía de la energía* como un campo especializado de la economía se basa en que existe un abanico de mercados asociados a distintas fuentes de energía debido a que cada una de ellas presenta propiedades físicas, geológicas, geográficas y técnicas [Zweifel et al., 217, p. 3].

Una de las partes importantes que se desprende de la economía de la energía, y que sirve para encadenarla con el objetivo de este trabajo, es que ha permitido que las atribuciones y relevancia de la energía se consideren dentro de la teoría económica. Si bien, ha partido de análisis empíricos y sufre el problema de que no existe una teoría generalizada sobre el nexo

que hay entre energía y economía, ha conseguido que se les brinde más relevancia a algunos aspectos sobre la energía, como el reconocimiento del papel que juega dentro del sistema económico, principalmente en el proceso productivo y su vinculación con la degradación ambiental.

Considerando que la energía es vital para el desempeño de la economía como un factor de creación de valor se debe incorporar en la lista de factores de producción al igual que K y L en la teoría neoclásica [Pokrovski, 2003, p. 770]. Este tipo de conceptualizaciones se hace presente en muchos de los análisis que buscan denotar el nexo entre consumo de energía y crecimiento económico, la energía como factor de producción y su sustitución con respecto a otro factor, K o L, son algunas de las generalidades que abordan estos análisis.

Para el caso particular de Pokrovski (2003), en su modelo  $Y = F(K, L, S)$  se incorpora la *exericy* S como un factor que produce valor y que es sustituto del trabajo debido a que hay equipos que son impulsados por la energía en vez del trabajo manual, el trabajo para producir algo puede ser efectuado por un trabajador o mediante distintas fuentes de energía externa, lo que dota a la energía de todas las propiedades de un factor de producción, incluida la producción de plusvalor [Pokrovski, 2003, p. 770, 772]. La tecnología que se aplica en el proceso productivo será quien defina el nivel de S y L requerido, además de que proporciona las condiciones para la sustitución entre factores, finalmente, el stock de capital físico K es un complemento del trabajo efectuado por L y S ya que su función es atraer mayor cantidad de S y L al proceso de producción.

Los supuestos empleados por Pokrovski (2003) lo llevaron a la determinación de un modelo donde los cambios en los factores L y S determinan la expansión de la producción, considerando a su modelo como una expansión del modelo neoclásico de crecimiento donde los factores de producción generan plusvalor [Pokrovski, 2003, p. 776], agregando el planteamiento de que la sustitución entre S y L no generan discrepancias en los resultados.

Otro es el caso de Beandreau (2004), quien inicia por reconocer que, hablando de producción, la ingeniería y la economía no deberían de modelarla de forma distinta, mientras que la primera la modela a partir de flujos de energía, materia e información (equipamiento y supervisión), la segunda solo considera a dos factores de producción, capital y trabajo, y asegura que el incremento de la producción se debe a incrementos en el consumo de energía, materia e información [Beandreau, 2004, p. 213].

Su marco referencial es la mecánica clásica, parte del hecho de que la energía es requerida para efectuar un trabajo, por lo que un incremento en la energía aumenta el trabajo y con ello el plusvalor, y la ley de eficiencia en termodinámica, a partir de conceptualizar que la eficiencia (productividad) de la energía en la producción está en función de la información (supervisión y el equipo utilizado), mejores instrumentos y supervisión incrementan la eficiencia, y con ello, se incrementa la cantidad de trabajo que se puede extraer de una oferta dada de energía [Beandreau, 2004, p. 214, 215], los cambios en la información son resultados de los cambios tecnológicos.

De manera general este autor ofrece solo una expansión del modelo de crecimiento neoclásico al incorporar un factor más, el consumo de energía, presentando las mismas propiedades que este al emplear una función de la forma Cobb - Douglas  $Y = EP^{\beta_1}K^{\beta_2}L^{\beta_3}$ , donde la electricidad EP, el capital K y el trabajo L pueden ser usadas como aproximaciones del consumo de energía, el equipo y la supervisión [Beandreu, 2004 p. 216].

### **III. Revisión de literatura sobre consumo de gas natural y crecimiento económico**

En el capítulo anterior se han retomado algunos planteamientos teóricos que bien pueden esbozar la forma y justificación bajo la cual se ha querido incorporar a la energía dentro del análisis del crecimiento económico. Uno de los mayores problemas que se visualizan en esta relación es que no existe una homologación entre todos los análisis y modelos que se usan para tales efectos. La heterogeneidad de los resultados en los estudios empíricos que se han realizado es imagen de este problema. No se ha logrado un consenso sobre qué relación guardan el crecimiento económico y el consumo de energía, y lejos se está de conseguirlo.

La determinación de las variables que definen el crecimiento económico, así como los métodos utilizados y los periodos de estudio elegidos representan las principales vías por las cuales existen resultados tan heterogéneos.

#### **III.I. Evidencia**

Desde finales de los 90's se ha presentado un aumento en los estudios que buscan estimar la relación que existe entre el consumo de energía y el crecimiento económico y con ello el desarrollo de trabajos que se centran en el consumo de gas natural, aunque estos últimos de manera más limitada.

Hay una convención teórica sobre los resultados que se obtienen de estos estudios empíricos, estos se pueden clasificar entorno a cuatro hipótesis alternativas: Una causalidad unidireccional que va del consumo de gas natural al crecimiento económico, es decir, que el consumo de gas natural contribuye al crecimiento, representa la hipótesis de crecimiento (*growth*), una causalidad unidireccional que va del crecimiento económico al consumo de gas natural, es decir, el crecimiento económico incentiva el consumo de gas natural, representa la hipótesis de conservación (*conservation*), una causalidad bidireccional entre el crecimiento económico y el consumo de gas natural representa la hipótesis de retroalimentación (*feedback*), finalmente, cuando hay ausencia de causalidad entre las variables se representa la hipótesis de neutralidad (*neutrality*).

Tabla 1. Estudios empíricos sobre el consumo de gas natural y crecimiento económico

Autor	País de estudio	Base de datos	Variable <sup>67</sup>	Métodos <sup>8</sup>	Resultados <sup>9</sup>
Apergis y Payne	67 países	Datos panel anual de 1992 a 2005	1. <b>PIB real</b> 2. Formación bruta de capital real 3. Empleo 4. CGN	1. Test IPS 2. Test de cointegración de Pedroni 3. Test de causalidad de Granger	1. Cointegración entre variables 2. En corto y largo plazo: PIBPC ↔ CGN
Kum, Ocal y Aslan	Países del G7	Datos panel anual de 1970 a 2008	1. <b>PIB</b> 2. Formación bruta de capital 3. CGN	1. Test ADF 2. Test PP 3. Test de causalidad Bootstrap	1. EUA, Alemania y Francia: CGN ↔ PIB 2. Italia: CGN → PIB 3. Inglaterra: PIB → CGN 4. Canadá y Japón: CGN ≠ PIB
Bildirici y Bakirtas	Brasil, Rusia, India, China, Turquía y Sudáfrica	Datos panel anual de 1980 a 2011	1. <b>PIBPC real</b> 2. CGN 3. CP 4. CC	1. Test ADF 2. Test de cointegración de Johansen 3. Método ARDL 4. Test de causalidad de Granger	1. Cointegración entre CGN y PIBPC 2. Largo plazo Brasil, Rusia y Turquía: CGN ↔ PIB 3. Corto plazo Brasil y Turquía: CGN ↔ PIB
Sari, Ewing y Soytaş	Estados Unidos	Serie de tiempo mensual de enero 2001 a junio 2005	1. <b>Producción industrial</b> 2. Empleo 3. CGN 4. CC 5. CP 6. Energía hidroeléctrica 7. CES 8. CEE 9. CM	1. Método ARDL	1. Cointegración entre ingreso y CGN
Payne	Estados Unidos	Serie de tiempo anual de 1949 a 2006	1. <b>PIB real</b> 2. Formación bruta de capital 3. Empleo 4. CGN 5. CP 6. CC	1. Test de causalidad Toda-Yamamoto	1. PIB → CGN

<sup>6</sup> En la columna Variable, en cada celda, la primera variable es la variable dependiente de cada modelo.

<sup>7</sup> CGN: Consumo de gas natural; PIBPC: PIB per cápita; CP: Consumo de petróleo; CC: Consumo de carbón; CES: Consumo energía solar; CEE: Consumo de energía eólica; CM: Consumo de madera; CEPT: Consumo de energía primaria total; CET: Consumo energía total; CTCF: Consumo total de combustibles fósiles; ECO2PC: Emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita

<sup>8</sup> ADF: Augmented Dickey and Fuller; KPSS: Kwiatowski-Phillips-Schmidt y Shin; PP: Phillips-Perron; ARDL: Autoregressive Distributed Lags; ZA: Zaviot y Andrew; VEC: Vector de corrección de errores

<sup>9</sup> →: Causalidad unidireccional; ↔: Causalidad bidireccional; ≠: Sin causalidad; +: Relación positiva con; -: Relación negativa con

Yang	Taiwán	Serie de tiempo anual de 1954 a 1997	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIB real</li> <li>2. CGN</li> <li>3. CC</li> <li>4. CP</li> <li>5. Consumo electricidad</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test PP</li> <li>2. Test de cointegración Engle-Granger</li> <li>3. Test de causalidad Hsiao</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración PIB y CGN</li> <li>2. CGN → PIB</li> </ol>
Hu y Lin	Taiwán	Serie de tiempo por trimestre de 1982 Q1 a 2006 Q4	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIB real</li> <li>2. CGN</li> <li>3. CP</li> <li>4. CC</li> <li>5. Consumo eléctrico</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF</li> <li>2. Test de cointegración Hansen-Seo</li> <li>3. Test de causalidad de 2 regímenes</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración entre PIB y CGN</li> <li>2. PIB → CGN</li> </ol>
Siddiqui	Paquistán	Serie de tiempo anual de 1970 a 2003	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIB real</li> <li>2. Stock de capital</li> <li>3. Educación</li> <li>4. Exportaciones</li> <li>5. CGN</li> <li>6. CP</li> <li>7. Consumo de electricidad</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ADF test y PP test</li> <li>2. Test de causalidad Hsiao</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CGN ≠ PIB</li> </ol>
Shahbaz, Arouri y Teulon	Paquistán	Serie de tiempo por trimestre de 1972 Q1 a 2012 Q4	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIBPC real</li> <li>2. Formación bruta de capital per cápita</li> <li>3. Empleo</li> <li>4. CGN per cápita</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF y PP</li> <li>2. Método ARDL</li> <li>3. Test de causalidad de Granger</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración entre PIB y CGN</li> <li>2. Corto y largo plazo: CGN ↔ PIB</li> </ol>
Lim y Yoo	Corea del Sur	Serie de tiempo por trimestre de 1991 Q1 a 2008 Q2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIB real</li> <li>2. CGN</li> <li>3. Precio Gas Natural</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF y PP</li> <li>2. Test de cointegración de Johansen</li> <li>3. VECM de causalidad de Granger</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración entre PIB y CGN</li> <li>2. CGN ↔ PIB</li> </ol>
Furuoka	China y Japón	Serie de tiempo anual de 1980 a 2012	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIB</li> <li>2. CGN</li> <li>3. Formación bruta de capital</li> <li>4. Exportaciones</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF, PP y KPSS</li> <li>2. Método ARDL</li> <li>3. Modelo de corrección de errores</li> <li>4. Modelo VEC</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración en China entre PIB y CGN;</li> <li>2. China: CGN → PIB</li> <li>3. Japón: CGN ↔ PIB</li> </ol>
Caraiani, Lungu y Dascalu	Bulgaria, Turquía, Hungría, Polonia, Rumania	Datos panel anual de 1980 a 2013	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIBPC</li> <li>2. CGN per cápita</li> <li>3. CP per cápita</li> <li>4. CER per cápita</li> <li>5. CC per cápita</li> <li>6. CEPT per cápita</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF y PP</li> <li>2. Test de causalidad Engle-Granger</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración entre las variables en el largo plazo.</li> <li>2. Con significancia al 1%, en todos los países: CGN ≠ PIB</li> <li>3. Con significancia al 5%, Hungría: PIB → CGN</li> <li>4. Con significancia al 10%, Rumania: CGN → PIB</li> </ol>
Balitskiy, Bilan, Strielkowski y Štreimikienė	Unión Europea	Datos panel anual de 1997 a 2011	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PIBPC</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Test ADF, PP y Pesaran and Shin</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cointegración entre variables</li> <li>2. En el largo plazo:</li> </ol>

			2. Formación bruta de capital per cápita	2. Test de cointegración Pedroni y Kao	CGN ↔ PIB
			3. Empleo	3. OLS modificado (FMOLS) Método general de Momentos (GMM)	
			4. CGN per cápita		
Li, Gheng y Yao Gu	China	Datos panel de 30 provincias de 2000 a 2014	1. PIB 2. Inversión en capital fijo 3. Empleo 4. CGN	1. Test Fisher-ADF, LLC. 2. Test Kao y Pedroni de cointegración. 3. Regresión de efectos fijos; Método de regresión cuantílica	1. Cointegración de variables en largo plazo. 2. CGN + PIB.
Zahid	Paquistán, India, Sri Lanka, Bangladesh y Nepal	Datos panel anual de 1971 a 2003. Sri Lanka de 1980 a 2003	1. PIB 2. CGN 3. CC 4. Consumo de electricidad 5. CP 6. CET	1. Test ADF 2. Test Engle-Granger 3. Test Toda-Yamamoto de causalidad	1. Cointegración solo en algunas variables en Paquistán y Sri Lanka. 4. Bangladesh: CGN → PIB 2. Otros países: CGN ≠ PIB
Lee y Chang	Taiwán	Serie de tiempo anual de 1954 a 2003	1. PIBPC real 2. CGN 3. CC 4. Consumo de electricidad 5. CP 6. CET	1. Test Perron y ZA 2. Test de cointegración de Johansen y Test Trace. 3. Test de exogeneidad débil	1. Cointegración de todas las variables 2. CGN → PIB
Lotfalipour, Falahi y Ashena	Irán	Serie de tiempo anual de 1967 a 2007	1. PIBPC real 2. CGN per cápita 3. CP per cápita 4. CTCF per cápita 5. ECO2PC	1. Test ADF y Test Perron 2. Test Toda-Yamamoto de causalidad	1. CGN → PIB
Zamani	Irán	Serie de tiempo anual de 1967 a 2003	1. PIB 2. CGN	1. Test de cointegración de Johansen 2. VECM de causalidad de Granger	1. Cointegración de las variables 2. En largo plazo: CGN ↔ PIB
Awodumi y Adewuyo	Argelia, Angola, Egipto, Gabón y Nigeria	Datos panel anual de 1980 a 2015	1. PIBPC 2. PIBPC al cuadrado 3. CP per cápita 4. CGN per cápita 5. ECO2PC 6. Formación bruta de capital fijo 7. Desarrollo financiero <sup>10</sup>	1. Test KPSS y PP 2. Test No-linear ARDL (NARDL)	1. Cointegración de las variables 2. Nigeria: CGN - PIB 3. Gabón: CGN + PIB 4. Egipto: CGN - PIB 5. Angola: CGN + PIB 6. Argelia:

<sup>10</sup> Crédito doméstico del sector privado como porcentaje del PIB.

			8. Apertura económica <sup>11</sup>			Sin relación
			9. Urbanización			
Rafindadi y Ozturk	Malasia	Serie de tiempo anual de 1971 a 2012	1. <b>CGN per cápita</b>	1. Test ADF, PP y ZA		1. Cointegración de variables en el largo plazo
			2. PIBPC	2. Test de cointegración Bayer-Hanck, ARDL y Johansen		2. PIB – CGN
			3. Exportaciones per cápita	3. VECM de causalidad de Granger		3. En largo plazo: CGN ↔ PIB
			4. Stock de capital per cápita			3. En corto plazo: PIB → CGN
			5. Empleo per cápita			
Solarin y Shahbaz	Malasia	Serie de tiempo anual de 1971 a 2012	1. <b>PIBPC</b>	1. Test Lee-Strazicich		6. Cointegración de variables
			2. CGN per cápita	2. Test de cointegración Bayer-Hank, Johanse y ARDL		7. CGN + PIB
			3. Formación real de capital per cápita	3. VECM de causalidad de Granger		8. CGN ↔ PIB
			4. Inversión real extranjera per cápita			
			5. Apertura económica <sup>6</sup>			

Fuente: Elaboración propia

### III.I.I. Variables

La Tabla 1 muestra que los estudios enunciados han utilizado en su desarrollo distintas variables, teniendo como generalidad el uso desagregado del consumo de energía en todos ellos, basándose principalmente en el consumo de gas natural. Efectuar un estudio a partir de la desagregación del consumo de energía permite capturar el grado en el cual un país depende de diferentes fuentes de energía, trabajar con datos agregados imposibilita observar de qué manera influye un tipo de energía en la producción [Sari et al., 2008, p. 2303].

En varios de los estudios, Payne (2011), Apergis y Payne (2010), Kum et al. (2012), Siddiqui (2004) y Shahbaz et al. (2014), se incorporan las variables referentes al capital y empleo como medida para mitigar el efecto de variables omitidas. Esto puede ser justificado debido a que, ante afectaciones en el insumo de energía, estas se contrarrestan con la sustitución por otros factores de producción para mitigar el efecto en la producción, con lo que el uso de modelos multivariados es mejor que los bivariados [Hu y Lin, 2008, p. 2355].

Se señala que los métodos de cointegración y causalidad utilizados en los estudios para establecer la relación entre consumo de energía y crecimiento económico son muy sensibles a la definición de las variables, principalmente en torno al tiempo, y a la elección

<sup>11</sup> Exportaciones + importaciones de bienes y servicios.

de variables alternativas [Bildirici y Bakirtas, 2014, p. 137], [Yang, 2000, p. 312] [Zamandi, 2006, p. 1136]. Además, existe la posibilidad de que las variables seleccionadas para el modelo sean inestables en el sentido de que dentro del periodo de tiempo elegido haya ocurrido un evento, *structural break*, que afectara las pautas de consumo de los energéticos, lo que deriva en resultados pobres o engañosos. *¿Por qué debemos tener en cuenta las rupturas estructurales en las series de consumo de energía? Respondemos a esta pregunta en que el mercado energético siempre ha tenido relaciones aliadas con un sistema económico y está vitalmente correlacionado con el sistema económico. Así, bajo el impacto de factores externos, está la posibilidad ineludible de que debamos prestarle atención* [Lee y Chang, 2005, p. 859].

### III.I.II. Metodología

Para la determinación de la estacionariedad de las variables mediante los métodos de raíz unitaria son dos las pruebas más empleadas, principalmente para muestras de datos tipo panel, la prueba ADF y PP. La prueba PP es robusta para una variedad de correlaciones seriales y heterocedasticidades dependientes del tiempo, adicionalmente, el método de Perron es útil cuando hay muestras pequeñas.

En Shahbaz et al. (2014) se establece que, a pesar de que las pruebas ADF y PP son las más empleadas, la prueba DF-GLS es preferida debido a que los resultados tienden a ser más consistentes y confiables que las anteriores, además, estos métodos de raíz unitaria convencionales pueden presentar resultados sospechosos o distorsionados si es que dentro del periodo de tiempo estudiado existieron structural breaks, por lo que, para tomar en consideración estos cambios se deben usar la prueba de ZA [Lee y Chang, 2005, p. 860].

La prueba ARDL presenta una ventaja metodológica respecto a las otras pruebas para determinar la cointegración en series de tiempo, ej. cointegración de Johansen y Prueba de Engle-Granger, colocándola como uno de los enfoques más populares. Su ventaja se basa en que no es necesario que todas las variables incorporadas en el modelo se integren en el mismo nivel, ya sea  $I(1)$  o  $I(0)$  [Sari et al., 2008, p. 2303] y [Furuoka, 2016, p. 106], además, permite la estimación simultánea de los componentes a corto y largo plazo dentro de un modelo de corrección de errores vectoriales [Bildirici y Bakirtas, 2014 p. 137] y mitiga el problema de multicolinealidad, correlación serial y endogeneidad que involucra a la serie ya que produce

estimaciones consistentes a largo plazo incluso cuando las variables independientes son endógenas, además, esta prueba resulta con mucha más significancia cuando se trata de determinar la cointegración de muestras pequeñas. [Shahbaz et al., 2014, p. 220].

Sin embargo, es necesario destacar que, para los análisis basados en datos tipo panel Apergis y Payne (2010), Balitskiy et al. (2016), Li et al. (2018), las pruebas de cointegración que dominan son las de Kao y Pedroni, solo en Awodumi y Adewuyo (2020) se empleó la prueba No-lineal ARDL con la finalidad de lidiar con los structural break.

A pesar de la eficiencia de la prueba ARDL tiene dos puntos en contra, sus resultados no son robustos cuando existe la presencia de variables que son  $I(2)$  y se basa en el supuesto de que solo hay un vector de cointegración, por lo que se puede utilizar en conjunto con la prueba de Johansen para disipar toda posibilidad de existencia de vectores múltiples de cointegración [Bildirici y Bakirtas, 2013, p. 137] y [Shahbaz et al., 2014, p. 224], ya que esta si permite más de una cointegración entre las variables.

### III.I.III. Resultados

En estudios que engloban a un panel de países, en la mayoría de los casos, exceptuando Apergui y Payne (2010) y Balitskiy et al. (2016) donde la causalidad bidireccional CGN - PIB es para todos los países, no hay resultados unificados, es decir, en un conjunto de países, los resultados de causalidad y relación entre consumo de gas natural y PIB presentan variaciones de país a país. Se presentan casos Kum et al. (2012) en donde subconjuntos de países pueden tener los mismos resultados. Además, está el caso en el que, para un mismo país, Siddiqui (2004) y Shahbaz et al. (2014) o Zamani (2007) y Lotfalipour et al. (2010), dos estudios distintos presentan resultados diferentes, teniendo como determinante el periodo de tiempo estudiado, la metodología empleada y las variables utilizadas.

El estudio de Rafindadi y Ozturk (2015) es interesante desde la perspectiva metodológica al ser el único que emplea el consumo de gas natural como variable dependiente, que al ser contrastado con su homónimo Solarin y Shahbaz (2015) se observa concordancia en los resultados de causalidad, pero una relación contraria. En ambos casos el periodo de tiempo es el mismo y solo existe variación en la metodología y variables empleadas.

En cuanto a porcentajes, considerando que en algunos estudios que engloban varios países se obtienen diferentes causalidades entre ellos: en un 47% de los estudios se cumple

la hipótesis feedback en al menos un país, en un 23% se cumple la hipótesis conservation en al menos un país, en un 19% se cumple la hipótesis neutrality y en un 33% la hipótesis growth, con lo que se observa que la hipótesis feedback es la más recurrente entre los resultados, principalmente en aquellos estudios que se centran en un solo país.

En la mayoría de los estudios donde se determinó la relación que compartían el consumo de gas natural y el PIB, la mayoría de los países obtuvo una relación positiva, es decir, ante los aumentos en el consumo de gas natural se espera un crecimiento en el PIB.

Se concluye que la determinación de la relación existente entre consumo de gas natural y crecimiento económico está supeditada principalmente al periodo de tiempo que se esté estudiando, las variables utilizadas y la metodología empleada, ya que tal y como se mencionó en el apartado de Metodología, los métodos de cointegración y causalidad utilizados en estos estudios son muy sensibles a la definición de las variables, principalmente en torno al tiempo. Hablando en términos de la variación de resultados entre país y país, los resultados variados pueden deberse a las diferentes estructuras económicas de los países, especialmente en aquellos que se encuentran en diferentes etapas de desarrollo [Sari et al., 2008, p. 2303].

#### III.IV. Evidencia para México

Dentro de los estudios sobre la relación entre el consumo de gas natural y crecimiento económico, el país solo se ha detectado en Apergui y Payne (2010) donde forma uno de los 67 países de la sección cruzada del panel de datos que se usan para el estudio en el periodo 1992 -2005.

Los resultados en este estudio arrojaron que el consumo de gas natural y el PIB se encuentran cointegrados, además, hay una relación positiva en el largo entre ellos, ante el incremento de 1% en el consumo del energético se esperaba un crecimiento del 0.652% en el PIB. Finalmente se estableció que la causalidad entre las variables es del tipo feedback.

## IV. Situación de México en materia de Gas Natural

El gas natural es un hidrocarburo gaseoso formado por una mezcla de hidrocarburos ligeros, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y con cantidades variables de etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) y pentano ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), además de estos compuestos orgánicos, puede contener fracciones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Es un gas inodoro, incoloro e insípido con una densidad relativa más pequeña que el aire.

Este hidrocarburo, al igual que el petróleo, se generó a partir del depósito de materia orgánica rica en hidrógeno y carbono en sedimentos de grano finos (arcillas y limos), posteriormente, con cambios (aumentos) de presión y temperatura, se dan las condiciones para que existan las reacciones físico – químicas que permiten la generación de hidrocarburos, entrando en la ventana de generación de petróleo, de seguirse incrementando la temperatura se alcanza la ventana de generación de gas natural, el primero tipo de gas en formarse es el húmedo, mezcla de metano, etano, propano, butano y pentano, y si la temperatura es lo suficientemente alta, se genera el gas seco, formado casi todo por metano. Las ventanas de generación de los hidrocarburos van a depender del tipo de materia orgánica y las características de donde se ha depositado.

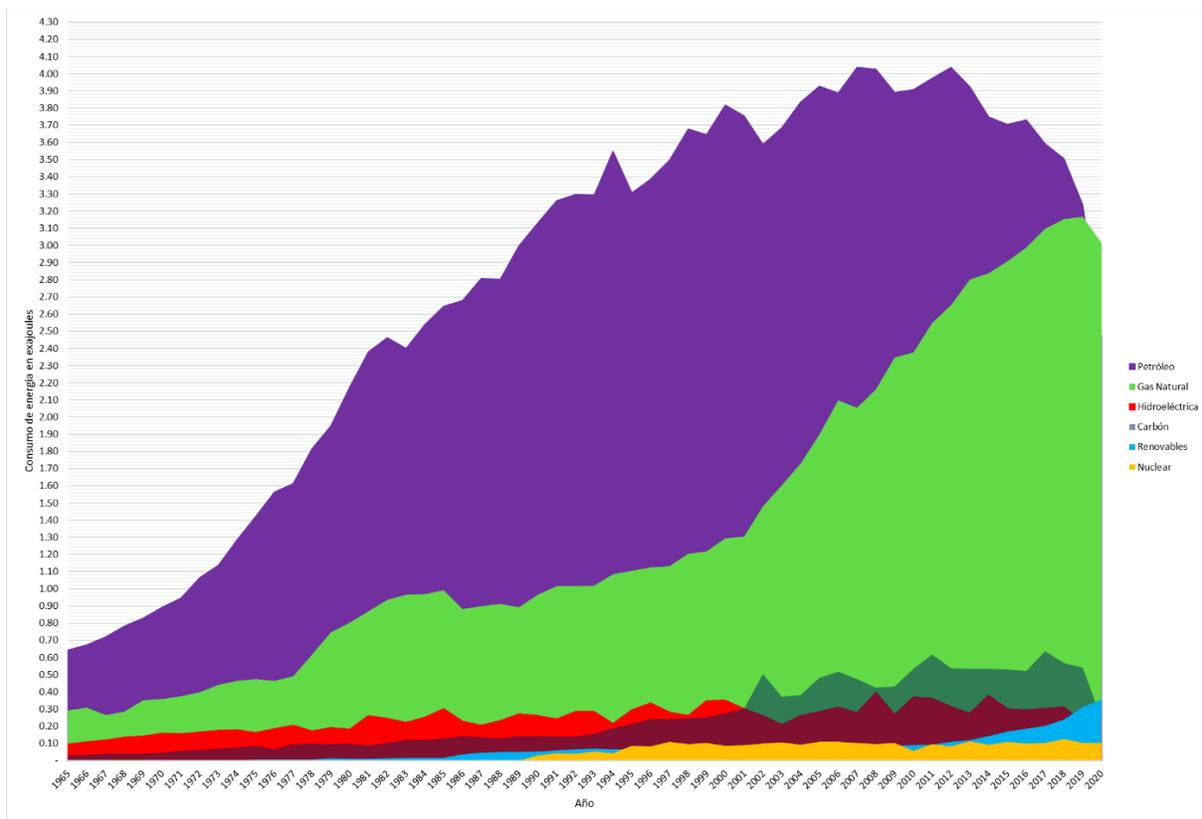
Finalmente, el gas natural se clasifica según el proceso que le da origen en termogénico (proceso antes descrito), inorgánico, el cual se asocia actividad volcánica, y biogénico, generado por bacterias anaeróbicas. El termogénico, por su origen, se clasifica en asociado, disuelto en el petróleo, y no asociado, yacimientos con puro gas; y por su composición, por la concentración de componentes condensables, puede ser húmedo o seco, y por la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$ , puede ser dulce si tiene pocas concentraciones de este compuesto o amargo si la concentración es alta.

### IV.I. Perfil energético de México

En México el Instituto Nacional de Estadística y Geografía señala que las fuentes de energía son aquellas que producen energía útil de forma directa o a través de una transformación para obtener productos secundarios, estas fuentes se dividen en primarias y secundarias. Las fuentes primarias son aquellas que se obtienen directamente de los recursos naturales y se dividen en renovables y no renovables, la característica de las primeras es que estas se reponen más rápido de lo que se explotan económicamente, las principales fuentes

renovables son la solar, eólica, hidroenergía, geotérmica y biomasa, por su parte, las fuentes no renovables son aquellas que se obtienen de depósitos geológicos y su renovación toma miles de años, las principales son gas natural, petróleo, carbón y nuclear.

Fig. I. Suministro energético de México.



Así como en el resto del mundo, en México la disposición de las fuentes principales de energía se ha modificado a través del tiempo en paralelo a los cambios que va experimentando la sociedad, ej. la Revolución Industrial del siglo XVIII y el aumento en el uso del carbón en Inglaterra como fuente de energía. En el caso mexicano los hidrocarburos han representado desde el siglo pasado la mayor fuente de energía primaria siendo el petróleo el recurso más empleado seguido del gas natural, tal y como se observa en la Fig. I este primer recurso prácticamente ha dominado el mercado energético por décadas.

Sumado al alto impacto del consumo de petróleo en años anteriores, a partir del año 2000 el consumo de gas natural se disparó ganando terreno dentro de la matriz energética del país hasta el punto de representar en el año 2019 el 39.03% del consumo total de energía, solo por debajo del 39.9% del petróleo, a pesar de que el incremento es poco en comparación al del gas natural, en la década de 2010 las fuentes energías renovables comenzaron a ganar terreno

representando el 3.8% del consumo total. El incremento en el consumo del gas natural y las fuentes renovables de energía se presentan en el marco de la transición energética y las preocupaciones por el cambio climático.

La Fig. I<sup>12</sup> es una representación del cambio que ha sufrido la disposición de las distintas fuentes de energía primaria en México desde el año 1965 hasta el 2020.

#### IV.II. Mercado de gas natural

Por medio de la SENER (2018) y la CNH (2018), el mercado del gas natural abarca toda la cadena de valor de este hidrocarburo, para la primera instancia, la cadena de valor se conforma por: exploración y extracción, procesamiento, almacenamiento y transporte, y distribución y comercialización, mientras que para la segunda señala que son 5 etapas las que componen su cadena de valor: exploración, producción, procesamiento, logística (almacenamiento, transporte y distribución) y comercialización.

Durante la exploración se recaban datos sísmicos mediante los cuales se evalúan las cuencas petroleras y se determina su potencial en términos del contenido de hidrocarburos que contienen, con lo que se estiman las prospecciones de los recursos que hay en el subsuelo.

A través de los procesos de explotación este hidrocarburo es extraído de los yacimientos en el subsuelo, generalmente este viene acompañado de sedimentos, agua, algunos otros hidrocarburos más pesados y algunos contaminantes. Esta mezcla en pozo se conduce a las baterías de separación y posteriormente a las plantas de procesamiento para obtener solo gas natural (metano), si se obtiene solo gas seco, y sus condiciones lo permiten, entra directo a la red de transporte por gasoducto.

México cuenta con 8 provincias petroleras, de las cuales 6, Burgos, Sureste, Golfo de México Profundo, Sabinas, Tampico – Misantla y Veracruz son de alto potencial de producción de hidrocarburos [CNH, 2018, p. 59], el tipo de gas asociado a estas provincias es: seco y húmedo, seco y húmedo, seco y húmedo, seco, húmedo y seco, respectivamente. La SENER (2022) reporta que, para 2021, las reservas de gas natural de México, conformadas por las 6 provincias anteriores, eran de 9981 MMpc en Probadas, 10411 MMpc en Probables y 10373 MMpc en Posibles, teniendo reservas 3P (probadas + probables + posibles) de 30765 MMpc. En 2018 la CNH estimaba que en yacimientos convencionales se

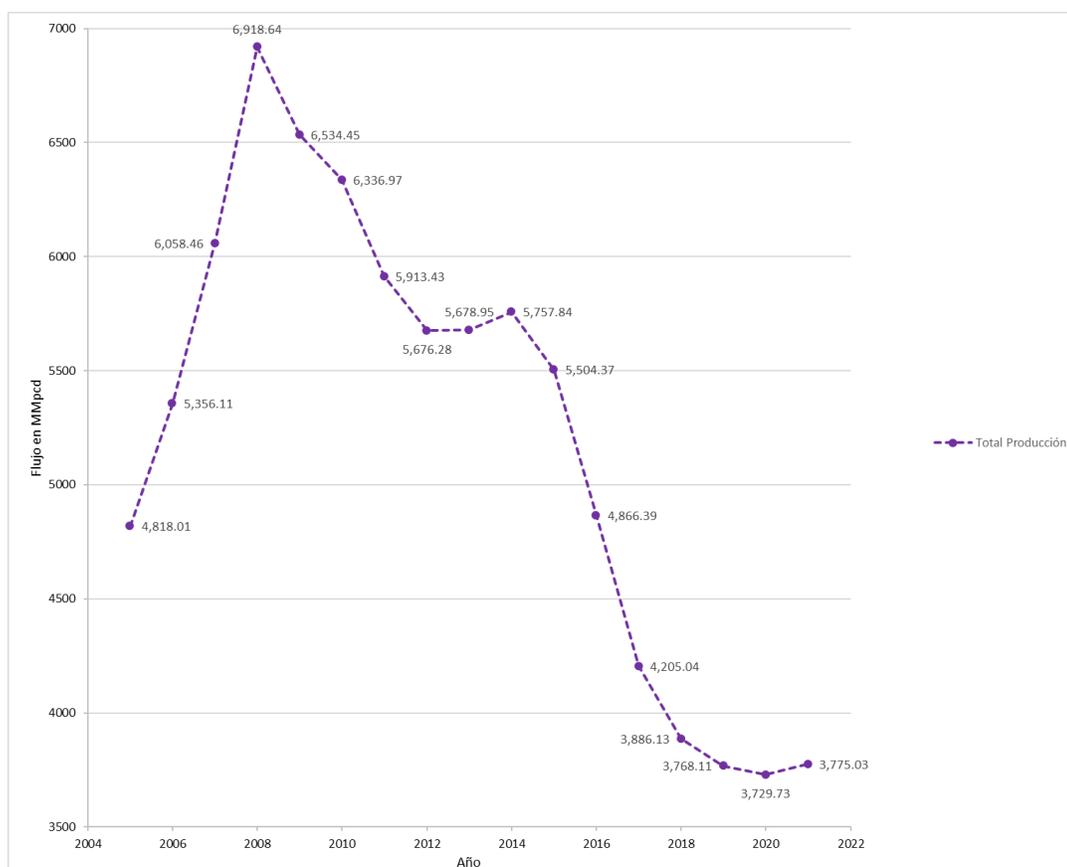
---

<sup>12</sup> Elaborada con datos del *BP Statistical Review of World Energy June 2022*. Sitio: <http://www.bp.com/statisticalreview>

tenían recursos prospectivos por 76.4 MMMMpc<sup>13</sup> de gas húmedo y seco distribuidos en las 6 provincias, mientras que en yacimientos no convencionales se estimaban recursos por 141.5 MMMMpc, principalmente en la provincia de Sabinas. Numéricamente, las reservas probadas de México son poco significativas, pero al considerar los recursos Probables, Posibles y prospectivos el panorama cambia [CNH, 2018, p. 65].

La producción de gas natural en el país vino cayendo desde el 2010 con 6337 MMpcd hasta 2020 con un mínimo de 3730 MMpcd, año a partir del cual se presenta un ligero incremento, cerrando el 2021 con 3775 MMpcd. El escenario alto de la SENER (2022) es que para finales del 2022 se alcancen los 4000 MMpcd y en los años posteriores se mantenga al alza, mientras que el escenario bajo se espera una caída que termine en 3115 MMpcd en 2028. La Fig. II muestra el comportamiento de la producción nacional de gas natural de 2005 a 2021.<sup>14</sup>

Fig. II. Producción nacional de gas natural.



<sup>13</sup> MMMMpc = 1 billón de pies cúbicos.

<sup>14</sup> A la fecha de entrega de esta tesis el valor para la producción del 2022 no se encontraba homologado.

El siguiente eslabón en la cadena de valor es el procesamiento del gas natural, mediante el cual se separa el metano de los otros compuestos más pesados y condensables y se le retiran contaminantes como el ácido sulfhídrico y dióxido de carbono (endulzamiento del gas). Una fracción del gas seco obtenido de estos procesos se ingresa junto con las corrientes provenientes directamente de pozo y de importación al sistema de transporte para conformar la oferta nacional de gas natural. En México se tienen 9 complejos procesadores de Gas a cargo de Pemex, al mes de septiembre de 2021, SENER reporta que se tiene la capacidad de procesamiento (endulzamiento) de 4523 MMpcd, hasta febrero del 2022, el promedio de procesamiento de gas natural en México se encontró en 2595 MMpcd.

A inicios del 2022, el sistema de almacenamiento, transporte y distribución de gas natural en México se encuentra conformado por 10336 km de gasoductos en el Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS), el cual es operado por dependencias del gobierno y 8385 km de gasoductos operados por privados, el SISTRANGAS tiene una capacidad de transporte total de 6413 MMpcd de gas natural; 24 puntos de internación con Estados Unidos para el gas de importación distribuidos a lo largo de la frontera norte; finalmente, se tienen tres terminales de almacenamiento de GNL y regasificación en Altamira, Manzanillo y Ensenada con una capacidad de almacenamiento y regasificación de aproximadamente de 32.5 MMpc y 2260 MMpcd, respectivamente.

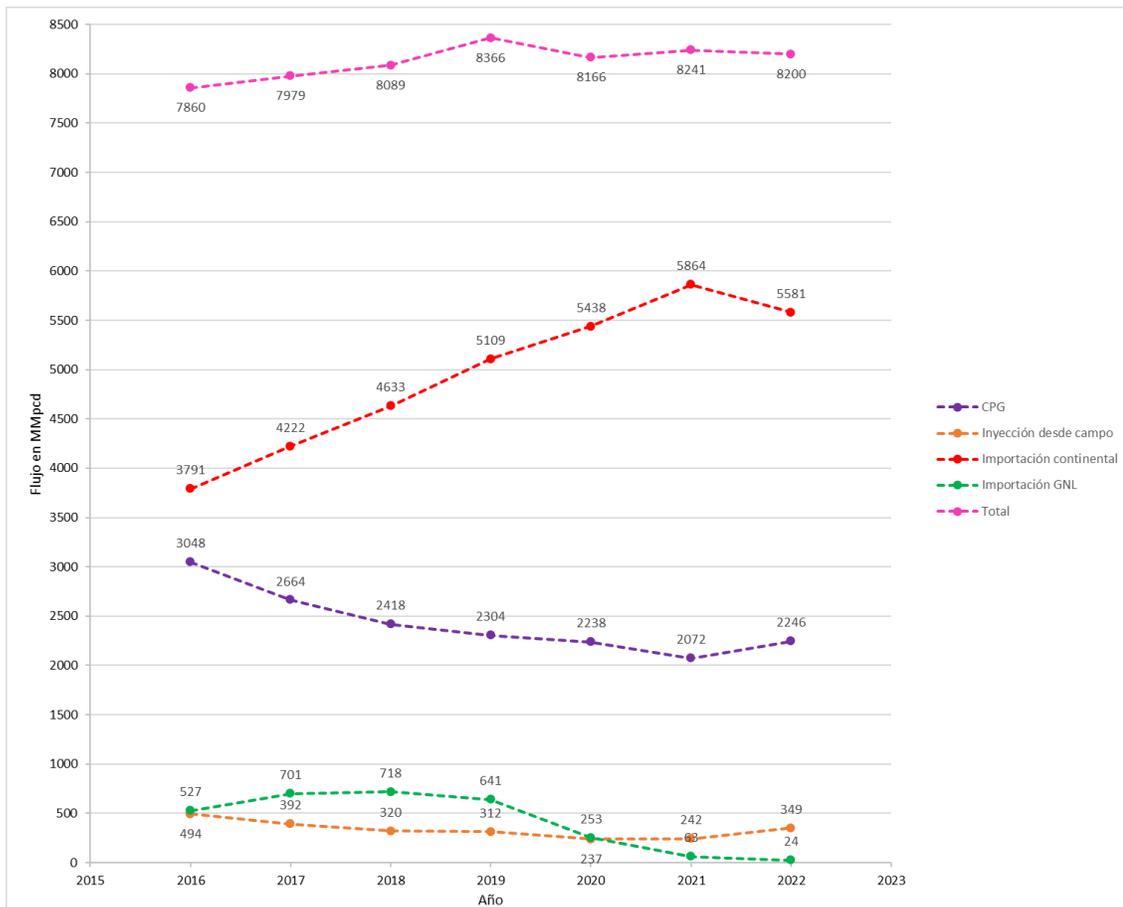
Finalmente, a lo largo de toda la cadena de valor del gas natural la comercialización de este es un elemento presente a través de la compraventa y contratación de los servicios de almacenamiento, transporte y distribución. De manera general el esquema es que la comercialización se debe realizar por entidades distintas a las que operan la infraestructura a fin de evitar conflictos de interés y malas prácticas como desplazamiento de competencia. El país se encuentra dividido en 6 regiones donde cada una presenta su Índice de Referencia Nacional de Precios de Gas Natural, en marzo de 2022 el precio más alto, \$5.06 UDS/MMBTU, se localizó en la Región VI (Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas, Yucatán, Quintana Roo y Campeche), mientras que el más bajo, \$4.38, se tuvo en la Región I (Baja California, Sonora y Sinaloa), de manera general, el promedio del MMBTU de gas natural en marzo fue de \$4.76 USD. Como comparación, para el mismo mes, el precio más bajo y alto alcanzado en la zona sur de EE. UU. fue de \$4.2 y \$4.9 USD/MMBTU.

#### IV.III. Oferta y demanda del gas natural en México

La oferta nacional total de gas natural se conforma por dos elementos, la producción nacional de gas seco y las importaciones. Respecto a la producción nacional, como se mencionó anteriormente, la corriente de gas seco proveniente de los centros de procesamiento de gas natural (CPG) y directo del pozo que entran al sistema de transporte conforman la parte nacional de la oferta. La inyección directa de pozo al sistema de transporte se mantuvo a la baja desde el 2016 con 494 MMpcd hasta el mínimo en 2020 con 237 MMpcd, con el alza posterior a ese año, a febrero del 2022 la inyección promedio es de 349 MMpcd, mientras que la producción proveniente de los CPG se colocaba en 3048 MMpcd en 2016 hasta el mínimo en el 2021 con 2072 MMpcd, en 2022 (febrero) se incrementó a 2246 MMpcd.

Por su parte, las importaciones de gas natural se dividen en dos, las continentales que representan una inyección de gas seco en los 24 puntos de internación y las de GNL que ingresan a los centros de almacenamiento y que posteriormente se regasifica al sistema de transporte, las importaciones continentales desde 2016 hasta 2021 se han mantenido al alza, de 3791 MMpcd a 5864 MMpcd, en 2022 se reporta que las importaciones han sido de 5581 MMpcd, sin embargo, solo se ha contabilizado hasta febrero del mismo año, mientras que las importaciones de GNL alcanzaron un máximo en 2018 con 718 MMpcd y de ahí ha declinado drásticamente hasta febrero del 2022 con solo 24 MMpcd. Con todo esto, en febrero del 2022 la oferta total de gas natural en México fue de 8200 MMpcd. La Fig. III resume el comportamiento de la oferta nacional de gas natural.

Fig. III. Composición de la oferta nacional de gas natural



La demanda nacional total de gas natural en el país se encuentra definida por el consumo de este en los sectores definidos por la SENER: sector eléctrico, sector industria, sector petrolero, sector residencial, sector de servicios y sector de transporte. En el año 2005 el Instituto Mexicano del Petróleo reporta que el consumo en estos sectores es de: 2013.74 MMpcpd (considerando al sector eléctrico público y privado) para el sector eléctrico, 935.72 MMpcpd en el sector industrial, 2029.95 MMpcpd en el sector petrolero, 107.34 MMpcpd en el sector residencias y de servicios y 1.93 MMpcpd de gas natural comprimido en el sector transporte. Para el año 2019 la demanda en el sector eléctrico se elevó a 34521.24 MMpcpd, la del sector industrial a 1647.81 MMpcpd, la del sector transporte a 7.15 MMpcpd, y la suma de los sectores residencial y servicios a 140.15 MMpcpd, por el contrario, en el sector petrolero disminuyó a 1843.12 MMpcpd. La Fig. IV resume el comportamiento de la demanda nacional de gas natural.

En la última Prospectiva del Sector Energético publicada por la SENER<sup>15</sup> se incorporan las prospectivas en la demanda del gas natural por sector hasta el año 2032 en las cuales se muestran aumentos considerables en algunos sectores y en otros el aumento es poco. Sus datos estiman que para ese año la demanda en los sectores eléctrico, industria, residencial y de servicio, y de transporte se incrementará hasta 5292.3 MMpcd, 2413.9 MMpcd, 199.3 MMpcd y 7.4 MMpcd, respectivamente, mientras que en el sector petrolero se recobrará al encontrarse en 2007.6 MMpcd.

En términos porcentuales, la demanda de gas por sectores en los años 2005, 2019 y 2032 fueron y será, 2005: petrolero 39.9%, industrial 18.4%, eléctrico 39.6%, residencial 1.7%, servicios 0.4% y autotransporte 0.03%, 2019: petrolero 22.6%, industrial 20.2%, eléctrico 55.4%, residencial 1.2%, servicios 0.5% y autotransporte 0.08% y 2032: petrolero 20.2%, industrial 24.3%, eléctrico 53.3%, residencial 1.4%, servicios 0.7% y autotransporte 0.1%.

Observando los datos anteriores, el mayor aumento en la demanda de gas natural viene y vendrá del sector eléctrico, esto por la relevancia que ha tomado en la generación de energía eléctrica en las centrales eléctricas de ciclo combinado y por la conversión de centrales termoeléctricas a duales [SENER, 2018, p. 58 - 59], la generación de energía eléctrica en el país a partir de gas natural es de más del 50% del total, debido a esto resulta de gran relevancia comprender los factores involucrados en la demanda de gas natural provenientes del sector generacional de energía eléctrica del país. Bonilla et al. (2022) presentan un estudio sobre los cambios en la demanda del gas natural en el sector eléctrico a partir del efecto rebote existente en los tres tipos de procesos de generación existentes: centrales eléctricas públicas, productores independientes y autogeneración, esto a través del análisis de la demanda de gas natural ante los cambios en precio de este y la eficiencia de las centrales de ciclo combinado y turbogas.

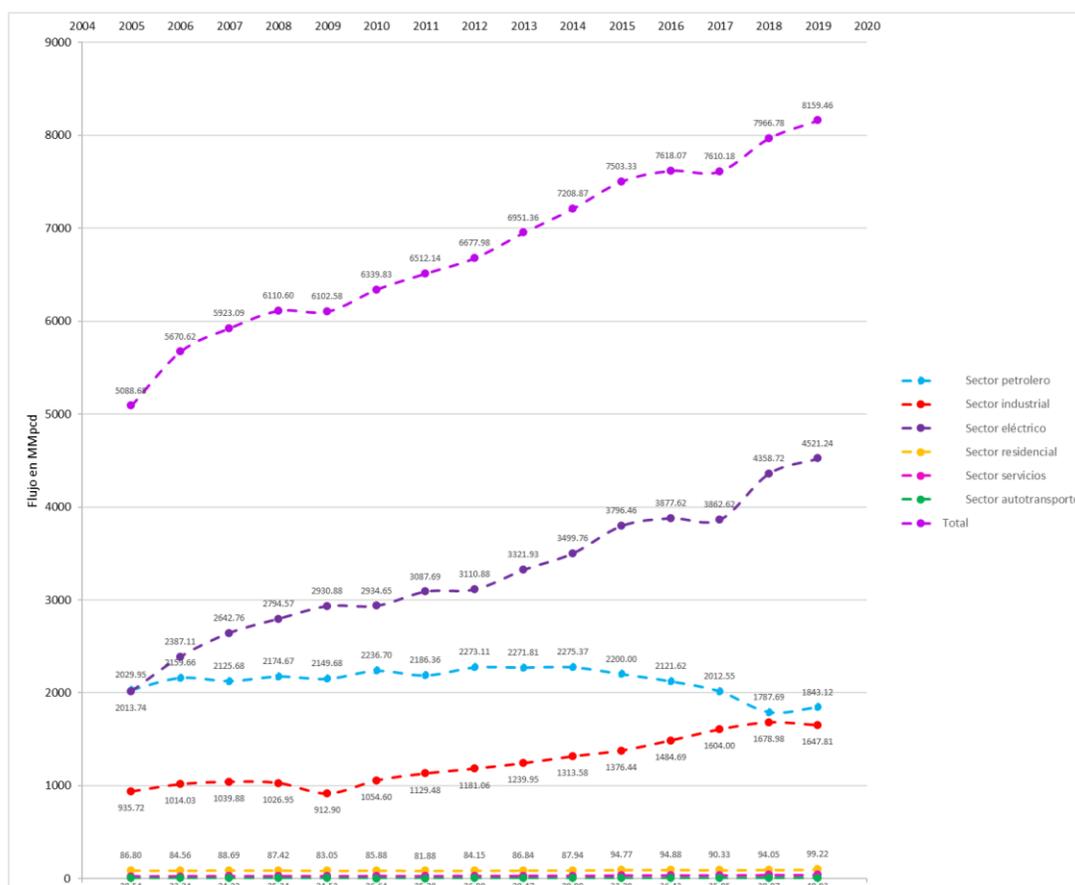
De manera general, el efecto rebote se define [...] *como un fenómeno que resulta de la mayor eficiencia energética, la cual podría originar un ahorro energético menor de lo esperado, simplemente al multiplicar el cambio de eficiencia energética por el uso de energético antes del cambio en tal eficiencia* [Bonilla et al., 2022, p. 177], es decir, incrementar la eficiencia de un proceso puede o no disminuir el consumo (demanda) de cualquiera que sea la fuente de energía que se use en él.

---

<sup>15</sup> Las *Prospectiva del Sector Energético* publicadas por la SENER llegan hasta el 2018.

Con sus resultados, Bonilla et al. (2022) demuestran que los aumentos en la eficiencia en los procesos de los productores independientes y autogeneración se tiene una elasticidad negativa de la demanda de gas natural, es decir, el consumo de gas natural disminuye toda vez que el proceso sea más eficiente, caso contrario con las centrales eléctricas públicas, respecto a los cambios por variaciones en los precios del gas natural, tanto las centrales eléctricas públicas como los productores independientes reducen su consumo a medida que el precio del gas se incrementa, el efecto del precio sobre el consumo de gas es más pronunciado en los productores independientes que en las centrales públicas, esto debido a que las primeras maximizan sus ganancias y las segundas no, [Bonilla et al., 2022, p. 190].

Fig. IV. Composición de la demanda nacional de gas natural



#### IV.IV. El gas natural, clave en la transición energética

A través de las Naciones Unidas la *transición energética* se entiende como esta *transformación* del sector energético, acoplada a las circunstancias particulares de cada nación, que ofrece oportunidades para el desarrollo económico sostenido, la inclusión social,

la seguridad energética, la mejora de la salud, la creación de empleo y otros beneficios sociales en la medida que se aplique de forma justa e inclusiva [UN, 2021, p. 8]. Las principales medidas que se discuten para alcanzar esta transformación se basan en aumentar el peso de las energías renovables y apostar por la mejora tecnológica que reduzcan el consumo de recursos y generación de contaminación y aumenten la eficiencia energética, todo a través de políticas y medidas en lo nacional que tendrán efecto positivo en lo global.

Pero *¿por qué una transición energética?* El actual modelo energético no es perfecto y se han derivado una serie de problemas de él que son justificación para esta transición. Hay un consenso en las NU sobre que el sector energético es aquel que contribuye de mayor manera a la emisión de gases de efecto invernadero, tanto por la quema de combustibles fósiles como la extracción de estos (minería, explotación de yacimientos petroleros), por otro lado, la producción y consumo de la energía sufre los embates de una distribución inequitativa, simplemente en 2017 EE. UU. contaba con el 4.7% de la población mundial y consumió el 16% de la energía producida en el mundo, producto de la centralización que se presenta en el sector energético [Furtado y Soldateli, 2019, p. 9].

Son dos los elementos que hacen que el gas natural tome un papel fundamental en esta transición, el primero es que es una fuente de energía primaria con grandes reservas y competitiva por su bajo costo en el mercado energético, el segundo es que debido a sus propiedades, alta proporción entre el hidrógeno y carbono, durante su combustión se generan volúmenes mucho menores de contaminantes que los otros hidrocarburos por cada unidad de energía producida, además de que no emite partículas sólidas ni es corrosivo, convirtiéndola en la fuente de energía fósil más limpia que hay, esto la hace una fuente de energía idónea en la generación de electricidad, ya que a diferencia de las energías renovables, esta no tiene el problema de la intermitencia y sus gases de combustión se puede usar en la cogeneración.

En CNH (2018), con datos de la *Global Natural Gas Insights*, se muestra la ventaja ambiental de utilizar gas natural en la generación de electricidad en las centrales de ciclo combinado sobre las plantas convencionales que usan carbón, el nivel de las emisiones de compuestos como el dióxido de azufre son prácticamente nulos en una central de ciclo combinado comparados en las casi 0.7 libras por mega watt producido en una convencional, la emisión de óxidos de nitrógeno se reduce en casi 10 veces con respecto a lo emitido por una central convencional, además, las emisiones de CO<sub>2</sub> son aproximadamente el doble en

las centrales convencionales. De forma general, se estima el gas natural produce entre 40 y 50% menos emisiones de CO<sub>2</sub> que el carbón y entre 25 y 30% que el petróleo; respecto a los óxidos de nitrógeno, produce aprox. 2 veces menos emisiones que el carbón y 2.5 que el petróleo; finalmente, produce hasta 1500 veces menos dióxido de azufre que el carbón y 2500 veces que el petróleo.

Frente a los combustibles líquidos, gasolina y diésel, en el sector transporte, el gas natural sigue manteniendo su ventaja ambiental y de costos, su costo comparativamente es bajo y genera menos emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 20 y 30%, de CO entre un 70 y 90% y de óxidos de nitrógeno entre un 50 y 75%.

Finalmente, en la *Reunión de expertos sobre soberanía energética, cambio climático y transición energética: El caso del Gas Natural en México* llevada a cabo en la Ciudad de México en el 2021 se destacó que el gas natural es el energético de transición, siendo un puente para las energías renovables y se reconoce su relevancia en el largo plazo, sin embargo, se requieren inversiones en tecnología que hagan de su extracción y uso procesos más sostenibles [CEPAL, 2021, p. 7 - 8].

#### IV.V. Seguridad energética: El caso del gas natural

La Agencia Internacional de Energía<sup>16</sup> (IEA por sus siglas en inglés) ha definido a la seguridad energética como el acceso fiable y asequible a todos los combustibles y fuentes de energía, lo que involucra una disponibilidad ininterrumpida de estos, en este sentido es que la CNH (2018) sostiene que a nivel nación, la seguridad energética se relaciona con una disminución en la dependencia de importaciones y mayor diversificación de las fuentes de energía a través de la política nacional.

Internacionalmente, el gas natural, al igual que otras fuentes de energía, tiene el inconveniente de una distribución asimétrica de las reservas, producción y consumo entre los países, esto se resume en que la oferta y la demanda del gas natural no coinciden geográficamente. Como bien ha mostrado la historia, esta distribución asimétrica desemboca en geopolítica, y esta a su vez en conflictos entre países, el ejemplo más actual se ha venido desarrollando en Ucrania.

---

<sup>16</sup> International Energy Agency. <https://www.iea.org/topics/energy-security>

En el caso de México, a pesar de ser un país petrolero, su producción de gas natural es pequeña en comparación a su consumo, cubriendo el 31% aprox. de este último en 2022, en perspectiva, a febrero del 2022 la producción de EE. UU. fue de 102310 MMpcd mientras que su consumo fue de 88632 MMpcd, la producción lo excedió 15% aprox. Debido a que la brecha entre consumo y producción se ha ido acrecentando cada vez más México se ha convertido en un importador neto de gas natural para cubrir el consumo, siendo la principal fuente de suministro el mercado de EE. UU., uno de los mercados de gas natural con los precios más bajos a nivel global<sup>17</sup>, a través de la internación por gasoducto.

En un pequeño análisis historiográfico, Rodríguez (2018) rastrea los orígenes del actual problema de México sobre su dependencia de las importaciones de gas natural a la crisis financiera ocurrida entre 1994 y 1995. Poco tiempo antes, a través de la firma del TLCAN el sector energético mexicano quedó abierto a la inversión extranjera y se ingresó al mercado de energía de Canadá y EE. UU., en específico, con la crisis se liberó la industria del gas natural aguas abajo y se permitió la incorporación del sector extranjero en la propiedad y manejo de gasoductos sin establecerse límites a la importación y construcción de infraestructura para gas natural, con lo que las dimensiones de este sector extranjero ahora se colocaban en lo productivo, financiero y regulatorio, la producción nacional quedó en segundo plano al permitir que las importaciones cubrieran el consumo dentro del país [Rodríguez, 2018, p. 92].

En febrero del 2021 ocurrió una tormenta invernal que afectó a gran parte del estado de Texas, EE. UU., estado de donde proviene la mayor parte del gas importado del país, el sistema de gas natural sufrió afectaciones, por lo que su suministro se vio interrumpido, en ese mes las importaciones disminuyeron aproximadamente 500 MMpcd, como consecuencia, el precio del gas natural en México se disparó hasta 21.37 USD/MMBTU cuando en enero se cotizaba en 3.39 USD/MMBTU. Los principales sectores afectados por la interrupción en el suministro fueron el automotriz y generación de electricidad, este suceso dejó entrever la inseguridad energética que existe en el país en materia de gas natural, pues se estima que en

---

<sup>17</sup> En el Statistical Review of World Energy 2021 publicado por la British Petroleum los precios del gas natural en EE. UU. fueron los segundos más bajos en 2020 con un promedio de 1.99 USD/MMBTU solo superado por el de Canadá con 1.58 USD/MMBTU. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-natural-gas.pdf>

México solo se tienen reservas almacenadas para 1 día y medio de suministro de este combustible.

## V. Marco metodológico y Materiales

En la búsqueda de conocer la relación que existe entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico en el país se han utilizado los modelos panel ya que permiten la incorporación de más información sobre un mismo parámetro al tener una bidimensionalidad de los datos (datos de sección cruzada en el tiempo) mejorando la eficiencia de los resultados.

### V.I. Modelos de regresión

#### V.I.I. Pooled OLS (POLS)

El modelo POLS es la forma más simple de los modelos panel, el cual se define de la siguiente forma, donde  $\alpha_i$  representa las constantes individuales,  $u_{i,t}$  el término de error y  $\beta_i$  los parámetros asociados a cada variable exógena que la relacionan con la variable endógena, consumo de gas natural (CGNTSPM), empleo (OCUP), inversión extranjera directa (IEDMXPP), apertura económica (APER) y consumo de electricidad (CE):

$$PIB_{it} = \alpha_i + \beta_1 CGNTSPM_{i,t} + \beta_2 OCUP_{i,t} + \beta_3 IEDMXPP_{i,t} + \beta_4 APER_{i,t} + \beta_5 CE_{i,t} + u_{i,t}$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n$  hace referencia a la sección cruzada (Estados) y  $t = 1, 2, \dots, T$  al tiempo.

Al ser el modelo panel más general se mantienen los supuestos (restricciones) clásicos sobre el término de error, que su media esperada es igual a cero,  $E[u_{i,t}] = 0$ , que no existe correlación entre las variables explicativas y el término de error (exogeneidad de las variables),  $E[u_{i,t}|X'_{i,t}] = 0$ , y que la varianza del modelo sea constante para cada sección cruzada,  $E[u_{i,t}^2|X'_{i,t}] = \sigma_i^2$ . De cumplirse estos supuestos, los estimadores serán insesgados y eficientes y se podrá utilizar POLS.

Si los supuestos anteriores no se cumplen, se pueden utilizar los modelos de efectos fijos o efectos aleatorios.

#### V.I.II. Efectos fijos (FE)

Al ser el más simple de los modelos, el modelo POLS puede contar que severos problemas en su estimación por los supuestos que se le imponen, uno de estos padecimientos es que existan factores omitidos que influyan en la variable dependiente. Estos factores no observables se pueden clasificar en 2: los que se mantienen constantes y los que varían en el tiempo [Wooldridge, 2012, p. 456].

El término  $z_i$  acoge todos los factores no observables y que son constantes en el tiempo que influyen sobre la variable dependiente, este término es conocido como *efecto fijo*. El término de error  $u_{i,t}$  ahora se le conoce como error idiosincrático ya que contiene factores no observables que cambian en el tiempo e influyen sobre la variable dependiente.

Se define el modelo base de la siguiente manera:

$$PIB_{it} = z_i + \beta_1 CGNTSPM_{i,t} + \beta_2 OCUP_{i,t} + \beta_3 IEDMXPP_{i,t} + \beta_4 APER_{i,t} + \beta_5 CE_{i,t} + u_{i,t}$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n$  hace referencia a los Estados y  $t = 1, 2, \dots, T$  al tiempo.

El siguiente paso es obtener para cada  $i$  una ecuación promedio en el tiempo (modelo *between*). Debido a que  $z_i$  es contante en el tiempo, el término se conserva en las ecuaciones promedio  $\bar{X}_i, \bar{y}_i$  y  $\bar{u}_i$  representan los promedios:

$$\overline{PIB}_i = z_i + \beta_1 \overline{CGNTSPM}_{i,t} + \beta_2 \overline{OCUP}_{i,t} + \beta_3 \overline{IEDMXPP}_{i,t} + \beta_4 \overline{APER}_{i,t} + \beta_5 \overline{CE}_{i,t} + \bar{u}_{i,t}$$

Finalmente, se le resta al modelo base el modelo between para obtener la transformación de efectos fijos (modelo *within*), con lo que se elimina el término de los efectos fijos, en este modelo se elimina cualquier factor que sea constante en el tiempo:

$$P\ddot{I}B_{it} = \beta_1 CGN\ddot{T}SPM_{i,t} + \beta_2 O\ddot{C}U\ddot{P}_{i,t} + \beta_3 IED\ddot{M}XPP_{i,t} + \beta_4 A\ddot{P}E\ddot{R}_{i,t} + \beta_5 C\ddot{E}_{i,t} + \ddot{u}_{i,t}$$

donde  $P\ddot{I}B_{it} = PIB_{it} - \overline{PIB}_i$ , la misma estructura para los demás términos con acento  $\ddot{\cdot}$ .

Los supuestos que se deben cumplir en el modelo de efectos fijos es que se asume que  $z_i$  está correlacionado con  $X_{i,t}$ ,  $E[z_i | X_{i,t}] \neq 0$ , además de que el error idiosincrático no está correlacionado con las variables independientes ni con el término de efectos fijos en todos los periodos,  $E[u_{i,t} | X_{i,t}, z_i] = 0$ , de cumplirse estos supuestos, los estimadores de efectos fijos serán insesgados y consistentes para un  $T$  fijo.

Algunas de las consideraciones que se señalan respecto a este modelo [Wooldridge, 2012, 487], lo primero es que para que sus estimadores sean eficientes los errores idiosincráticos no deben estar correlacionados serialmente, cosa que puede ser falsa ya que en algunas ocasiones los factores no observables se modifican en el tiempo y se correlacionan, otra consideración es que en los casos donde  $T$  es grande y  $n$  no, la inferencia del modelo puede ser muy sensible a la violación de cualquiera de sus supuestos y generar regresiones espurias.

Para el caso en el que se crea que el término de efectos fijos,  $z_i$ , no está correlacionado con las variables independientes,  $X_{i,t}$ , es preferente utilizar un modelo de efectos aleatorios.

### V.I.III. Efectos aleatorios (RE)

Al igual que con el modelo de efectos fijos se incluye el término  $z_i$  que contiene factores no observables con la diferencia de que se conserva el término  $\alpha_i$  lo que supone que  $z_i$  tiene media cero [Wooldridge, 2012, p. 489]. La premisa de este modelo es que el término de efectos fijos,  $z_i$ , no está correlacionado con las variables independientes,  $X_{i,t}$  en todos los periodos de tiempo, de tal forma que se genera el término de error compuesto  $v_{i,t} = z_i + u_{i,t}$  el cual se correlaciona serialmente en cada periodo, esto permite que se incorporen variables independientes que son constantes en el tiempo,  $E[z_i|X_{i,t}] = \alpha_i$ . El modelo se define como:

$$PIB_{it} = \alpha_i + \beta_1 CGNTSPM_{i,t} + \beta_2 OCUP_{i,t} + \beta_3 IEDMXPP_{i,t} + \beta_4 APER_{i,t} + \beta_5 CE_{i,t} + v_{i,t}$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n$  hace referencia a los Estados y  $t = 1, 2, \dots, T$  al tiempo.

Para tratar la correlación serial y poder estimar el modelo se utilizan los mínimos cuadrados generalizados (MCG) los cuales requieren una transformación tal que elimine dicha correlación, para ello se ha definido el parámetro  $\lambda$  cuyo valor está entre 0 y 1:

$$\lambda = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + T\sigma_z^2}}$$

donde  $\sigma_u^2$  es la varianza de  $u_{i,t}$  y  $\sigma_z^2$  es la varianza de  $z_i$ .

Finalmente, el parámetro  $\lambda$  se multiplica por el modelo between (la única diferencia entre el modelo between usado en el apartado anterior y este es que en este se ha conservado el término  $\alpha_i$  y se ha sustituido el error compuesto) y el producto se le resta al modelo base antes descrito. En el modelo resultante se ha tratado la correlación de los errores:

$$\begin{aligned} PIB_{it} - \lambda \overline{PIB}_i &= \alpha_i(\lambda) + \beta_1 (CGNTSPM_{i,t} - \lambda \overline{CGNTSPM}_{i,t}) \\ &+ \beta_2 (OCUP_{i,t} - \lambda \overline{OCUP}_{i,t}) + \beta_3 (IEDMXPP_{i,t} - \lambda \overline{IEDMXPP}_{i,t}) \\ &+ \beta_4 (APER_{i,t} - \lambda \overline{APER}_{i,t}) + \beta_5 (CE_{i,t} - \lambda \overline{CE}_{i,t}) + v_{i,t} - \lambda \bar{v}_{i,t} \end{aligned}$$

Uno de los señalamientos respecto a los modelos RE es que en estos asumen desde el inicio que los factores inobservables no se correlacionan con las variables independientes y en la práctica se usan los datos panel en muchos casos justo para permitir que exista correlación entre los efectos no observables y las variables independientes [Wooldridge,

2012, 491]. Además, para estimar el modelo RE se necesita un estimador de efectos aleatorios  $\hat{\lambda}$  el cual es consistente con  $\lambda$  (es insesgado y con distribución normal cuando  $n$  crece con  $T$  fijo), sin embargo, cuando  $n$  es pequeño y  $T$  es grande no se conocen las propiedades de  $\hat{\lambda}$ .

#### V.I.IV. Prueba de Hausman

Determinar qué tipo de modelo utilizar, FE o RE, es una de las preguntas que se debe responder al momento de llevar a cabo la investigación de algún fenómeno mediante el uso de datos panel. En 1978 Hausman propuso una prueba sobre las diferencias de los coeficientes estadísticamente significativos que varían en el tiempo obtenidos en los modelos FE y RE.

El resultado de la Prueba de Hausman determina si se utilizan ambos modelos o solo FE. De rechazarse la prueba a través de la inferencia estadística supone que el modelo RE es falso y solo debe utilizarse FE. La Prueba de Hausman queda definida de la siguiente manera:

$$\lambda^2(k): H = \frac{[\beta_{FE} - \beta_{RE}]^T [\beta_{FE} - \beta_{RE}]}{cov(\beta_{FE}) - cov(\beta_{RE})}$$

$H_0$ : Los estimadores de FE y RE son consistentes entre sí

$H_a$ : Los estimadores de RE no son consistentes con los de FE

donde  $\beta_{FE}$  es el vector con los coeficientes del modelo FE,  $\beta_{RE}$  el vector con los coeficientes del modelo RE,  $k$  el número de coeficientes,  $cov(.)$  la matriz de varianzas y covarianzas respectivas a cada modelo,  $H_0$  la hipótesis nula y  $H_a$  la hipótesis alternativa.

#### V.II. Estacionariedad: Prueba de raíz unitaria

Recordando, un proceso estocástico es aquel donde se tiene un conjunto de variables aleatorias que se encuentran ordenadas en el tiempo, muchas de las variables en economía son definidas como procesos estocásticos, tal y como lo es el PIB [Gujarati, 2010, 740], el cual puede adquirir un valor específico (determinado por las condiciones existentes en ese punto específico de tiempo), llamado realización, dentro de un periodo de tiempo.

Implícitamente en el párrafo anterior se ha establecido una de las características de la mayoría de los datos económicos que se utilizan dentro de los análisis, y esta es que son datos discretos, pues se recopilan en puntos discretos en el tiempo, horas, días, años, etc. En esta

sección  $Y_{i,t}$  es definida como una variable aleatoria y discreta donde  $i = 1, 2, \dots, n$  hace referencia a la sección cruzada y  $t = 1, 2, \dots, T$  al tiempo.

La estacionariedad de un proceso estocástico se cumple cuando su varianza y media se mantienen constantes en el tiempo y su covarianza solo depende del rezago que existe entre dos periodos de tiempo, si alguna de estas condiciones no se cumple, se dice que el proceso estocástico es no estacionario. La relevancia de los procesos estocásticos estacionarios es que el estudio de su comportamiento se puede generalizar para otros periodos, es decir, se pueden hacer pronósticos.

El problema es que, en los análisis, a pesar de que se desea obtener procesos estocásticos estacionarios, en muchas ocasiones se cruza con procesos no estacionarios, la forma más simple de identificar estos procesos es a través del Modelo de Caminata Aleatoria (MCA) el cual se define como:

$$Y_{i,t} = \rho_i Y_{i,t-1} + u_{i,t}$$

donde  $-1 \leq \rho \leq 1$ . Si  $\rho = 1$  se tiene un proceso estocástico no estacionario, a este problema se le conoce como *problema de raíz unitaria*, si  $|\rho| < 1$  se tiene un proceso estacionario.

Para enfrentar el problema de los procesos estocásticos no estacionarios se pueden usar varias herramientas como transformaciones logarítmicas, tendencias estocásticas y primeras diferencias. Considerando el MCA donde  $\rho = 1$  y reescribiéndolo de tal forma que:

$$\Delta Y_{i,t} = Y_{i,t} - Y_{i,t-1} = u_{i,t}$$

De esta forma el proceso estocástico no estacionario se ha transformado en uno estacionario, a esto se le conoce como *proceso estacionario en diferencias*. La diferenciación del MCA se puede aplicar  $d$  veces hasta obtener la estacionariedad. Si el proceso estocástico es estacionario desde el inicio, se dice que es *integrado de orden 0*  $I(0)$ , si se requiere una primera diferencia, es *integrado de orden 1*  $I(1)$ , y así hasta  $I(d)$ .

### V.III. Prueba Dickey – Fuller Aumentada (ADF)

El modelo base empleado por Dickey – Fuller para efectuar su prueba es:

$$\Delta Y_{i,t} = \delta_i Y_{i,t-1} + u_{i,t}$$

donde  $\delta = \rho - 1$  y  $\Delta Y_{i,t} = Y_{i,t} - Y_{i,t-1}$ . En este modelo se toman las primeras diferencias y se hace una regresión sobre  $Y_{i,t-1}$  con la finalidad de obtener el coeficiente  $\delta$ .

La prueba consiste en determinar que hipótesis se cumple a través del estadístico  $\tau$ :

$H_0: \delta = 0$  Es un proceso no estacionario

$H_a: \delta < 0$  Es un proceso estacionario

La prueba ADF tiene la diferencia con el modelo base de que ahora el término de error  $u_{i,t}$  esta correlacionado, por lo que se tienen que incorporar los rezagos de la variable  $\Delta Y_{i,t}$  de tal forma que el modelo se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta Y_{i,t} = \delta_i Y_{i,t-1} + \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} \Delta Y_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t}$$

donde  $\sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta Y_{i,t-j}$  son los rezagos de  $\Delta Y_{i,t}$  y  $\varepsilon_{i,t}$  se le conoce como *termino de error puro de ruido blanco*. Las hipótesis sobre el coeficiente  $\delta$  se mantienen.

### V.II.II. Prueba Phillips – Perron (PP)

Al igual que la prueba ADF, la prueba PP considera el problema de la correlación del término de error  $u_{i,t}$  en su modelo, sin embargo, a diferencia de la primera, no incorpora términos de los rezagos de la variable  $\Delta Y_{i,t}$  para resarcir el problema, sino que utiliza métodos estadísticos no paramétricos (modifica el estadístico de prueba) para evitar dicha correlación.

El fin de los estadísticos Z, como explican [Phillips & Perron, 1988, p. 341] es corregir los estadísticos de las regresiones convencionales para que tengan en cuenta los efectos de los errores, su correlación serial y distribución heterogénea, además, estos estadísticos tienen un término de corrección aditiva el cual se determina a partir de la diferencia entre las estimaciones de la varianza, estas diferencias sirven para eliminar los efectos de correlación asintóticamente.

Una de las limitantes de esta prueba es que al basarse en la teoría asintótica se necesitan grandes muestras de datos para que su funcionamiento sea eficiente [Mahadeva & Robinson, 2009, p. 41].

### V.II.III. Prueba Pesaran & Shin (IPS)

Se inicia con un modelo panel simple considerando un proceso estocástico generado por un proceso autorregresivo de primer orden [Pesaran & Shin, 2003, p. 55] que está definido de la siguiente manera:

$$Y_{i,t} = (1 - \rho_i)\mu_i + \rho_i Y_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}$$

Aplicando la primera diferencia ( $Y_{i,t} - Y_{i,t-1}$ ) y con los valores iniciales dados  $Y_{i,0}$  Pesaran y Shin reescriben el modelo anterior como:

$$\Delta Y_{i,t} = \alpha_i + \beta_i Y_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}$$

donde  $\Delta Y_{i,t} = Y_{i,t} - Y_{i,t-1}$ ,  $\alpha_i = (1 - \rho_i)\mu_i$ ,  $\beta_i = -(1 - \rho_i)$  y  $\varepsilon_{i,t}$  el término de error de ruido blanco.

Es a partir del modelo anterior donde se aplica la prueba IPS para raíz unitaria, teniendo como hipótesis lo siguiente:

$$H_0: \beta_i = 0 \text{ para toda } i$$

$$H_a: \beta_i < 0, i = 1, 2, \dots, N_1; \beta_i = 0, i = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, n \text{ donde } 0 < N_1 \leq n$$

Bajo esta hipótesis alternativa se permite que en algunas series se tengan raíces unitarias, es decir, se asume que la fracción de los procesos estocásticos estacionarios no sea cero [Pesaras & Shin, 2003, p. 55].

Finalmente, el estadístico de prueba para las hipótesis de IPS es el promedio del estadístico  $\tau$  de la prueba ADF.

$$t_{IPS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i$$

### V.III. Cointegración

Las pruebas de cointegración en los modelos panel son empleadas para determinar si existe una relación de equilibrio estable en el largo plazo entre las variables que conforman los modelos, dicho de otro modo, existe una tendencia a que se muevan en conjunto en el tiempo. Dos son las pruebas de cointegración más empleadas, la de Kao (1999) y la de Pedroni (1999).

#### V.III.I. Prueba de Kao

La prueba de Kao se basa en pruebas de raíz unitaria del tipo DF y ADF de los residuales de los modelos de panel con efectos fijos, por lo que parte justo de su definición:

$$y_{i,t} = z_i + \beta_i X_{i,t} + u_{i,t}$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n$  y  $t = 1, 2, \dots, T$ , además  $y_{i,t}$  y  $X_{i,t}$  son I(1), es decir:

$$y_{i,t} = y_{i,t-1} + v_{i,t}$$

$$X_{i,t} = X_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}$$

Iniciando con la prueba DF, esta se aplica a los residuales del modelo de efectos fijos:

$$\hat{u}_{i,t} = \rho \hat{u}_{i,t-1} + e_{i,t}$$

A partir de modelo se establece la hipótesis nula de no estacionariedad  $H_0: \rho = 1$ , para lo cual se determina el estimado de  $\rho$  y posteriormente su estadístico de prueba  $t$  para hacer el contraste:

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T \hat{e}_{i,t} \hat{e}_{i,t-1}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T \hat{e}_{i,t}^2}$$

$$t_\rho = \frac{(\hat{\rho} - 1) \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T \hat{e}_{i,t-1}^2}}{s_e}$$

donde  $s_e = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T (\hat{e}_{i,t} - \hat{\rho} \hat{e}_{i,t-1})^2}{nT}$ .

El estadístico  $t_\rho$  tiene una distribución normal con media cero, pero sufre de una posible existencia de exogeneidad débil y autocorrelación serial en los errores. Para contrarrestar estos problemas y probar la hipótesis nula de no cointegración del modelo Kao propone los siguientes estadísticos del tipo DF (todos tienen una distribución normal):  $DF_\rho$  y  $DF_t$  se basan en una exogeneidad fuerte entre los errores y regresores,  $DF_\rho^*$  y  $DF_t^*$  son para la cointegración con relación endógena entre los regresores y los errores [ , p. 253]:

$$DF_\rho = \frac{\sqrt{nT}(\hat{\rho} - 1) + 3\sqrt{n}}{\sqrt{10.2}}$$

$$DF_t = \sqrt{1.25}t_\rho + \sqrt{1.875n}$$

$$DF_\rho^* = \frac{\sqrt{nT}(\hat{\rho} - 1) + \frac{3\sqrt{n}\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_{0e}^2}}{\sqrt{3 + \frac{36\hat{\sigma}_e^4}{5\hat{\sigma}_{0e}^4}}}$$

$$DF_t^* = \frac{t_\rho + \frac{\sqrt{6n}\hat{\sigma}_e^2}{2\hat{\sigma}_{0e}}}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_{0e}^2} + \frac{3\hat{\sigma}_e^2}{10\hat{\sigma}_{0e}^2}}}$$

donde  $\hat{\sigma}_e^2 = \hat{\sigma}_v^2 - \frac{\hat{\sigma}_{v\varepsilon}^2}{\hat{\sigma}_\varepsilon^2}$  y  $\hat{\sigma}_{0e}^2 = \hat{\sigma}_{0v}^2 - \frac{\hat{\sigma}_{0v\varepsilon}^2}{\hat{\sigma}_{0\varepsilon}^2}$ .

Respecto a la prueba ADF, el modelo propuesto por Kao para los residuales que serán probados es el siguiente:

$$\hat{u}_{i,t} = \rho \hat{u}_{i,t-1} + \sum_{j=1}^m \gamma_j \Delta Y_{i,t-j} + e_{i,t,m}$$

la hipótesis nula se mantiene  $H_0: \rho = 1$ , y como se tienen las mismas propiedades asintóticas como en el modelo al que se le aplicó la prueba DF, se retoma el estadístico  $t$  de  $\rho$ .

El estadístico del tipo ADF que Kao definió para probar la hipótesis nula de no cointegración es:

$$ADF = \frac{t_{ADF} + \frac{\sqrt{6n\hat{\sigma}_e^2}}{2\hat{\sigma}_{0e}}}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_{0e}^2} + \frac{3\hat{\sigma}_e^2}{10\hat{\sigma}_{0e}^2}}}$$

el cual cuenta con una distribución normal.

### V.III.II. Prueba de Pedroni

Pedroni también parte de un modelo panel de efectos fijos:

$$y_{i,t} = z_i + \beta_i X_{i,t} + u_{i,t}$$

sobre el cual propone una serie de pruebas para hacer el contraste de la hipótesis nula de cointegración, a diferencia de la prueba de Kao, en este caso se relaja el supuesto de homogeneidad y se permite que haya una heterogeneidad considerable en el largo y corto plazo, esto significa que tanto  $z_i$  como  $\beta_i$  van a poder variar entre los elementos de la sección cruzada de tal forma que dentro de la hipótesis alternativa de esta prueba el vector de cointegración puede diferir para los distintos agentes.

Las siete pruebas de Pedroni se pueden dividir en dos: En las primeras (4) el promedio de los estadísticos se hace por partes, son regresiones cointegradas individuales para cada elemento de la sección cruzada, las distribuciones se basan en los límites de los términos del numerador y el denominador por partes, finalmente, con los errores estimados se calcula una prueba acumulada. El siguiente estadístico es uno de los 4 que se utilizan en estas pruebas:

$$Z_\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \hat{L}_{11i}^{-2} (\hat{u}_{i,t-1} \Delta \hat{u}_{i,t} - \hat{\lambda}_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \hat{L}_{11i}^{-2} \hat{u}_{i,t-1}^2}$$

donde  $\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2}(\hat{\sigma}_i^2 - \hat{s}_i^2)$ ,  $\hat{\sigma}_i^2$  es la varianza individual en el largo plazo de  $\hat{u}_{i,t}$  y  $\hat{s}_i$  la varianza contemporánea.

Las segundas pruebas (3) implican un promedio de los estadísticos de prueba para la cointegración en el tiempo a través de las secciones cruzada, son pruebas de medias grupales que resultan análogas a la prueba PP. Uno de los 3 estadísticos que se usan en estas pruebas es:

$$\tilde{Z}_\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (\hat{u}_{i,t-1} \Delta \hat{u}_{i,t} - \hat{\lambda}_i)}{\sum_{t=1}^T \hat{u}_{i,t-1}^2}$$

este estadístico sigue una distribución  $t$ .

La diferencia entre estos dos grupos de pruebas es que en el primero los errores estimados se agrupan y se calcula la prueba, en el segundo la prueba se hace con las medias grupales. Las pruebas del segundo grupo son preferidas ya que permiten mayor flexibilidad en la hipótesis alternativa de cointegración [Carrera, 2016, p. 149].

#### V.IV. Fully Modified OLS (FMOLS)

La relevancia de los métodos de panel no estacionarios, como el FMOLS, estriba en que, a diferencia de los métodos convencionales que están diseñados para emplear períodos de datos estacionarios cortos y que generalmente requieren que sus dinámicas sean homogéneas entre los miembros individuales del panel, han sido desarrollados de tal forma que sus tasas de convergencia se puedan usar para permitir dinámicas heterogéneas relativamente sin restricciones.

Los estimadores de los modelos convencionales OLS son consistentes, pero sus distribuciones correspondientes se encuentran sesgadas asintóticamente y dependen de parámetros asociados con la correlación serial de los datos, esto, sumado a la dinámica heterogénea en el proceso, complican más el análisis. De aquí la necesidad de establecer un estimador FMOLS que funcione relativamente bien para hacer inferencias en paneles cointegrados con dinámicas heterogéneas a medida que la dimensión de la sección cruzada crece, incluso para paneles con dimensiones de series de tiempo relativamente cortas [Pedroni, 1996, p. 4].

Pedroni (1996) inicia con un sistema panel cointegrado de la siguiente forma:

$$y_{i,t} = \alpha_{1i} + \beta X_{i,t} + u_{i,t}$$

$$X_{i,t} = \alpha_{2i} + X_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}$$

donde define el vector de errores  $\xi_{i,t} = (u_{i,t}, \varepsilon_{i,t})$  el cual es estacionario y tiene covarianza asintótica, de esto que las variables  $y_{i,t}$  y  $X_{i,t}$  se encuentren cointegradas cuando  $y_{i,t}$  es I(1), los términos  $\alpha_{1i}$  y  $\alpha_{2i}$  son incorporados para permitir que existan desviaciones idiosincrásicas en la sección cruzada, además, no se establece exogeneidad estricta en los regresores.

Son dos las suposiciones que hace Pedroni para poder obtener sus estimadores, la primera respecto a la parte temporal (serie de tiempo) y la segunda es respecto a la sección cruzada: la primera es que el vector  $\xi_{i,t}$  satisface un teorema funcional multivariable de límite central o principio de invarianza durante el tiempo para todo miembro del panel, esto impone pocas restricciones de dependencia temporal y de heterogeneidad a  $\xi_{i,t}$  [Pedroni, 1996, p. 8]; la segunda es asumir que los procesos individuales en la sección cruzada son independientes,  $E[\xi_{i,t}, \xi_{j,t}] = 0 \forall i \neq j$ .

Los estimadores OLS para los modelos panel encuentran problemas cuando se presenta endogeneidad en las variables independientes por lo que se debe hacer la suposición de exogeneidad estricta, suposición que no es aceptada para los modelos panel cointegrados dinámicos ya que limita la retroalimentación dinámica de las variables independientes [Pedroni, 1996, p. 10].

Para afrontar el problema anterior, Pedroni propone sus estimadores bajo los principios de que tanto la sección cruzada como las series de tiempo pueden crecer (aumentar el número de observaciones) además utiliza un enfoque completamente modificado para tratarlo, lo que les permite ser asintóticamente imparciales y distribuidos de manera normal.

El estimador de FMOLS establecido por Pedroni es:

$$\hat{\beta}_{nT}^* - \beta = \left( \sum_{i=1}^n \hat{L}_{22i}^{-2} \sum_{t=1}^T (X_{i,t} - \bar{X}_i)^2 \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{L}_{11i}^{-1} \hat{L}_{22i}^{-1} \left( \sum_{t=1}^T (X_{i,t} - \bar{X}_{i,t}) u_{i,t}^* - T \hat{\gamma}_{i,t} \right)$$

donde  $\hat{L}_i$  es el triángulo inferior de un estimador consistente con la matriz de covarianzas asintótica, más específicamente,  $\hat{L}_{11i}$  y  $\hat{L}_{22i}$  son los estimadores de largo plazo de los errores estándar,  $\hat{\gamma}_{i,t}$  es el parámetro de ajuste de la correlación serial y  $u_{i,t}^* = u_{i,t} - \frac{\hat{L}_{21i}}{\hat{L}_{22i}} \Delta X_{i,t}$ .

Este estimador se basa en promediar las distribuciones de las raíces unitarias sobre la sección cruzada, esto le confiere las características de no contar con parámetros asociados al problema de correlación serial, ser asintóticamente insesgado y distribuirse de forma normal.

Este estimador FMOLS es empleado para determinar la relación en el largo plazo del siguiente modelo.

$$PIB_{it} = \alpha_i + \beta_1 CGNTSPM_{i,t} + \beta_2 OCUP_{i,t} + \beta_3 IEDMXPP_{i,t} + \beta_4 APER_{i,t} + \beta_5 CE_{i,t} + u_{i,t}$$

#### V.V. Materiales

Para examinar la relación entre el consumo de energía y crecimiento económico se definió un modelo estadístico con una especificación lineal estándar de la forma:

$$y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \varepsilon_{it}$$

donde la variable dependiente  $y_{it}$  se ha definido como el PIB de los estados en millones de pesos medido a precios del 2013. Los datos anuales utilizados en este trabajo se han obtenido a través de dependencias oficiales, siendo el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Energía (SENER), Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS); los datos cubren los 32 estados de México en el periodo 2005 – 2019.

Respecto a las variables independientes  $X_{it}$ , a través de algunos trabajos empíricos y planteamientos teóricos han asumido que la energía es parte fundamental dentro de la producción por lo que en este trabajo se ha usado el consumo de gas natural como *proxy* del consumo de energía en el país debido a que su consumo dentro del sector industrial y en la generación de energía se ha incrementado con el paso de los años. El consumo de gas natural está medido en miles de pies cúbicos estándar (*Mscf*) y se ha obtenido de sumar el consumo de gas natural en el sector industrial, generador de electricidad y petrolero del país. Además, se ha utilizado el consumo de energía eléctrica como variable de control, este se encuentra medido en gigawatts por hora (GWh).

Para la fuerza de trabajo de los estados se ha utilizado la Población Económicamente Activa (*PEA*) que es el sector de la población mayor a 15 años que se encuentra trabajando por estado.

Un *proxy* de la apertura económica se obtiene a partir del grado de interacción que ocurre entre economías, tal efecto se mide a través de la proporción que guardan las exportaciones e importaciones sobre el PIB, sin embargo, debido a que el INEGI solo publica datos sobre

las exportaciones estatales se ha usado como *proxy* de la apertura económica el cociente (%) de las exportaciones estatales en millones de pesos entre el PIB<sup>18</sup>.

#### V.V.I. Construcción de la base de datos

Aplicar transformaciones a las variables es un elemento común en el análisis estadístico principalmente para obtener un mejor comportamiento cuando son utilizadas dentro de un modelo econométrico, la transformación más común es la logarítmica con la cual se obtienen distribuciones más cercanas a la normal, solventando problemas como la presencia de valores extremadamente grandes o pequeños que pueden ocasionar estimaciones deficientes, además, de esta forma es posible hacer una comparación entre los coeficientes estimados debido a que se trabaja con elasticidades y no con

Debido a que no se reportan datos del consumo de gas natural para los estados de Baja California Sur, Guerrero, Nayarit, Quintana Roo, Sinaloa, se prescindió de ellos para este estudio.

Tabla 2. Descripción de variables

Variables	Descripción	Estadísticas descriptivas	Periodo
IPIB <sup>19</sup>	Producto Interno Bruto <i>En millones de pesos</i>	Promedio: 12.7401 Mediana: 12.70325 Máximo: 14.9577 Mínimo: 11.13105	2005 - 2019
ICGNTSPM	Consumo de Gas Natural <i>En Mpcd</i>	Promedio: 11.62357 Mediana: 11.95432 Máximo: 13.80265 Mínimo: 2.071685	2005 - 2019
IOCUP	Empleo <i>Personas ocupadas de más de 15 años</i>	Promedio: 13.96077 Mediana: 14.00129 Máximo: 15.87253 Mínimo: 12.3973	2005 - 2019
IEDMXPP	Inversión extranjera directa	Promedio: 2.81545	2005 - 2019

<sup>18</sup> Como ambas variables son corrientes no se afecta el cociente.

<sup>19</sup> “l” representa que a la variable en cuestión se le ha aplicado una transformación logarítmica.

	<i>En millones de pesos</i>	Mediana: 2.305939 Máximo: 34.54714 Mínimo: -0.521708	
APER	Apertura económica <i>% de exportaciones del PIB</i>	Promedio: 0.275468 Mediana: 0.1913 Máximo: 1.387672 Mínimo: 0.001037	2007 - 2019
ICE	Consumo de energía eléctrica <i>En gigawatt por hora</i>	Promedio: 8.428814 Mediana: 8.31165 Máximo: 9.803115 Mínimo: 6.790438	2005 - 2019

---

Fuente: Elaboración propia

## VI. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados estimados que ayudaran a determinar la relación que existe entre el consumo de gas natural y crecimiento económico<sup>20</sup>. En la primera parte se presentan las estimaciones de los modelos estáticos OLS, FE y RE para determinar la relación entre consumo de gas natural y crecimiento económico, así como los resultados de las pruebas de raíz unitaria y cointegración que permiten determinar si es que existe un equilibrio en el largo plazo de las variables involucradas, para finalmente presentar las estimaciones obtenidas mediante el modelo FMOLS para determinar la relación entre consumo de gas natural y crecimiento económico en el largo plazo.

### VI.I. Resultados empíricos

#### VI.I.I. Regresiones

Como primer paso para establecer la relación existente entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico en México se efectuaron las regresiones tipo OLS, FE y RE previo a la selección del modelo que mejor se acople al comportamiento de los datos. La Tabla 3 resume los coeficientes estimados acorde al modelo panel especificado.

Como las variables han sido expresadas en logaritmos y porcentajes, los coeficientes estimados son interpretados como elasticidades.

Tabla 3. Coeficientes estimados

VARIABLES	(1)	(2)	(3)
	OLS	FE	RE
ICGNTSPM	0.0387*** (0.0923)	0.00789 (0.0188)	0.00874 (0.0208)
IOCUP	0.564*** (0.520)	0.830*** (0.765)	0.815*** (0.751)
IEDMXPP	-0.0362***	0.00234	0.00226

<sup>20</sup> Para complemento remitirse al Anexo 2. Aquí se extiende un análisis más desagregado al hacerse a partir del consumo de gas natural en algunas de las actividades industriales que conforman el sector manufacturero del país. Para ello se utilizaron los datos de las actividades que dentro de su proceso utilizan al gas natural como fuente de energía, la metodología empleada ha sido la misma que la del Capítulo V.

	(-0.0874)	(0.00564)	(0.00546)
APER	0.290**	0.352***	0.352***
	(0.112)	(0.136)	(0.136)
ICE	0.284***	0.00374	0.0254
	(0.280)	(0.00368)	(0.0250)
Constante	2.080***	0.969	0.981
<hr/>			
Observaciones	336	336	336
R-cuadrada	0.640	0.603	
Sección cruzada		28	28
<hr/>			
Se presentan los resultados robustos			
<hr/>			
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1			
<hr/>			
Fuente: Elaboración propia			
Desviaciones estándar entre paréntesis.			

Como segundo paso se efectuó la Prueba de Hausman para hacer una discriminación entre los modelos anteriores, la Tabla 4 muestra el resultado obtenido de dicha prueba mediante los cuales se establece que los coeficientes de RE son consistentes.

Tabla 4. Resultados prueba de Hausman

Modelo	$\chi^2$	p-value	Resultado
RE - FE	3.75	0.5853	RE

Fuente: Elaboración propia

Enfocándose en el modelo RE *ICGNSPTM* no es estadísticamente significativa, por lo que el consumo de gas natural y el crecimiento económico no guardan una relación estática, se observa que solo dos variables son estadísticamente significativas al 99%, por lo que el crecimiento económico solo puede ser explicado por el empleo *IOCUP* y la apertura económica *APER* del país, ante un incremento del 1% en el empleo el PIB crece en 0.815%.

## VI.II. Estacionareidad

Con la finalidad de conocer si los procesos estocásticos son o no estacionarios, las Pruebas IPS, ADF y PP fueron estimadas, en todas se asume una hipótesis nula de no estacionariedad.

Tabla 5. Pruebas de Raíz Unitaria

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Modelo	LPIB	APER	IEDMXPP	LOCUP	LCGNTSPM	LCE
Nivel						
IPS	5.4566	1.867	-3.385***	6.60809	-0.66515	1.72715
ADF	16.4463	53.721	101.446***	11.2919	66.8873*	48.404
PP	26.3085	61.548	224.127***	18.1171	138.468***	52.5925
Primera diferencia						
IPS	-6.188***	-7.081***	-12.103***	-10.239***	-7.72934***	-6.1581***
ADF	152.91***	164.97***	259.84***	223.69***	155.972***	144.89***
PP	305.78***	272.86***	622.78***	542.57***	253.09***	261.60***
Segunda diferencia						
IPS	-9.854***	-11.911***	-18.775***	-14.538***	-10.351***	-10.289***
ADF	214.46***	248.80***	375.33***	302.40***	190.18***	223.45***
PP	635.10***	477.48***	680.70***	681.99***	459.446***	595.13***

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

Fuente: Elaboración propia

Las probabilidades para el caso de IPS se calculan asumiendo una distribución normal, mientras que para ADF y PP se establecen a partir de una distribución asintótica  $\chi^2$ .

Los resultados de la Tabla 5 resumen los resultados obtenidos con los que se establece que todas las variables son estacionarias al aplicar la primera diferencia,  $I(1)$ , con un 99% de significancia estadística, mientras que en niveles solo *IEDMXPP* es estacionaria,  $I(0)$ , al 99% en las tres pruebas, para el caso de *LCGNSTM*, esta solo es  $I(0)$  al 99% mediante la Prueba PP. En adición, en segundas diferencias todas las variables son  $I(2)$  al 99% de significancia estadística.

### VI.I.III. Cointegración

Para determinar si el conjunto de variables se mueve en conjunto a través del tiempo, con énfasis en el caso del PIB y consumo de gas natural, se han empleado las Pruebas de Pedroni y Kao, donde en ambos casos se tiene una hipótesis nula de no cointegración. En ambas pruebas *LPIB* ha sido tomada como la variable dependiente.

La Tabla 6 presenta los resultados del panel cointegrado utilizando a *LPIB* como variable dependiente. Como se observa, de los 7 estadísticos propuestos por Pedroni (1999), solo en 3 no se rechaza la hipótesis nula de no cointegración al mínimo del 95%, estos son los Panel  $v$  (relación de varianzas), Panel  $\rho$  y Grupo  $\rho$ , en todos los demás estadísticos se rechaza la hipótesis nula de manera significativa. Con la prueba de Kao (1999) basada en la prueba ADF se obtuvo que se puede rechazar la hipótesis nula con al menos un 95% de significancia estadística, lo que indica la cointegración de las variables.

Tabla 6. Pruebas de Cointegración

Prueba	Estadístico	p-value
Pedroni (dimensión <i>whitin</i> y <i>between</i> )		
Panel $v$	-1.2229	0.8893
Panel $\rho$	3.739664	0.9999
Panel PP	-4.265494	0.0000
Panel ADF	-4.034901	0.0000
Grupo $\rho$	5.805932	1.0000
Grupo PP	-12.40183	0.0000
Grupo ADF	-5.353546	0.0000
Kao		
ADF	-2.035044	0.0209

Fuente: Elaboración propia

Para establecer el rezago óptimo y efectuar las pruebas de cointegración se empleó el criterio de simulación de Schwarz ya que este es uno de los dos criterios que mejor se ha acoplado a los resultados obtenidos en estudios previos sobre el consumo de gas natural y crecimiento económico [Kum et al., 2012, p. 2363].

#### VI.IV. Largo plazo

Una vez que se ha comprobado que se está ante un panel cointegrado, el último paso es determinar la relación de equilibrio en el largo plazo, esto a través del modelo FMOLS para panel heterogéneos cointegrados.

Tabla 7. Resultados FMOLS

Variables	(1) FMOLS
ICGNTSPM	0.367881*** (0.024062)
IOCUP	1.485224*** (0.024062)
IEDMXPP	0.376164*** (0.031172)
APER	-1.003886*** (0.29797)
ICE	-0.195467*** (0.040556)
Observaciones	302
R-cuadrada	0.444210
Sección cruzada	26

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

Fuente: Elaboración propia

Desviaciones estándar entre paréntesis

La Tabla 7 muestra los coeficientes estimados por el modelo, como las variables se expresaron en logaritmos y porcentajes los coeficientes estimados son interpretados como elasticidades. Se observa que las 5 variables independientes son estadísticamente significativas, por lo que en el largo plazo el crecimiento económico puede ser explicado por estas variables. Por su parte, *ICGNSPTM* es estadísticamente significativa al 99%, con lo que un aumento en el consumo de gas natural en 1% incrementa el PIB en 0.367%, a pesar de ser

una elasticidad pequeña, esta muestra una relación positiva existente entre las variables, por lo que en el largo plazo el crecimiento económico sí puede ser explicado por el consumo de gas natural. La primera y segunda elasticidad más grande pertenecen a la variable *IOCUP* y *IEDMXPP*, respectivamente, que son estadísticamente significativas al 99%, en ambos casos se tiene una relación positiva con el crecimiento económico, donde un incremento en 1% del empleo en México representa un incremento en 1.48% en el PIB.

## VI.II. Discusión de resultados

Los resultados de los modelos estáticos presentados al inicio de la sección anterior mostraron que, al menos con los datos empleados en esta tesis, la hipótesis de que a mayor consumo de gas natural se incrementa el crecimiento económico queda descartada, incumpléndose lo planteado en la teoría que sostiene que esta tiene un efecto positivo sobre la producción. En este sentido, el estudio más equiparable al manejado aquí por los datos de sección cruzada y series de tiempo empleados es el de Li et al. (2020) donde se trabajaron datos panel formados por 30 provincias de China en un periodo de 14 años, los resultados de su modelo estático mostraron que el PIB si puede ser explicado por el consumo de gas natural, lo que sustentaría lo planteado por Sari et al. (2008), que las distintas estructuras económicas en entre los países generan resultados diferentes.

Dentro de los datos panel, solo garantizando la estacionariedad de estos se obtienen análisis empíricos eficientes y se evita generar estimaciones espurias, los resultados mostrados en la sección anterior han confirmado la estacionariedad de las variables, a pesar de que en su forma original no todas las variables fueron  $I(0)$ , al aplicar la primera diferencia todas mostraron ser estacionarias  $I(1)$ , lo que, acorde con los trabajos y la metodología previamente revisados, permite continuar con las estimaciones de cointegración de las variables y asegurar que no se presentaran regresiones espurias más adelante.

Considerando que los métodos de cointegración son métodos sensibles a la definición de variables y periodos de tiempo, se siguió la misma línea de los estudios previamente realizados al seleccionar el empleo, la inversión extranjera directa, la apertura económica y el consumo de electricidad, para garantizar resultados consistentes, ya que fueron variables sobre las cuales no se presentaron problemas en los modelos, además, respecto al consumo de gas natural, en el periodo seleccionado no se presume de un structural break que haya

generado afectaciones generalizadas en el consumo en los estados con los que se trabajó, atendiendo a lo señalado por Lee y Chang (2005), por lo que, al menos en este sentido, se presume de resultados consistentes.

En Apergis y Payne (2010), Li et al. (2018), Balitskiy et al. (2016), y Lee y Chang (2008) se emplearon las pruebas de Pedroni para cointegración, en este último los resultados de los estadísticos son similar a los aquí obtenidos, siendo el Panel  $\rho$  y Grupo  $\rho$  no estadísticamente significativos, basándose primordialmente en los estadísticos ADF y PP concluyeron que las variables estaban cointegradas, en el caso de Li et al. (2018) solo se reportaron los resultados de los estadísticos ADF de Pedroni para reportar la cointegración de las variables, pero se ayudó a justificar con los resultados de la prueba de Kao, finalmente, en Balitskiy et al. (2016) ocurre algo similar, los estadísticos de  $\rho$  y Panel  $v$  no son significativos, mientras que la prueba de Kao les arrojó resultados de cointegración, reportando que existe cointegración de las variables al tomar el PIB como variable dependiente.

Por lo anterior, a pesar de que no con todos los estadísticos de Pedroni son significativos, hay una fuerte evidencia, los resultados de los estadísticos ADF y PP son estadísticamente significativos, respaldada por la prueba de Kao, de que las variables se encuentran cointegradas, respaldando la hipótesis particular de que *IPIB* y *ICGNSPTM* se cointegran en el tiempo, concordando con los resultados de Apergis y Payne (2010) donde también se considera a México dentro del análisis, y en general de los demás estudios, donde se esperaba la cointegración del consumo de energía y crecimiento económico.

Corroborando que existe una cointegración entre las variables se puede establecer que existe una relación de equilibrio en el largo plazo entre estas, el último paso es determinar, mediante un modelo dinámico, la relación existente entre el consumo de gas natural y el crecimiento económico en el largo plazo, para ello el modelo FMOLS fue seleccionado. Los resultados previamente mostrados establecen que el consumo de gas natural es estadísticamente significativo al 99% y su coeficiente es positivo, aceptando la hipótesis de que en el largo plazo el consumo de gas natural tiene una relación positiva con el crecimiento económico en México, coincidente con lo que se plantea en la teoría, ya que al incrementar el consumo de esta fuente de energía se esperan incrementos en el PIB.

Estos resultados en el largo plazo para México son concordantes con los resultados de Apergis y Payne (2010), donde en el largo plazo los resultados de su modelo FMOLS

mostraron que el consumo de gas era estadísticamente significativo y con coeficiente positivo, el distintivo entre los resultados es que en su estudio México formó parte de la sección cruzada, donde se incorporaron países con altos consumos de gas natural e infraestructura desarrollada para el mismo como EE. UU., China, Alemania, Noruega, Rusia, etc., resultando en una elasticidad estimada para el gas natural de 0.652, elasticidad más grande que la encontrada en esta tesis.

## VII. Conclusiones

Estudiar el desarrollo de la sociedad ha permitido que se pueda establecer, o al menos inferir, la existencia de un vínculo entre este y el uso de fuentes de energía para conseguirlo. Al establecerse este vínculo se ha extendido un interés por conocer la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico.

Es a partir de las teorías del crecimiento económico que se reconoce que la producción está definida por más de dos factores de producción, capital y trabajo, gracias a este reconocimiento es que el uso de energía se considera como un factor generador de valor dentro del sistema productivo de tal forma que se puede determinar el impacto que tiene el consumo de gas natural en la producción dentro de cualquier actividad, o en este caso, de cualquier país.

Ante este interés se han generado diversos estudios empíricos alrededor del mundo en busca de determinar el vínculo entre consumo de energía y crecimiento económico de forma particular. La evidencia aquí mostrada sugiere que en la mayoría de los casos existe una relación positiva entre el consumo de gas natural y crecimiento económico en los países seleccionados. Si bien, se observa esta generalidad, se debe tener en mente que, tal y como se mencionó en secciones anteriores, los resultados de los estudios se ven influenciados por los periodos de tiempos seleccionados, los países seleccionados (niveles de desarrollo), las variables seleccionadas y finalmente, por los métodos empleados.

Bajo estas consideraciones, esta tesis buscó determinar la relación existente entre el consumo de gas natural y crecimiento económico en México mediante un análisis panel construido a partir del consumo de gas natural en los sectores petrolero, industrial y autogeneración, y generador de electricidad por entidad federativa en el periodo 2005 – 2019 con la finalidad de entender las implicaciones que la política en materia energética puede tener en el crecimiento económico del país.

Para cumplir con el objetivo principal se inició por establecer la relación existente entre consumo de gas natural y PIB de México mediante el uso de modelos de regresión estáticos, efectos fijos y aleatorios, los resultados arrojaron que en ambos casos la elasticidad del consumo de gas natural sobre el PIB no es estadísticamente significativo, por lo que no es

determinante en el crecimiento del PIB<sup>21</sup>, siendo la principal fuente de crecimiento el número de la población económicamente activa y la apertura económica en el país. Estos resultados contrarrestan con lo planteado por la teoría económica y la hipótesis principal de esta tesis, incrementar el consumo de gas natural contribuye con el crecimiento económico.

La estacionariedad de las variables y la posterior comprobación de la primera hipótesis particular de esta tesis que refiere a la cointegración de las variables consumo de gas natural y PIB en el tiempo permitieron que fuera posible determinar su relación en el largo plazo a través del modelo dinámico FMOLS, los resultados arrojados por este modelo mostraron que en el largo plazo el consumo de gas natural tiene una relación positiva con el PIB, es decir, los incrementos en el consumo de este ocasionan crecimiento económico, esto ocasiona que las políticas económicas destinadas a modificar el nivel de consumo de gas natural con la finalidad de incentivar un mayor crecimiento económico sean establecidas teniendo en consideración un horizonte temporal amplio. Estos resultados, aparte de corroborar la segunda hipótesis particular de esta tesis, son concordantes con los obtenidos por trabajos previamente citados, principalmente con el de Apergis y Payne (2010) el cual es el único donde se ha incorporado a México dentro de estos análisis, y lo establecido por la teoría económica.

En el Anexo 2 se extendió este análisis a un nivel más desagregado, a las actividades industriales de las cuales la SENER reporta emplean gas natural dentro de sus procesos productivos, los resultados son concordantes con los obtenidos al nivel de sectores en el país con la salvedad de definirse en este caso un modelo bivariado y no multivariado, los modelos estáticos mostraron que el valor de la producción no es explicado por el consumo de gas natural, sin embargo, en el largo plazo, el modelo dinámico FMOLS mostró que hay una relación positiva entre el consumo del energético y el valor de la producción. Estos resultados abonan a la necesidad de que las políticas económicas destinadas a modificar el consumo se hagan considerando un horizonte temporal de largo plazo.

Los resultados muestran que las políticas energéticas tienen el poder de inferir sobre el crecimiento económico, además, los hacedores de política deben tener en consideración el horizonte temporal en el cual se deben aplicar y surtir efecto (distinguir efectos en el corto y

---

<sup>21</sup> El consumo de energía, en este caso el gas natural, en el sector productivo no genera directamente el crecimiento en el PIB, sino más bien es a partir del valor que la fuente de energía incorpora a los bienes finales comercializables durante el proceso de producción, los cuales conforman uno de los elementos que constituyen al Producto Interno Bruto.

largo plazo), con estos resultados se muestra que cualquier política de conservación orientadas a contraer el consumo del gas natural a nivel sectorial y nivel de actividad industrial tendrá repercusiones negativas sobre el crecimiento económico en México.

A pesar de que en México en el año 2016 se presenta la *Política Pública para la Implementación del Mercado de Gas Natural*, cuyo principal objetivo fue establecer una política pública que fomentara el desarrollo de un mercado competitivo de gas natural para contribuir con la seguridad energética del país y la continuidad del suministro de dicho hidrocarburo utilizando como principal estrategia la liberación del mercado de este, aún existen elementos de mejora como así lo demuestran los datos sobre su consumo y oferta, enfocarse en la producción nacional y la construcción de más infraestructura para el transporte, almacenamiento y distribución del gas natural, sobre todo en la región sur del país cuya infraestructura tiene un considerable rezago respecto a la zona norte, ayudaría a garantizar el suministro de gas natural (oferta) y a incrementar su consumo (demanda) tal como lo menciona Li & Cheng (2018) para el caso de China. Las mejoras en la gobernanza y gestión de la industria del gas natural nacional tampoco se deben dejar de lado.

Al momento de establecer políticas energéticas referentes al gas natural los hacedores de política deben tomar en consideración todos los aspectos en torno a este, como su calidad de ser un recurso agotable, la dependencia de las importaciones extranjeras para cubrir el consumo nacional, la infraestructura existente y requerida, la gestión sobre la industria, temas medioambientales, etc. A pesar de que una política que eleve la eficiencia del uso del gas natural en los procesos productivos, es decir, producir más con menos gas natural, puede ser beneficioso en términos ambientales, seguridad energética, etc., los resultados aquí obtenidos muestran que promover reducciones a su consumo implicaría efectos negativos sobre el PIB, ante esto, los hacedores de política deben establecer políticas bien definidas y con buenos planes de acción en el largo plazo.

Finalmente, las limitaciones de este estudio se enmarcan en la misma línea que en la de estudios previos, los datos usados, considerando el periodo y tipo de variables seleccionadas a las cuales se tiene acceso, para este caso en particular, se tuvo la limitante de que no fue posible acceder a datos relacionados a la formación bruta de capital a nivel de entidad federativa (variable recurrente y sugerida en los estudios revisados), y los modelos empleados, esto porque como se mencionó antes, ocasiona que no haya una homologación

de los resultados entre estudios, de tal forma que estas limitantes deben ser consideradas al momento de establecer políticas basadas en los resultados de este tipo de estudios.

Esta tesis se basó fundamentalmente en conocer la relación existente entre el consumo absoluto de gas natural y el crecimiento económico en México, sin embargo, posibles líneas de investigación futuras se podrían centrar en conocer la misma relación, pero con el consumo de gas natural como fracción del consumo total de energía en los sectores, además se puede extender el análisis involucrando el efecto que tiene el precio y la eficiencia energética sobre el consumo del gas natural y su vínculo con el crecimiento económico.

## Referencias

1. Apergis, N., Payne, JE. (2010). Natural gas consumption and economic growth: A panel investigation of 67 countries. *Applied Energy*. 87: 2759–2763.
2. Arrow, K. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economics Studies*. 29: 155 – 173.
3. Awodumi OB, Adewuyi AO. (2020). The role of non-renewable energy consumption in economic growth and carbon emission: Evidence from oil producing economies in Africa. *Energy Strategy Reviews*. 27.
4. Balitskiy S, Bilan Y, Strielkowski W, Štreimikienė D. (2016). Energy efficiency and natural gas consumption in the context of economic development in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55: 156–168.
5. Beaudreau, B. (2005). Engineering and economic growth. *Structural Change and Economic Dynamics*. 16: 211 – 220.
6. Bildirici ME, Bakirtas T. (2014). The relationship among oil, natural gas and coal consumption and economic growth in BRICTS (Brazil, Russian, India, China, Turkey and South Africa) countries. *Energy*. 65: 134–144.
7. Bonilla, D., Livas, A., Caballero, A. (2022). El efecto rebote del consume de gas natural: El caso de generación eléctrica en la Reforma Energética. *Investigación Económica*. 81: 174 – 198.
8. Caraianni C, Lungu CI, Dascalu C. (2015). Energy consumption and GDP causality: A three-step analysis for emerging European countries. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 44:198–210.
9. Carrera, C. (2016). Demanda de dinero a largo plazo en los países de América Latina: un enfoque de datos panel no estacionarios. *Monetaria*. Enero – junio: 131 – 166.
10. CNH. (2018). El Sector del Gas Natural: Algunas propuestas para el desarrollo de la industria nacional. México.
11. CEPAL. (2021). Informe de la Reunión de Expertos sobre Soberanía Energética, Cambio Climático y Transición Energética: El Caso del Gas Natural en México. México.
12. Frankel, M. (1962). The Production Function in Allocation and Growth: A Synthesis. 52: 995 – 1022.
13. Furtado, F., Soldateli, E. (2019). Energía en América Latina: Del negocio a lo común. Fundación Rosa Luxemburgo. México.
14. Furuoka F. (2016). Natural gas consumption and economic development in China and Japan: An empirical examination of the Asian context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56: 100–115.
15. Gujarati, D., Porter, D. (2010). *Econometría*. (5ª ed.). Mc Graw Hill. México.
16. Hu JL, Lin CH. (2008). Disaggregated energy consumption and GDP in Taiwan: a threshold co-integration analysis. *Energy Economics*. 30: 2342–2358.
17. Jiménez, F. (2011). Crecimiento económico: enfoques y modelos. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

18. Kum H, Ocal O, Aslan A. (2012). The relationship among natural gas energy consumption, capital and economic growth: Bootstrap-corrected causality tests from G-7 countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 2361–2365.
19. Kyung So Im, Pesaran, M., Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*. 115: 53-74.
20. Lee, CC., Chang, CP. (2005). Structural breaks, energy consumption, and economic growth revisited: evidence from Taiwan. *Energy Policy*. 27: 857–872.
21. Lee, CC., Chang, CP. (2008). Energy consumption and economic growth in Asian economies: A more comprehensive analysis using panel data. *Resource*
22. Li ZH, Cheng H, G TY. (2018). Research on dynamic relationship between natural gas consumption and economic growth in China. *Structural Change and Economic Dynamics*.
23. Lim HJ, Yoo SH. (2012). Natural gas consumption and economic growth in Korea: a causality analysis. *Energy Sources Part B*. 7:169–176.
24. Lotfalipour MR, Falahi MA, Ashena M. (2010). Economic growth, CO<sub>2</sub> emissions, and fossil fuels consumption in Iran. *Energy*. 35: 5115-5120.
25. Mahadeva, L., Robinson, P. (2009). Prueba de raíz unitaria para ayudar a la construcción de un modelo. (1<sup>a</sup> ed.). Centro de Estudios Monetarios Latinoamericanos. México.
26. Marx, K. (2009). *El capital*. Tomo I, Vol. 2. 24<sup>o</sup> Edición. Siglo XXI, México.
27. Morowski, P. (1988). Energy and Energetics in Economic Theory: A Review Essay. *Journal of Economic Issues*. 22: 811 – 830.
28. Payne, JE. (2011). US disaggregate fossil fuel consumption and real GDP: an empirical note. *Energy Sources Part B*. 6: 63–68.
29. Pedroni, P. (1996). Fully Modified OLS for heterogeneous cointegrated panels and the case of purchasing power parity. Indiana University. United States.
30. Phillips, P., Perron, P. (1988). Testing for a Unit Root in Time Series Regression. *Biometrika*. 75: 335 – 341.
31. Pokrovski, V. (2003). Energy in the theory of production. *Energy*. 28: 769 – 788
32. Rafindadi AA, Ozturk I. (2015). Natural gas consumption and economic growth nexus: is the 10th Malaysian plan attainable within the limits of its resource? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 49: 1221–1232.
33. Rodríguez, F. (2018). Seguridad energética: análisis y evaluación del caso de México. CEPAL. México.
34. Romer, D. (2006). *Macroeconomía Avanzada*. Tercera edición. McGraw Hill. Madrid, España.
35. Romer, P. (1986). Increasing Returns and Long – Run Growth. *Journal of Political Economy*. 94: 1002 – 1037.
36. Sari, R., Ewing, BT., Soytas, U. (2008). The relationship between disaggregate energy consumption and industrial production in the United States: an ARDL approach. *Energy Econ*. 30: 2302–2313.
37. SENER. (2020). Plan Quinquenal de Expansión del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural 2020-2024. México

38. SENER. (2018). *Prospectiva de Gas Natural: 2018 – 2032*. México.
39. SENER. (2022). *Prontuario Estadístico Abril 2022*. México.
40. SENER. (2012). *Prospectiva del Mercado de Gas Natural: 2012 – 2026*. México.
41. Shahbaz, M., Arouri, M., Teulon, F. (2014). Short- and long-run relationships between natural gas consumption and economic growth: evidence from Pakistan. *Econ Model.* 41: 219–226.
42. Siddiqui, R. (2004). Energy and Economic Growth in Pakistan. *The Pakistan Development Review.* 43: 175–200.
43. Solarin, S., Shahbaz, M. (2015). Natural gas consumption and economic growth: the role of foreign direct investment, capital formation and trade openness in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 42: 835–845.
44. Solow, R. (1978). Resources and Economic Growth. *The American Economist.* 22: 5 – 11.
45. United Nations. (2021). *Theme Report on Energy Transition. Towards the achievement of SDG 7 and Net-zero emissions.*
46. Wooldridge, J. (2012). *Introducción a la econometría: Un enfoque moderno.* (4ª ed.). Cengage Learning Editores, S.A. de C.V. México.
47. Yang, HY. (2000). A note on the causal relationship between energy and GDP in Taiwan. *Energy Econ.* 22: 309–317.
48. Zahid, A. (2008). Energy–GDP Relationship: A Causal Analysis For The Five Countries Of South Asia. *Applied Econometrics and International Development.* 8: 167-180.
49. Zamani, M. (2007). Energy consumption and economic activities in Iran. *Energy Economics.* 29: 1135–1140.
50. Zweifel, P., Praktijnjo, A., Erdmann, G. (2017). *Energy Economics. Theory and Applications.* Springer, Aache, Germany.

## Anexo 1.

### a. Modelo de Solow

Retomando la ec. 1, esta puede tomar la siguiente forma:

$$F\left(\frac{K}{AL}, 1\right) = \frac{1}{AL}F(K, AL) = \frac{Y}{AL} \dots 8$$

al multiplicarse por  $c = \frac{1}{AL}$ , donde  $k = \frac{K}{AL}$  y  $y = \frac{Y}{AL}$  son el capital y el producto por unidad de trabajo efectivo, respectivamente. Al reescribir la ec. 8 por unidad de trabajo efectivo se obtiene:

$$y = f(k) \dots 9$$

De la ec. 9 se observa que la producción por unidad de trabajo efectivo no depende del tamaño de la economía, solo depende de la cantidad de capital por unidad de trabajo efectivo. La ec. a.II satisface las siguientes propiedades:  $f(0) = 0$ ,  $f'(k) > 0$  y  $f''(k) < 0$ , lo que implica que la productividad marginal del capital es positiva, pero disminuye a medida que  $k = \frac{K}{AL}$  aumenta. Considerando los supuestos anteriores en torno a la función de producción, en el modelo de Solow se considera que esta tiene la forma de una función Cobb – Douglas debido a que está cumple con todos los supuestos y es una buena primera aproximación a las funciones de producción reales [Romer, 2006, p. 13].

En este modelo el tiempo se considera continuo y las dotaciones de K, L y A se suponen dadas, además, L y A crecen a tasas constantes:

$$\dot{L}(t) = nL(t) \rightarrow \frac{\dot{L}(t)}{L(t)} = n \dots 10 \quad \dot{A}(t) = gA(t) \rightarrow \frac{\dot{A}(t)}{A(t)} = g \dots 11$$

donde  $\dot{X}(t) = \frac{dX(t)}{dt}$ , los parámetros  $n$  y  $g$  son exógenos, de aquí que sea un modelo de crecimiento exógeno. Respecto al capital, el modelo considera que una parte de la producción se destina al consumo y otra a la inversión (principios de la teoría neoclásica), la segunda en una proporción  $s$  (exógena y constante), K se desprecia a una tasa  $\delta$ :

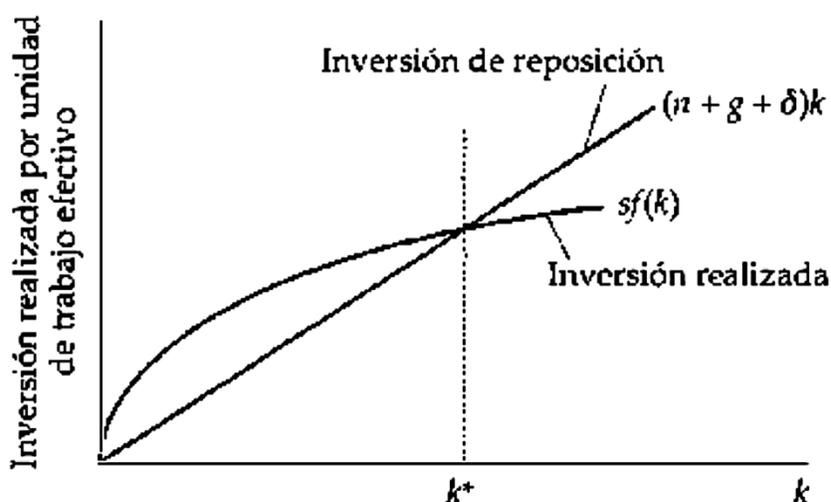
$$\dot{K} = sY - \delta K \dots 12$$

Las ec. 10, 11 y 12 representan el cambio de L, A y K en el tiempo, sin embargo, es conveniente hacer el análisis del cambio del capital a partir del capital por unidad de trabajo efectivo, para lo cual es necesario dividir la ec. 12 entre  $\frac{1}{AL}$ , lo cual da como resultado:

$$\dot{k} = s\frac{Y}{AL} - \delta k - nk - gk = sf(k) - (n + g + \delta)k \dots 13$$

siendo está la ecuación fundamental del modelo de Solow la cual establece que la tasa de cambio en el capital por unidad de trabajo efectivo es la diferencia entre la inversión realizada por unidad de trabajo efectivo y la inversión de reposición  $(n + g + \delta)$  que es la inversión necesaria para que  $k$  sea constante, esto debido a que  $K$  se deprecia en el tiempo a una tasa  $\delta$ , a demás, como el trabajo efectivo aumenta en  $n + g$ ,  $k$  debe aumentar en la misma proporción para que el stock de capital no varíe, por lo tanto, si la inversión realizada por unidad de trabajo efectivo es igual a la inversión de reposición,  $k$  es constante, siendo este el estado estacionario.

Fig. V<sup>22</sup>. Modelo de Solow. Comportamiento de las inversiones



Como se observó en la Fig. V  $k$  converge hacia  $k^*$ , este modelo propone que sea cual sea el punto de partida de la economía esta converge a hacia una *senda de crecimiento sostenido*, donde todas las variables crecen a una tasa constante, en este caso, en  $k^*$  el trabajo efectivo crece a una tasa  $n + g$ , la misma tasa de crecimiento de  $K$ , y al cumplirse el supuesto de rendimientos constantes de escala,  $Y$  aumenta en la misma proporción que los factores. Esto es el estado estacionario, donde la tasa de crecimiento de la producción por trabajador depende exclusivamente de la tasa de crecimiento del progreso técnico [Romer, 2006, p. 18].

<sup>22</sup> Romer, D. (2006). Inversión realizada e inversión de reposición [Gráfico]. En *Macroeconomía Avanzada*. McGraw Hill. Madrid, España.

De manera general, las características de los modelos provenientes de la teoría de crecimiento endógeno son el empleo de una función de producción con rendimientos crecientes de los factores, introduce la educación y capacitación como factores en la forma de capital humano, se considera a las externalidades ocasionadas por el avance tecnológico y no se prescinde de la política económica ya que esta tiene efectos sobre el crecimiento en el largo plazo [Jiménez, 2011, p. 432], finalmente, es una teoría mejor definida para países subdesarrollados ya que no depende del comercio.

b. Modelos de crecimiento endógeno

Los modelos de la primera generación parten de funciones de producción neoclásicas, ya que describen bien el comportamiento a nivel *firma*:

$$Frankel: Y = AK^{\alpha+\gamma}L^{1-\alpha-\gamma} \dots 14 \quad Arrow: Y = AK^{\alpha+\gamma(1-\alpha)}L^{1-\alpha} \dots 15$$

sin embargo, agregan un factor nuevo con el cual incorporan el *progreso técnico* en la economía lo que altera los resultados obtenidos en ambos modelos. En el modelo de Arrow el progreso técnico está definido como  $H = K^\gamma$  (conocimiento) mientras que en el de Frankel es  $H = \left(\frac{K}{L}\right)^\gamma$  (nivel de capital por trabajador), donde  $\gamma$  es un parámetro y  $H$  es el modificador de desarrollo (*modifer*). La ec. 16 es la función de producción *agregada* incorporando el progreso técnico utilizada en el modelo de Frankel.

$$Y = AHK^\alpha L^{1-\alpha} = A \left(\frac{K}{L}\right)^\gamma L^{1-\gamma} = AK^{\alpha+\gamma}L^{1-\alpha-\gamma} \text{ con } \gamma = 1 - \alpha \dots 16$$

En ambos modelos, en la función de producción agregada de la economía (suma de la producción de todas las firmas que conforman la economía),  $H$  es una variable *endógena* de la economía ya que es la representación de su grado de desarrollo, se modifica cuando todas las firmas de la economía aumentan su nivel de capital, por lo tanto, al considerar un número grande de firmas, para una sola de estas  $H$  no es más que un *parámetro* debido a que no puede influir por sí sola sobre él, actúa como una externalidad en las firmas. El desarrollo de una economía puede aproximarse utilizando variables como la tasa de natalidad y mortalidad, tasas de alfabetización, nivel de nutrición, nivel de capital por trabajador, entre otras, [Jiménez, 2011, p. 460], además, el grado de desarrollo abarca los efectos directos e indirectos del *cambio* en los recursos de la economía.

En cuanto a Arrow (1962), él establece que dentro de la función de producción se debe analizar lo consiguiente al *conocimiento técnico* que resulta del *aprendizaje* ya que es fundamental en el crecimiento económico. Para él el aprendizaje confiere rendimientos *crecientes* en la economía ya que genera una externalidad social positiva en el proceso de acumulación de capital a través de la experiencia adquirida a través de la operación de las máquinas en las firmas [Jiménez, 2011, p. 474]. Previamente, el progreso técnico en Arrow (1962) es  $H = K^\gamma$ , la ec. 15 representa la función de producción agregada en su modelo:

$$Y = AK^\alpha(HL)^{1-\alpha} = AK^\alpha(K^\gamma L)^{1-\alpha} = AK^{\alpha+\gamma(1-\alpha)}L^{1-\alpha} \text{ con } 0 < \gamma < 1 \dots 15$$

donde  $\alpha + (1 + \gamma)(1 - \alpha) > 1$ .

## Anexo 2

De manera complementaria al análisis macroeconómico anterior se ha optado por hacer un análisis a nivel de las actividades que conforman el sector industrial, así definidas por la SENER, para cuyo caso se han utilizado los datos de las siguientes 11 actividades debido a que son aquellas para las cuales existen datos sobre el consumo de gas natural: Elaboración de productos de tabaco, industria básica del hierro y el acero, fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas, minería de minerales metálicos y no metálicos, fabricación de pulpa, papel y cartón, fabricación de vidrio y productos de vidrio, elaboración de cerveza, elaboración de refresco, hielo y otras bebidas no alcohólicas, purificación y embotellamiento de agua, fabricación de automóviles y camiones, fabricación de productos de hule y fabricación de fertilizantes.

El panel se encuentra conformado por el valor de la producción anual de cada actividad a precios del 2013 en millones de pesos *LNVP*A (obtenidos de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera del INEGI) y el consumo de gas natural anual en tetrajoules *LNCG*NA (obtenido de la SENER) en el periodo de 2013 a 2020. Las variables fueron transformadas en logaritmos naturales. La Tabla 8 resume la información sobre las variables y sus estadísticas descriptivas.

Tabla 8. Descripción de variables actividades industriales

Variables	Descripción	Estadísticas descriptivas	Periodo
LNVP	Valor de la producción <i>En millones de pesos</i>	Promedio: 8.92822 Mediana: 8.92907 Máximo: 11.81863 Mínimo: 6.359762	2013 - 2020
LNCG	Consumo de gas natural <i>En tetrajoules</i>	Promedio: 8.777223 Mediana: 9.133188 Máximo: 12.05045 Mínimo: 0	2013 - 2020

Fuente: Elaboración propia

Para los resultados mostrados en esta sección se han empleado los mismos modelos definidos en el Capítulo V *Marco metodológico y Materiales* con la salvedad de que se ha establecido a la variable *LNCGNA* como único regresor de la variable dependiente *LNVP*.

a. Resultados empíricos a nivel de actividades industriales

a.I. Regresiones

La Tabla 9 resume los coeficientes estimados acorde al modelo panel especificado.

Tabla 9. Coeficientes estimados a nivel de actividades industriales

VARIABLES	(1) OLS	(2) FE	(3) RE
LNCGNA	0.251468*** (0.045857)	0.0430854 (0.057208)	0.0529162 (0.0588217)
Constante	6.721029***	8.55005***	8.463763***
Observaciones	88	88	88
R-cuadrada	0.1817	0.1817	
Sección cruzada	11	11	11

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

Fuente: Elaboración propia

Desviaciones estándar entre paréntesis.

La Tabla 10 muestra el resultado de la prueba de Hausman mediante los cuales se establece que los coeficientes de RE son consistentes.

Tabla 10. Resultados prueba de Hausman actividades industriales

Modelo	$\chi^2$	p-value	Resultado
RE - FE	1.50	0.2201	RE

Fuente: Elaboración propia

Enfocándose en el modelo RE se observa que el consumo de gas natural no es estadísticamente significativo, es decir, no existe una relación estática entre las variables, por lo que el valor de la producción no puede ser explicado por este.

a.II. Estacionareidad

Tabla 11. Pruebas de Raíz Unitaria actividades industriales

	(1)	(2)
Modelo	LNVPA	LNCGNA
Nivel		
IPS	-2.55953***	-1.88869***
ADF	41.9763***	39.9054***
PP	26.8631	42.7293***

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 11 demuestran que la variable *LNCGNA* es estacionaria  $I(0)$  ya que en las tres pruebas los coeficientes estimados son estadísticamente significativos al 99%, por su parte, a pesar de que en una de las tres pruebas (PP) el coeficiente estimado no es estadísticamente significativo en las dos restantes lo es, otorgando suficiente evidencia para establecer que la variable *LNVPA* también es estacionaria  $I(0)$ .

a.III. Cointegración

La Tabla 12 presenta los resultados del panel cointegrado utilizando a *LNVPA* como variable dependiente. De los 7 estadísticos propuestos por Pedroni (1999), solo en 3 no se rechaza la hipótesis nula de no cointegración al mínimo del 95%, estos son los Panel  $v$ , Panel  $\rho$  y Grupo  $\rho$ , en todos los demás estadísticos se rechaza la hipótesis nula de manera significativa. Con la prueba de Kao (1999) basada en la prueba ADF se obtuvo que se puede rechazar la hipótesis nula con al menos un 95% de significancia estadística, lo que indica la cointegración de las variables.

Se empleó el criterio de simulación de Schwarz para la prueba de cointegración.

Tabla 12. Pruebas de Cointegración actividades industriales

Prueba	Estadístico	p-value
Pedroni (dimensión <i>whitin</i> y <i>between</i> )		
Panel $v$	0.166203	0.434
Panel $\rho$	-0.03249	0.487
Panel PP	-3.357901	0.0004
Panel ADF	-3.271471	0.0005
Grupo $\rho$	1.280618	0.8998
Grupo PP	-3.43892	0.0003
Grupo ADF	-3.036768	0.0012
Kao		
ADF	-2.603945	0.0046

Fuente: Elaboración propia

a.IV. Largo plazo

Tabla 13. Resultados FMOLS actividades industriales

Variables	(1) FMOLS
LNCGNA	0.63864*** (0.114801)
Observaciones	77
R-cuadrada	0.879633
Sección cruzada	11
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1	

Fuente: Elaboración propia

Desviaciones estándar entre paréntesis

La Tabla 13 muestra el coeficiente estimado del consumo de gas por el modelo FMOLS, dados este resultado se tiene que la variable *LNCGNA* es estadísticamente significativa al 99% , por lo que en el largo plazo el valor de la producción en las actividades industriales

aquí analizadas puede ser explicado por el consumo de gas natural. Debido a que se encontró una relación positiva entre las variables, ante un incremento en el 1% en el consumo de este energético el valor de la producción se incrementa en 0.638%.

b.           Discusión de resultados

Al igual que con los resultados mostrados en el Capítulo VI Resultados, en los modelos estáticos de esta sección los resultados mostraron que no hay una relación entre el consumo de gas natural y la producción, volviéndose a incumplir la teoría que sostiene que un mayor consumo de gas natural se incrementa el valor económico de la producción.

La estacionareidad  $I(0)$  de las variables permitió que se efectuara la estimación de la cointegración de las variables. Las pruebas para determinar la cointegración, al igual que en los resultados del Capítulo VI *Resultados* mostraron que el consumo de gas natural y el valor de la producción se cointegran en el tiempo tomando a la variable *LNVP*A como variable dependiente, de hecho, su comportamiento es el mismo al ser los estadísticos Panel  $v$ , Panel  $\rho$  y Grupo  $\rho$  los únicos no significativos.

Gracias a la existencia de cointegración entre las variables se estableció la relación que guarda el consumo de gas natural y el valor de la producción en las actividades industriales antes descritas en el largo plazo con el modelo FMOLS, los resultados son concordantes con los encontrados en el Capítulo VI, el consumo de gas natural y valor de la producción tienen una relación positiva, concordando con la hipótesis sobre la relación consumo de energía y producción.