



Universitat Autònoma de Barcelona

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  http://cat.creativecommons.org/?page_id=184

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

**Estructura productiva, eficiencia energética y emisiones de CO₂ en
Colombia**

Tesis para optar por el grado de doctor en Economía

Autora: Lourdes Isabel Patiño Pascumal

Directores: Dr. Vicent Alcántara y Dr. Emilio Padilla

Departamento de Economía Aplicada

Doctorado en Economía Aplicada

Barcelona, septiembre 2016

A mi familia y mi esposo

Ellos me han proporcionado la inspiración más poderosa:

El amor incondicional

Agradecimientos

Deseo expresar mis mayores agradecimientos a todo el personal académico y administrativo del Departamento de Economía Aplicada de la Universitat Autònoma de Barcelona. En especial a mis dos directores de tesis, mi mayor gratitud al profesor Vicent Alcántara por su continuo apoyo, su paciencia, su amabilidad, su rigurosidad científica, su creatividad y su sabiduría para direccionarme correctamente durante la realización de la tesis. También agradezco profundamente al profesor Emilio Padilla por su valioso apoyo, su entusiasmo permanente para revisar mis avances de investigación, su agudeza analítica, y su generosidad para compartir su amplio conocimiento en el desarrollo de la investigación. Su confianza y motivación han sido fundamentales para mi formación como investigadora.

Agradezco también al profesor Josep Lluís Raymond-Bara por su infinita paciencia para transmitirme sus amplios conocimientos en el campo de la econometría, su valioso tiempo destinado para guiarme en el desarrollo econométrico de mi investigación. Me siento afortunada de haber contado con su sabiduría para realizar mi trabajo, pues cada reunión con el profesor se convirtió en una hermosa experiencia de aprendizaje.

Agradezco al profesor Pere Riera por haberme dado la oportunidad de tener una enriquecedora experiencia de aprendizaje en calidad de becaria durante la realización del doctorado, agradezco sus sabios consejos y sus palabras de motivación para culminar mis estudios.

Del personal administrativo, quisiera reconocer ampliamente la excelente labor realizada por Pilar Bernabé, desde antes de ingresar a la UAB hasta la fecha, Pilar ha sido mi apoyo constante durante estos años, en la gestión y desarrollo de innumerables trámites que he requerido.

Agradezco también el apoyo y la colaboración brindada a los estudiantes por el gestor del Departamento de Economía Aplicada, Juan Carlos Migoya, durante su período de gestión.

A nivel institucional, agradezco la gestión de Ana Otero y el apoyo financiero recibido del Programa de Becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina (ALBAN), y del Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA) de la UAB. Al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en particular a Ana Victoria Vega, por facilitarme la información relacionada con las cuentas nacionales.

Durante la formación del doctorado hice un esfuerzo por divulgar y socializar los avances de cada capítulo, en diferentes instituciones y congresos internacionales, a saber: III, IV y VI Jornadas de Análisis Input-Output, I Encuentro de la Asociación de Economía Ecológica en España, Banco Central de Costa Rica, Instituto de Investigaciones Sociales de la Universidad Autónoma de Nuevo León en México, Departamento de Análisis Económico de la Facultad de CC. Económicas y Empresariales de la Universidad de Zaragoza, la 3^a Conferencia-Oporto del Programa Alban de Becas de Alto Nivel, el Primer Foro sobre el Modelo de Insumo Producto aplicado a la Economía en Costa Rica, 2014, y el V Congreso de la Asociación Española para la Economía Energética, 2010. Agradezco a todos los investigadores, profesores y estudiantes quienes me brindaron sus críticas constructivas y comentarios en las distintas presentaciones, especialmente a: Henry Duque, Harold Banguero, Carmen Rojas Carvajal, José Manuel Rueda Cantuche, Mónica Serrano, Jordi Roca, Migue Ángel Tarancón, Arun Acharya, Rosa Duarte y Henry Vargas Campos, entre otros, sus sugerencias han sido una valiosa fuente de retroalimentación en la tesis.

Agradezco a Irene Morales de MarViva, Pamela Jiménez Fontana del Estado de la Nación, y Nanno Mulder de la CEPAL, por su flexibilidad con el tiempo y comprensión en mi trabajo.

Agradezco a Luz Dary y Juan Carlos su hospitalidad, su valiosa amistad y el apoyo brindado en las gestiones relacionadas con la etapa final del doctorado.

Agradezco a mi madre Elisa, mi hermano Stiven, y mi abuela Rosa Elena por ser fuente de inspiración, brindarme su amor, su apoyo incondicional y su acompañamiento permanente lo llevo siempre en mi corazón. A mi querida tía Marlene, mis tíos Andrés y Rafael, y mi primo Jhonny por su impulso a través de la distancia. A mi familia costarricense Don Manolo, Mauricio, Alex, Elba, Blanca, Abigail, Víctor, Yalena, Yazmín y Esteban por su cariño.

Agradezco a mis compañeros y amigos por la amistad brindada durante la realización de mis estudios de doctorado, especialmente a: Luz Dary, Liliana, Janeth, Edna, María de Jesús, Janina, Roberto, Gustavo, Paula, Lina, Rosalina, Gerardo, Yaiza. A mis amigos de mi ciudad natal Patricia, Liz, Alice, Gloria, Luz Margarita, Jorge, Juan Manuel, y por supuesto, a mi esposo, por su apoyo incondicional y cómplice en la realización de mis sueños.

Agradezco a todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron a la realización de esta investigación. Ruego me disculpen las omisiones de algunos nombres, la lista de agradecimientos puede llegar a ser interminable. ¡Tengo mucho que agradecer a Dios y a la vida!

Tabla de contenido

<i>Introducción</i>	15
<i>Capítulo 1: Evolución del consumo de energía y las emisiones de CO2 en Colombia</i>	27
<i>1.1. Introducción</i>	28
<i>1.2. Marco de referencia</i>	31
1.2.1. Marco de referencia conceptual.....	31
1.2.2. Marco de referencia empírico.....	35
<i>1.3. Métodos y Datos</i>	39
1.3.1. Métodos.....	39
1.3.1.1. Metodología de descomposición aditiva.....	41
1.3.1.2. Metodología de descomposición multiplicativa.....	45
1.3.1.3. Metodología para la estimación de la energía primaria total sectorial.....	47
1.3.2. Datos y descripción.....	48
1.3.2.1. Tratamiento para la agrupación de datos.....	48
1.3.2.2. Tratamiento del Valor Agregado.....	49
<i>1.4. Evidencia Empírica y Análisis de resultados</i>	55
1.4.1. Descomposición y análisis de la variación de las emisiones de CO ₂ relacionadas con la energía 55	55
1.4.2. Descomposición y análisis de la variación en la intensidad energética.....	59
<i>1.5. Conclusiones</i>	64
<i>1.6. Bibliografía</i>	67
<i>Anexo</i>	73
<i>Capítulo 2: Relación entre energía, emisiones de CO2 y PIB per cápita en Colombia</i>	85
<i>2.1. Introducción</i>	86
<i>2.2. Marco de referencia</i>	89
2.2.1. Marco de referencia conceptual.....	89
2.2.2. Marco de referencia empírico.....	94
2.2.3. Críticas a la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental.....	97
<i>2.3. Metodología y datos</i>	98
2.3.1. Limitaciones.....	103
<i>2.4. Evidencia empírica y análisis de resultados</i>	104
2.4.1. Desmaterialización y desvinculación en Colombia.....	104
2.4.2. Análisis del modelo de ajuste parcial.....	107
2.4.2.1. Especificación del modelo aplicado.....	107
2.4.2.2. Resultados estadísticos e interpretación de resultados.....	113

2.4.2.3. Discusión.....	119
2.5. Conclusiones	122
2.6. Bibliografía	125
Anexo.....	133
Capítulo 3: Análisis del cambio estructural del consumo de energía primaria en Colombia	145
3.1. Introducción.....	146
3.2. Marco de referencia.....	148
3.2.1. Marco Teórico	148
3.2.1.1. Notación utilizada.....	148
3.2.1.2. Estructura básica del modelo abierto de Leontief	149
3.2.1.3. Extensiones del modelo input-output al medio ambiente	152
3.2.2. Marco empírico	152
3.3. Datos y Metodología	156
3.3.1. Datos	156
3.3.2. Metodología	159
3.3.2.1. Metodología para construir la tabla de correspondencia sectorial y calcular las elasticidades de la energía	160
3.3.2.2. Metodología para estimar el cambio estructural del consumo de energía industrial.....	164
3.3.2.3. Comentario metodológico.....	169
3.4. Evidencia empírica, análisis y discusión de resultados.....	171
3.4.1. Determinación de las elasticidades del consumo de energía primaria total.....	171
3.4.1.1. Estimación de la elasticidad del consumo de energía considerando importaciones.....	172
3.4.1.2. Estimación de la elasticidad del consumo de energía nacional	173
3.4.1.3. Estimación de la matriz de elasticidad del consumo de energía nacional	177
3.4.2. Análisis del cambio estructural del consumo de energía	182
3.4.3.1. Análisis de cambio estructural convencional	186
3.4.3.2. Análisis de cambio estructural en términos del uso de energía.....	190
3.5. Conclusiones	194
3.6. Bibliografía	200
Anexo.....	204

Lista de figuras

Figura 0.1. Interrelación entre el consumo de energía, las emisiones de CO ₂ y la actividad económica.....	19
Figura 1.1. Oferta de energía primaria. Colombia, 1971-2010	51
Figura 1.2. Oferta de energía renovable como proporción de la oferta de energía primaria. Colombia, 1975-2011	53
Figura 1.3. Evolución del consumo de energía final. Colombia, 1971-2010.....	53
Figura 1.4. Intensidad de las emisiones e intensidad de la energía. Colombia, 1971-2011	54
Figura 1.5. Descomposición del crecimiento de las emisiones de CO ₂ . Colombia, 1971-2010	55
Figura 1.6. Descomposición multiplicativa de la intensidad. Colombia, 1975-2010.....	61
Figura 1.7. Efecto intensidad sectorial (a precios constantes del 2005). Colombia 1975-2010	62
Figura 1.8. Efecto cambio estructural sectorial (a precios constantes del 2005). Colombia, 1975-2010.....	63
Figura 2.0. Posibles formas que puede tomar la relación entre la presión ambiental y el ingreso	92
Figura 2.1. Relación entre crecimiento económico y energía primaria. Desvinculación relativa. Colombia, 1971-2011	105
Figura 2.2. Relación entre crecimiento económico y emisiones de CO ₂ . Desvinculación relativa. Colombia, 1971-2011	105
Figura 2.3. Relación entre crecimiento económico y energía primaria. Desvinculación absoluta. Colombia, 1971-2011	106
Figura 2.4. Relación entre crecimiento económico y emisiones de CO ₂ . Desvinculación absoluta. Colombia, 1971-2011	106
Figura 2.5. Emisiones por unidad de PIB. Colombia, 1971-2011	109
Figura 2.6. Electricidad según fuentes energéticas primarias. Colombia, 1971-2011	110
Figura 2.7. Elasticidad ingreso de la energía a corto plazo. Colombia, 1971-2011	117
Figura 2.8. Elasticidad ingreso de la energía a largo plazo. Colombia, 1971-2011	117
Figura 2.9. Elasticidad ingreso de las emisiones de CO ₂ a corto plazo. Colombia, 1971-2011	118

Figura 2.10. Elasticidad ingreso de las emisiones de CO ₂ a largo plazo. Colombia, 1971-2011	118
Figura 2A.1. Elasticidad método convencional.....	134
Figura 2A.2. Función densidad simétrica.....	134
Figura 2A.3. Elasticidad método alternativo.....	136
Figura 2A.4. Función densidad asimétrica.....	136
Figura 2A.5. Variables utilizadas en los modelos de ajuste parcial	141
Figura 3.1. Marco contable simplificado del modelo Input Output simétrico	149
Figura 3.2. Elasticidades del consumo de energía. Colombia, 1996, 2005 y 2010	176
Figura 3.3. Intensidad de la energía productiva. Colombia 1996.....	184
Figura 3.4. Intensidad de la energía productiva. Colombia 2005.....	185
Figura 3.5. Intensidad de la energía productiva. Colombia 2010.....	185
Figura 3.6. Análisis del cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia, 1996-2005	188
Figura 3.7. Análisis de cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia, 2005-2010.....	190
Figura 3.8. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía. Colombia, 1996-2005.....	192
Figura 3.9. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía. Colombia, 2005-2010.....	194

Lista de tablas

Tabla 2.1. Resumen de los estudios consultados más representativos sobre la CKA durante el período 1995-2006.....	95
Tabla 2.2. Resultados de las estimaciones de corto plazo del modelo logarítmico lineal de las emisiones de CO ₂ per cápita y del consumo de energía per cápita. 1971-2007. Colombia	115
Tabla 2.3. Resultados de las estimaciones de largo plazo del modelo logarítmico lineal de las emisiones de CO ₂ per cápita y del consumo de energía per cápita. 1971-2007.....	116
Tabla 2.4. Resumen sobre la literatura empírica relacionada con la elasticidad ingreso de la energía y las emisiones de CO ₂	121
Tabla 3.1. Elasticidades de demanda y oferta considerando la matriz simétrica. con importaciones y la nacional. Colombia 1996, 2005 y 2010	175
Tabla 3.2a. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica nacional. Colombia 2005	178
Tabla 3.2b. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica con importaciones. Colombia 2005.....	179
Tabla 3.3. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica nacional. Colombia 2010	180
Tabla 3.4. Intensidades de energía productiva. Colombia 1996, 2005 y 2010.....	184
Tabla 3.5. Análisis convencional del cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia 1996-2005	187
Tabla 3.6. Análisis convencional del cambio estructural del consumo de energía. sectorial. Colombia 2005 – 2010	189
Tabla 3.7. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía 1996-2005. Colombia	192
Tabla 3.8. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía 2005-2010. Colombia	193

Lista de anexos

Anexo 1A.1. Resumen de los estudios más representativos que aplican la técnica de descomposición multiplicativa y aditiva	73
Anexo 1A.2. Exposición de la metodología Alcántara y Roca (1995).....	76
Anexo 1A.3. Redefinición de los balances energéticos de la IEA de forma semejante a un modelo IO. Colombia 2010	79
Anexo 1A.4. Tabla resumen del vector de energía primaria total. Colombia 1975-2010....	80
Anexo 1A.5. Tabla de Correspondencia CIU internacional y nacional adaptada para Colombia	81
Anexo 1A.6. Descomposición en seis factores del crecimiento de las emisiones de CO ₂ de Colombia 1971 – 2010	83
Anexo 1A.7. Descomposición en dos factores de la intensidad energética. Colombia 1971 – 2010	84
Anexo 2A.1. Explicación metodológica para estimación de elasticidades a largo plazo....	133
Anexo 2A.2. Presentación pruebas de los supuestos de los modelos.....	137
Anexo 2A.3. Interpretación de las pruebas estadísticas aplicadas a los modelos estimados.	142
Anexo 2A.4. Tabla elasticidades corto plazo y largo plazo con sus respectivos intervalos. Colombia 1971-2011	143
Anexo 3A.1. Resumen de los estudios sobre el consumo de energía usando el modelo Input Output	204
Anexo 3A.2. Síntesis cronológica de los principales cambios de la normatividad vigente energética en Colombia, 2000-2014.....	205
Anexo 3A.3. Tabla de uso a precios básicos. Colombia 1996 año base 2005 (en miles de millones de pesos corrientes).....	206
Anexo 3A.4. Tabla simétrica IO agregada con importaciones a precios básicos. Colombia 1996 (en miles de millones de pesos corrientes)	207
Anexo 3A.5. Matriz Q y pruebas de verificación 1996.....	208
Anexo 3A.6. Matriz Q y pruebas de verificación 2005.....	209
Anexo 3A.7. Matriz Q y pruebas de verificación 2010.....	210

Estructura productiva, eficiencia energética y emisiones de CO₂ en Colombia

Introducción

Motivación

Durante los últimos siglos la actividad económica ha tenido un fuerte crecimiento y la calidad de vida de la población ha mejorado sustantivamente gracias a la energía. Esto la convierte en un elemento vital de la economía y un factor clave para el desarrollo socioeconómico y demográfico de los países, de tal forma que su ausencia impediría el progreso de las naciones (Kenneth y Medlock, 2009).

La energía ha facilitado el acceso a la tecnología, sustituyendo mano de obra por energía mecánica y generando mejoras en la productividad de las industrias. Con ello ha incrementado su crecimiento y conexión con distintas industrias a nivel internacional y nacional, elementos que contribuyen a modificar su estructura productiva.

La cadena de valor de la energía a través de sus distintas fases (captura, generación, distribución, transformación y comercialización) permite abastecer de este producto a los sectores económicos responsables de la generación del valor agregado de un país, y simultáneamente, genera residuos que impactan al medio ambiente, subrayando la importancia de analizar los distintos factores que influyen en este proceso (King y Grey, 2013).

De acuerdo con la IEA (2015), dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico proceden del sector de la energía, y han aumentado progresivamente desde el siglo pasado. Por lo tanto, se requiere una acción efectiva en la descarbonización del sector energético atendiendo las deficiencias estructurales y regulatorias (King y Grey, 2013).

Acciones con estas características, guardan consistencia con los compromisos internacionales asumidos recientemente por Colombia en su lucha contra el cambio climático, pues el gobierno

colombiano se comprometió a una reducción del 20% de las emisiones de CO₂. La meta puede llegar a ser del 30%, si cuenta con ayuda internacional. Esta responsabilidad tan importante obliga a todos los sectores productivos a realizar una gestión integral de los recursos naturales (Correa, 2015) y, por tanto, de la energía.

El cambio estructural en el sector energético, si se atiende a las exigencias de descarbonización, requiere la incorporación de energías renovables mediante una mayor participación en el mix energético que subyace en los usos vigentes tanto de producción como de consumo en la utilización actual de la energía.

En los próximos decenios Colombia se enfrenta a un triple desafío: i) atender las crecientes necesidades de energía y garantizar la seguridad energética, ii) mitigar su impacto en el cambio climático global (esto debido a la producción y a la forma en que se usa la energía de forma ineficiente e intensiva generando impactos ambientales en diferentes escalas) y iii) avanzar hacia un cambio estructural en la composición de la energía. Un elemento que permite lograr estos objetivos es la eficiencia energética. De ahí, la importancia de analizar los factores que influyen en el comportamiento del consumo de energía, la generación de emisiones y la eficiencia energética. Este análisis posibilita identificar hallazgos importantes que contribuyan a definir políticas acertadas, bien informadas y direccionadas a resolver los problemas más apremiantes en el campo energético y ambiental de Colombia.

Estudios con estas características son promovidos por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2015) y la Agencia internacional de Energía (IEA, 2016), pues su desarrollo permite comprender mejor la interacción entre el sistema económico y el medio ambiente.

Enfoques teóricos y metodológicos

La interacción entre los flujos de materiales del medio ambiente y la actividad económica ha sido objeto de diversos debates en la literatura: i) una perspectiva es la señalada por Georgescu-Roegen (1971), relacionada con los límites físicos que imponen las leyes de la termodinámica

(el principio de conservación y la ley de entropía) a la expansión del sistema económico, especialmente la ley de entropía, referida a la degradación de la energía, esto es, que el proceso económico transforma energía y materiales de baja entropía del medio ambiente en bienes y residuos de alta entropía (los bienes que sean descartados después de ser usados pasan a ser residuos). ii) Entre las perspectivas pesimistas, se destaca el llamado informe Meadows (1972), basada en los "límites del crecimiento", que predijo un agotamiento de los recursos, sugiriendo implícitamente el crecimiento cero. iii) otro debate se relaciona con el concepto de desarrollo sustentable "satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades"(WECD, 1987, p. 55). iv) También se destaca el planteamiento de Daly (1999), que se basa en el estado estacionario, y distingue cuatro elementos: población constante, un stock de capital físico constante y su mantenimiento. Así como una minimización del consumo de energía y materiales. De este modo, se reduce el agotamiento de recursos y la contaminación. v) Entre las perspectivas optimistas, se encuentra la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) (Grossman y Krueger, 1995; Panayotou, 1997), hipótesis, basada en diversos estudios empíricos con datos de panel o de corte transversal, que sugiere una relación en forma de U invertida entre la actividad económica y el crecimiento ambiental. Esta hipótesis ha sido ampliamente puesta en cuestión (Ekins, 1997; Stern, 1998) e incluso se ha sugerido la posibilidad de procesos de revinculación (De Bruyn y Opschoor, 1997). La CKA no explica los mecanismos que conducen a este resultado. Ante esta situación, un grupo de investigadores se esforzó por profundizar en las explicaciones que conducen a la CKA. En este contexto, surgen los análisis de descomposición basados en el índice medio logarítmico (Ang, 2004, 2005) que utilizan datos históricos, y el análisis de cambio estructural basado en el modelo input-output (Hoekstra y van den Bergh, 2003; Proops, 1988; Rose, 1999).

Planteamiento del problema de investigación

Existe una estrecha relación entre el consumo de energía, la generación de emisiones y el crecimiento económico, pues el desarrollo de los procesos productivos requiere materiales y

energía, que son transformados en productos y desperdicios. Entre estos últimos destacan las emisiones de CO₂, el más importante, en términos cuantitativos, de los gases de efecto invernadero. Para comprender este planteamiento, se presenta la Figura 1.1., que muestra estas relaciones en un sistema económico abierto¹.

La figura ilustra el objeto de estudio de la presente investigación. En la parte superior, están algunos de los principales factores señalados en la literatura que intervienen en el uso de la energía, y la actividad productiva de los sectores económicos², y que influyen directa o indirectamente en la eficiencia energética, afectando la presión ambiental. En el centro de la figura se presentan las distintas fases del uso de la energía, incluyendo la actividad económica y el resultado de estos procesos. En la parte inferior se muestra el medio ambiente con interacción constante con los procesos que implica cada fase del uso de la energía, siendo de interés la generación de emisiones de CO₂.

De izquierda a derecha, en la primera fase se muestra la captura de las fuentes de energía primaria usadas en Colombia: gas natural (GN), petróleo (PT), carbón mineral (CM), hidroeléctrica, y otras energías renovables (leña, bagazo, eólica, residuos de biomasa). Un factor relevante en esta etapa son los cambios en la composición de las fuentes primarias, debido a sus implicaciones en la presión sobre el medio ambiente (IPCC, 2011; MINMINAS, 2007).

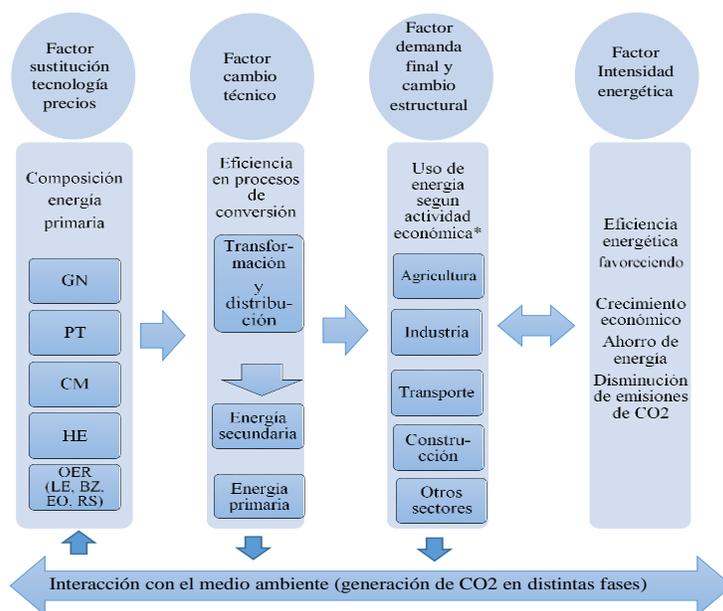
En la segunda fase, se presenta el proceso de transformación y distribución, dando lugar a las pérdidas resultantes de este proceso, y a la energía secundaria; por ejemplo, en Colombia la electricidad proviene especialmente de las energías renovables y el gas natural. Así se obtiene la energía final que será utilizada en el proceso productivo. También se toma en cuenta los productos del petróleo. El factor relevante en esta etapa es el cambio técnico y la eficiencia en la combustión que varía de una energía a otra con impactos ambientales diferentes (Kenneth y Medlock, 2009; UPME, 2015).

¹ Para una perspectiva detallada del concepto de sistema económico abierto, véase Martínez Alier y Roca (2003).

² En la tesis se sigue la revisión 3.1 de la clasificación industrial internacional uniforme de todas actividades económicas. Los datos se homogeneizaron mediante una tabla de correspondencia.

En la tercera fase, se presenta la energía primaria total según los distintos sectores (agrícola, industrial, transporte, servicios, etc.). La consideración de esta energía permite acercarse al principio de la conservación de la energía, aspecto fundamental en el análisis del flujo de la

Figura 0.1. Interrelación entre el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y la actividad económica



Fuente: Adaptación basada en la estructura de los balances energéticos (Miller y Blair, 2009)

*Nota: El uso final en la presente investigación comprende los requerimientos de energía primaria total según sector económico, se excluye el consumo residencial.

energía en la economía. La forma como cada sector económico use la energía, depende de la asignación de recursos y del avance tecnológico (Hoekstra, 2005). El factor relevante en esta etapa es la composición de la demanda y el cambio estructural (Kenneth y Medlock, 2009; Medlock y Soligo, 2001).

En la última fase, se muestra la eficiencia energética que puede ser resultado de los factores mencionados. El impacto en el consumo de energía por unidad de actividad económica dependerá de la eficacia en la asignación de los recursos, el crecimiento de los sectores

económicos, la tecnología y sus innovaciones, aspectos que pueden estar relacionados con: la sustitución de materiales, la combinación de insumos productivos, la sustitución de fuerza laboral por fuerza mecánica o robótica, entre otros (Hoekstra, 2005). Desarrollar energías alternativas de fuentes no convencionales y mejorar el rendimiento en el uso de la energía constituyen un elemento clave para el ahorro de la energía, la seguridad energética y la disminución de emisiones de CO₂ (King y Grey, 2013) y el crecimiento económico (Aden, 2016).

A partir de las relaciones establecidas en el objeto de estudio surgen varios cuestionamientos: ¿Cómo se interrelaciona el consumo de energía, la actividad económica y la generación de emisiones? ¿Cuáles son los factores determinantes de la evolución de los indicadores de presión ambiental y la eficiencia energética? ¿Cuáles son los sectores clave en el consumo de energía? ¿Qué impacto ha tenido el cambio estructural en el consumo de la energía?

Para responder estos interrogantes en el presente trabajo se utilizan distintas técnicas de descomposición sugeridas en la literatura para análisis de flujos, basadas en datos agregados, índices, cambio estructural y análisis econométrico.

Para articular estas preguntas con estos procesos metodológicos se proponen una serie de objetivos relacionados con la evolución de los tres capítulos y los apartados que componen este trabajo.

Objetivos de la tesis

El objetivo general es determinar y cuantificar la interrelación entre el consumo de energía, la actividad económica y las emisiones de CO₂ en Colombia.

El objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

i) Determinar los factores que influyen en la evolución de las emisiones de CO₂, desde la perspectiva de la identidad Kaya, y cuáles factores afectan la eficiencia energética medida como

el consumo de energía por unidad de actividad económica. ii) estudiar la relación entre los indicadores de presión ambiental (emisiones de CO₂ y energía) con respecto a la actividad económica y otras variables relevantes y contrastar la hipótesis de la CKA. iii) Identificar los sectores clave en el consumo de energía mediante la estimación de elasticidades sectoriales del consumo de energía con el enfoque input-output. iv) Medir y analizar el cambio estructural en el consumo de energía y determinar los sectores responsables de dicho cambio desde la perspectiva input-output. v) Definir algunos lineamientos de política a partir de los resultados.

Estructura de la tesis

La tesis doctoral consta de 3 capítulos que abordan aplicaciones sobre las cuales no hay constancia en la literatura revisada para Colombia. Cada capítulo está compuesto de marco conceptual, marco empírico, descripción del origen de los datos, metodología, análisis de resultados, conclusiones y algunas sugerencias de política, a partir de los hallazgos en cada capítulo.

A continuación, se explica brevemente la metodología utilizada para desarrollar los objetivos presentados, así como los principales hallazgos.

- i) En el primer capítulo, se estudia los factores determinantes de las emisiones de CO₂ para el período 1971-2010, y la eficiencia energética durante el período 1975–2010. También se explica la relevancia de trabajar con energía primaria total en lugar de energía final, aplicando el método Alcántara y Roca (1995) para 36 años. La construcción de estos datos implica un esfuerzo importante, pues la estructura y composición de los datos estadísticos de los Balances energéticos varía a lo largo del tiempo (IEA, 2014b). A partir de estos datos se desarrollan dos descomposiciones conforme el método del índice logarítmico medio de Divisia (Ang, 2004; Ang y Liu, 2001), la primera, relacionada con las emisiones de CO₂ con datos agregados basada en la identidad Kaya (1989), y la segunda relacionada con el consumo de energía primaria por unidad de actividad económica con información desagregada por sector económico. La primera descomposición incorpora los 4 factores utilizados habitualmente en la literatura

(carbonización, intensidad energética, PIB per cápita y población) (Martín-Vide et al., 2007) y, además, agrega dos factores (sustitución y transformación). Los resultados señalan que la intensidad energética es el factor que mejor explica el descenso de las emisiones de CO₂ y la mejora en la eficiencia energética. Los sectores que presentan cambios más favorables en la intensidad energética son: el sector transporte y el industrial. Este último destaca también por presentar un cambio estructural favorable a la eficiencia energética.

- ii) En el segundo capítulo, se investiga la relación del PIB per cápita y la composición de la energía tanto con el comportamiento de las emisiones de CO₂ per cápita como con el consumo de energía per cápita, explicando qué tipo de desvinculación existe, y se analiza la validez de la hipótesis de la CKA para estas presiones ambientales en Colombia. Asimismo, se estudia la influencia de la regulación en el control de las emisiones de CO₂. Por último, se estima la elasticidad ingreso de la energía y las emisiones de CO₂.

Para desarrollar estas cuestiones, se realiza un análisis de descomposición econométrica, basado en la estimación de dos modelos de ajuste parcial dinámicos, uno para las emisiones de CO₂ y otro para la energía, ambos para el período 1971-2011. Se utilizan datos agregados de la IEA (2014a, 2014b). A partir de los resultados obtenidos se encuentra una desvinculación absoluta entre la presión ambiental y la actividad económica. Los resultados parecen mostrar la existencia de una CKA, encontrando el punto de desvinculación para la energía en el año 2006 y para las emisiones en 2011. Al mismo tiempo, se comprueba que el uso de energías renovables ha tenido un impacto favorable en la disminución de las emisiones de CO₂. Se observa que el cambio en la composición de las fuentes energéticas ha influido favorablemente en el ahorro de la energía y, en consecuencia, ha disminuido su consumo. La elasticidad ingreso de la energía y las emisiones presenta un comportamiento con tendencia a la baja a lo largo del período llegando a cero en el punto de inflexión. Se verifica un cambio estructural en el consumo de energía per cápita a partir del año 1996.

iii) En el tercer capítulo, se identifican los sectores clave del consumo de energía, y se realiza un análisis del cambio estructural del consumo de energía primaria productiva de la industria colombiana, para dos períodos, 1996-2005 y 2005-2010. Para la estimación del cambio estructural se contó con las tablas input output de 2005 y 2010 del DANE. La tabla de 1996 se construyó con las tablas de uso y oferta del DANE, siguiendo la metodología de Naciones Unidas (1999). Esto con el fin de cubrir un período de análisis más extenso.

El análisis de cambio estructural se desarrolla aplicando una metodología poco explorada (Proops, 1988) que permite estudiar la energía con un enfoque de demanda y otro alternativo centrado sobre el uso de la energía. Los resultados con el enfoque de demanda, muestran que el componente que mejor explica el descenso en el consumo de energía es la tecnología, mientras que su incremento se explica por cambios en los niveles de demanda. Los resultados con el enfoque alternativo, reiteran la importancia del cambio técnico en la disminución del consumo energético. Mientras que la demanda y la tecnología en términos de este uso, da cuenta del aumento en el uso de la energía.

La estimación de elasticidades sectoriales, se realiza siguiendo la metodología propuesta por Alcántara y Padilla (2003), identificando como sectores clave para el desarrollo de una política de conservación energética: el transporte terrestre y los sectores de servicios.

Entre las limitaciones de la tesis, se encuentra la falta de información estadística sobre emisiones de CO₂ a nivel sectorial, y la falta de datos sobre los precios de los tipos de energía usados en el país para el período de tiempo analizado. Esta limitación impide realizar un análisis a mayor profundidad sobre las emisiones de CO₂.

Bibliografía

- Aden, N. (2016). The Roads to Decoupling: 21 Countries Are Reducing Carbon Emissions While Growing GDP. Disponible en <http://www.wri.org/blog/2016/04/roads-decoupling-21-countries-are-reducing-carbon-emissions-while-growing-gdp>
- Alcántara, V., y Roca, J. (1995). Energy and CO2 emissions in Spain : Methodology of analysis and some results for 1980 -1990. *Energy Economics*, 17(3), 221-230.
- Ang, B. W. (2004). Decomposition analysis applied to energy. *Encyclopedia of Energy*, 1, 761-769.
- Ang, B. W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 33(7), 867-871.
- Ang, B. W., y Liu, F. L. (2001). A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 26(6), 537-548.
- Correa, P. (2015). Colombia reducirá 20% sus emisiones de CO2. *Medio Ambiente*. Disponible en <http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-reducira-20-sus-emisiones-de-co2-articulo-584492>
- Daly, H. E. (1999). Steady-state economics: avoiding uneconomic growth. In J.C.J.M. van den Bergh (Ed.), *Handbook of Environmental and Resource Economics* (pp. 635-642.). Amsterdam: Edward Elgar, Chelktenham.
- De Bruyn, S. M., y Opschoor, J. B. (1997). Developments in the throughput-income relationship: theoretical and empirical observations. *Ecological Economics*, 20(3), 255-268.
- Ekins, P. (1997). The Kuznets curve for the environment and economic growth: examining the evidence. *Environment and Planning A*, 29(5), 805-830.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. MA MSc. thesis, Cambridge Harvard University Press.
- Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Hoekstra, R. (2005). *Economic Growth Material Flows and the environment. New applications of structural decomposition analysis and physical input output tables*. Cheltenham: Edward Elgar Publishers
- Hoekstra, R., y van den Bergh, J. C. J. M. (2003). Comparing structural decomposition analysis and index. *Energy Economics*, 25(1), 39-64.
- IEA -International Energy Agency. (2014a). *CO2 Emissions from fuel combustion highlights*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2014b). World Energy Balances. Documentation for beyond 2020 files Disponible en <http://www.iea.org/statistics/topics/energybalances/>.
- IEA -International Energy Agency. (2015). *Energy and climate change. World Energy Outlook Special Report*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2016). World Energy Outlook.Special Report. Energy and air pollution Disponible en https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReportEnergyandAirPollution_Executivesummary_EnglishVersion.pdf

- IPCC-Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Abu Dhabi: Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Kaya, Y. (1989). Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. Paper presented to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Intergovernmental Panel on Climate Change. París.
- Kenneth, B., y Medlock, I. (2009). Energy demand theory. In J. Evans & H. C. Lester (Eds.), *International Handbook on the Economics of Energy* (pp. 89-111). Massachusetts: Edward Elgar Publishing Limited.
- King, D., y Grey, C. (2013). Energy Harnessing: New Solutions for Sustainability and Growing Demand *World Economic Forum*. United Kingdom: University of Cambridge.
- Martín-Vide, J., LLebot, R., Padilla, E., y Alcántara, V. (2007). Actividad económica y emisiones de CO2 en España *Aspectos económicos del cambio climático en España* (pp. 42-64). Barcelona: Estudios Caixa Catalunya.
- Meadows, H. D., Meadows, L. D., y Randers, J. (1972). *The Limits to Growth*. New York: University Books.
- Medlock, K. B., y Soligo, R. (2001). Economic Development and End-Use Energy Demand. *The Energy Journal*, 22(2), 77-105.
- Miller, E. R., y Blair, D. P. (2009). *Input Output Analysis, Foundations and Extensions*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MINMINAS -Ministerio de Minas y Energía. (2007). *Plan Energético Nacional 2006-2025*. Bogotá, D.C.: UPME.
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465-484.
- Proops, J. L. R. (1988). Energy intensities, input output analysis and economic development. In M. Ciaschini (Ed.), *Input output Analysis: Current Developments* (pp. 201-215). London: Chapman and Hall.
- Rose, A. (1999). Input-Output Structural Decomposition Analysis of Energy and the Environment. In B. v. d. C. J. M. Jeroen (Ed.), *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.
- Stern, D. I. (1998). Progress on the environmental Kuznets curve. *Progress on the environmental Kuznets curve?*, 3, 173-196.
- United Nations. (1999). Handbook of input-output table compilation and analysis. Studies in Methods, Handbook of National Accounting *Serie F, No. 74 ST/ESA/STAT/SER.F/74*. New York: United Nations, Statistics Division, Department for Economic and Social Affairs
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Disponible en http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/RESUME_N_EJECUTIVO_INTEGRACION_ENERGIAS_UPME2015.pdf
- WECD -World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. New York: Oxford University Press.

Capítulo 1: Evolución del consumo de energía y las emisiones de CO₂ en Colombia

Resumen

Este capítulo tiene como propósito conocer la evolución de la generación de emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la identidad Kaya (1989), y el consumo de energía primaria total por actividad económica industrial, durante el período 1975-2010. Para lograr este objetivo, se transforma la energía final en energía primaria total siguiendo la metodología de Alcántara y Roca (1995b). Es decir, se toma en cuenta los requerimientos totales (directos e indirectos) de energía y la energía utilizada en los procesos de transformación y pérdidas. Después, a partir de una descomposición factorial, tanto de las emisiones de CO₂ como de los consumos energéticos, se opera una descomposición aditiva, en el caso del CO₂, y otra multiplicativa, para el consumo de energía, ambas basadas en el método del índice logarítmico medio de Divisia (Ang, 2004a; Ang y Liu, 2001). La investigación contribuye a la literatura existente al aplicar esta metodología al caso Colombiano, al cual no se había aplicado previamente, obteniendo información de utilidad para el análisis y el diseño de políticas energéticas y ambientales.

Los resultados señalan que el principal efecto explicativo del descenso de emisiones es la intensidad energética, y en un segundo plano el efecto carbonización. El aumento de emisiones se explica especialmente por el efecto riqueza y el efecto escala. Por otra parte, los resultados muestran que la disminución en la intensidad energética total se debe principalmente a la disminución en la intensidad energética sectorial, y, en menor medida por el cambio estructural. Se observa que el cambio estructural ocurrió entre 1993-1999, y es más dominante en algunos sectores que en otros, entre los que se destacan las ramas productivas pertenecientes al sector industrial y el sector agricultura y silvicultura.

1.1. Introducción

El consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) tienen un fuerte vínculo. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2014), en el año 2010, aproximadamente el 90% de las emisiones de CO₂, el 9% de las emisiones de metano y el 1% de las emisiones de óxido de nitrógeno están relacionadas con el consumo de energía (IEA, 2014a).

Actualmente, la producción de energía y su uso explica dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo la mayoría emisiones de CO₂ (IEA, 2016). Según las previsiones realizada por la IEA, hacia el 2040, los combustibles fósiles seguirán siendo relevantes, se estima que el suministro mundial de energía primaria, en el 2040, se dividirá en 4 partes casi iguales: petróleo, gas, carbón y fuentes bajas de emisiones de CO₂ (IEA, 2014c).

Sin embargo, esta situación se puede revertir mediante una adecuada política de eficiencia energética y una revolución tecnológica en el sector energético. Esto implica el uso de un mejor mix energético de tecnologías energéticas con baja emisión de carbono. Un elemento fundamental de este portafolio es la captura y almacenamiento de carbón, pues se espera que esta tecnología reduzca la quinta parte del total de emisiones proyectadas para el año 2050 (IEA, 2010a).

El sector industrial consume más energía que cualquier otro sector de uso final, consumiendo aproximadamente el 50% de la energía total mundial (EIA, 2010). En cifras del 2010, en Colombia el 53.5% de la energía primaria total la consume la industria, el 37.8% el transporte y el resto el sector agrícola. Durante el período 1975-2010, este consumo en la industria y el transporte creció a una tasa promedio anual de 2.37% y 1.86%. Entre las industrias, se destaca el sector de química y petroquímica con un crecimiento promedio anual de 4.25% y el sector hierro y metales no férreos con 3.52%.

De ahí que los estudios relacionados con los factores que explican las emisiones de CO₂ y el consumo de energía de los sectores económicos sean de gran relevancia, puesto que, por una parte, permiten comprender los mecanismos que generan los cambios en el comportamiento de las emisiones y la energía y, por otra parte, ayudan en la formulación de políticas ambientales, energéticas y económicas. En este momento existen numerosos estudios en esta línea de

investigación, así como sobre las distintas metodologías de descomposición que permiten identificar los factores que explican el crecimiento de las emisiones y su relación con el consumo de energía.

El análisis de la evolución de las emisiones de CO₂ y la energía en Colombia se hace necesario por varias razones: i) el control de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética es de suma importancia en la agenda internacional. El uso ineficiente de la energía puede incrementar la emisión de gases GEI contribuyendo a la intensificación del efecto invernadero y el consiguiente cambio climático; ii) la conservación y el mejoramiento de la calidad ambiental en sintonía con las tendencias mundiales es un objetivo en rigor del Plan Energético Nacional 2010-2030 (UPME, 2010); iii) el control de las emisiones puede favorecer el desempeño económico del país, generar nuevos empleos, beneficiar la agricultura, el desarrollo de tecnología, el suministro de energía e impulsar el PIB (Foundation Climate Works y Grupo Banco Mundial, 2014); iv) en la actualización de objetivos del Plan Energético Nacional del 2014 se enfatiza la importancia de la eficiencia energética, la mitigación de impactos ambientales, y la reducción de emisiones de CO₂ y sus efectos negativos sobre el clima (UPME, 2014); v) se ha dado un elevado aumento nacional de emisiones durante el período 1971–2010, que fue del 131.9%, así como de la oferta de energía primaria durante el mismo período, que fue del 133.8% (IEA, 2008a; IEA, 2008b; IEA, 2014a).

Las emisiones per cápita en el año 2010 ascienden a 1.31 t CO₂/hab; esto es, aproximadamente la mitad de las toneladas per cápita del conjunto de países de América Latina (2.34 t CO₂/hab) y la novena parte de las de los países que conforman la OCDE (10.14 t CO₂/hab). Del mismo modo, es conveniente anotar que durante el período 1971-2010, la tasa de crecimiento económico promedio anual nacional fue del 3.89%, mientras que esta la tasa de crecimiento de las emisiones de CO₂ fue del 2.13% y la del consumo de energía primaria fue del 2.15%. Es un reto importante para Colombia sostener la meta del crecimiento económico y mantener las emisiones de CO₂ y el consumo de energía bajo control.

El presente capítulo tiene como propósito conocer cómo ha sido la evolución del consumo de energía y las emisiones en Colombia durante las últimas 4 décadas. En concreto, interesa saber: ¿cuáles son los principales factores que influyen en la evolución de las emisiones de CO₂ y en

el consumo de energía primaria total³ (en adelante EP total) por unidad de actividad industrial? Para estudiar los factores que determinan la evolución de las emisiones en el período, se utiliza la metodología de descomposición aditiva basada en el enfoque de la identidad de Kaya (Bruce et al., 1996; Goldemberg et al., 1996; Kaya, 1989) y para el análisis de la evolución del consumo de energía por actividad/sector industrial se realiza una descomposición multiplicativa sectorial (Ang et al., 2009). Previamente a la estimación de la descomposición del consumo de energía se transforma la energía final en EP total mediante la aplicación del modelo de Leontief (Alcántara y Roca, 1995b).

El presente trabajo se diferencia de trabajos similares en que es la primera aplicación que se desarrolla para Colombia. Según la revisión realizada existen estudios de descomposición para Chile, Brasil y México, por lo que el trabajo cubre el vacío que hay en la literatura referente a los estudios de descomposición de la energía en países subdesarrollados como Colombia. Además, desde el punto de vista metodológico, el elemento novedoso está en que la descomposición del consumo de energía se desarrolla teniendo en cuenta el consumo de EP total industrial a nivel sectorial. Esto significa que se tiene en cuenta las pérdidas por distribución y transformación.

Tras esta introducción, el capítulo 1 se organiza como sigue: la sección 2 presenta un marco de referencia conceptual y empírico sobre los análisis de descomposición energética y las emisiones. La sección 3 describe la metodología, el origen de los datos y la estructura de los mismos. La sección 4 muestra el análisis de resultados y la evidencia empírica para Colombia. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones y los anexos.

³ En el presente trabajo, la expresión energía primaria total hace referencia a la estimación de la energía primaria necesaria para la obtención de la energía final, mediante el uso del modelo de Leontief siguiendo la propuesta de estimación inicialmente desarrollada por Alcántara y Roca (1995).

1.2. Marco de referencia

1.2.1. Marco de referencia conceptual

El sector de la energía está constituido por industrias que tienen sus propias características, que requieren especial atención, pues tienden a ser muy técnicas, y se necesita la comprensión de sus procesos y técnicas para un buen entendimiento de las cuestiones económicas. Además, el sector está influenciado por interacciones de diferentes niveles: internacionales, nacionales, regionales y locales (Fouquet, 2009; Weyman-Jones, 2009).

En consecuencia, para analizar la energía es importante un enfoque interdisciplinario donde participen investigadores, analistas y responsables de la formulación de políticas de diversos campos. De ahí que diferentes estudios relacionados con ingeniería de procesos, auditoría energética y análisis de todas las industrias de la energía, hayan tenido una profunda influencia en la comprensión de los mecanismos de cambio de uso de la energía industrial y sus implicaciones ambientales (Ang, 1999; Ang, 2004a).

El análisis de la energía desde la perspectiva económica se ha realizado desde hace un siglo. Sin embargo, la economía de la energía se desarrolló como un área especializada en este campo a partir de la crisis del petróleo de los 70's. En concreto, después de la crisis del petróleo de 1974 y 1975, debido al incremento excesivo de los precios del petróleo, que resaltaron la importancia de la energía en el desarrollo de las actividades económicas de un país, pues una insuficiente disponibilidad dificulta el crecimiento económico y disminuye el nivel de vida de los habitantes de una región.

Los hechos enfrentados en los 70's focalizaron la atención en la comprensión del cambio en la industria energética (especialmente la industria del petróleo), la sustitución de energías y la importancia en la extensión hacia energías renovables. Por otra parte, también se hizo énfasis en la relevancia de una planificación integrada de los sistemas energéticos especialmente en los países en desarrollo (United Nations, 1991).

Los trabajos de investigación sobre energía se extendieron en la década de los 80's y se han incrementado en las últimas dos décadas, haciendo énfasis en la relación energía, economía y medio ambiente. Las principales áreas de aplicación de los estudios son: la oferta y demanda de energía, la energía relacionada con las emisiones de gas, los flujos materiales y desmaterialización, las tendencias de la eficiencia energética y los estudios comparados entre países (Ang, 2004b; Ang y Zhang, 2000; Ang et al., 1998; Daly, 1990; Farla y Blok, 2000; Zhang et al., 2009).

La preocupación ambiental por el uso de la energía y el desarrollo económico trajo nuevos desafíos y, en consecuencia, un cambio importante en el enfoque de los estudios de energía, convirtiendo el análisis de los efectos del consumo de la energía sobre el medio ambiente (local, regional y global) en una parte fundamental del análisis.

Un enfoque intuitivo utilizado para realizar el análisis del comportamiento histórico y las tendencias futuras de la relación entre energía y emisiones, es la identidad de Kaya, que describe la relación entre los factores que influyen en las tendencias de las emisiones. Ésta se define como una identidad de tipo $I \equiv PAT$, donde I hace referencia a la presión ambiental, que en la identidad de Kaya son las emisiones totales de CO₂, P es la población o número de individuos de un lugar, A señala la afluencia de bienes y servicios que se aproxima habitualmente con el PIB per cápita, y T, que en la formulación inicial hace referencia a la tecnología, se mide en la identidad de Kaya como la intensidad de emisión de la energía multiplicada por la intensidad de energía de la producción. En términos de la expresión (3.1) sería $\frac{C}{E} * \frac{E}{PIB}$; es decir, la proporción de emisiones por unidad de PIB⁴. Para los responsables de la formulación de políticas, los componentes más importantes son la intensidad energética de la producción y la intensidad de emisiones de la energía (EIA, 2010; Roca, 2002).

⁴La identidad $I \equiv PAT$ fue planteada con tecnología constante por Ehrlich y Holdren (1972; 1971), los autores hacen hincapié en el tamaño y crecimiento de la población. Simultáneamente, Commoner et al. (1971a, 1971b) plantean la identidad IPAT como es reconocida actualmente.

Como se dijo anteriormente, una de las áreas de aplicación de la investigación es la oferta y demanda de energía. Dentro de esta línea se encuentran los estudios aplicados al sector industrial, pues la energía es clave para el desarrollo de la industria de un país.

El sector industrial está formado por un conjunto diverso de actividades que incluyen manufactura, agricultura, minerales no metálicos, química y petroquímica, minería, construcción, transporte, textiles, etc. La demanda industrial de energía varía entre los sectores que la conforman, las regiones y los países, dependiendo del nivel y la combinación de las actividades económicas y el desarrollo tecnológico, entre otros factores. La energía es consumida en el sector industrial para una amplia gama de actividades, tales como el procesamiento y el montaje, el acondicionamiento del espacio y la iluminación. El uso industrial de energía incluye gas natural, electricidad, carbón, productos del carbón, combustibles renovables y productos derivados del petróleo utilizados como materias primas para producir los productos no energéticos (desde productos de plástico hasta ropa de poliéster). Por estas características, el sector industrial consume más energía que cualquier otro sector de uso final y es el más alto generador de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía.

Una forma de reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ es mediante la mejora en la eficiencia energética⁵ (IEA, 2007; IEA, 2014a; Saunders, 2009). Las definiciones sobre el concepto de eficiencia energética están relacionadas con la forma de usar o transformar la energía. En general, los conceptos tienen en cuenta dos variables relacionadas entre sí, los productos (bienes o servicios) y la energía necesaria para su producción. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014), la eficiencia energética consiste en limitar o reducir el consumo de energía mediante la utilización de dispositivos más eficientes (por ejemplo, uso de bombillas fluorescentes compactas en lugar de las bombillas incandescentes). Hay mayor

⁵ Hay una discusión en torno a la forma como la economía responde a las mejoras en la eficiencia energética. Un incremento de la eficiencia energética reduce los precios de los productos o servicios que ahora necesitan menos energía para su obtención, lo que trae, como consecuencia, un cambio en las preferencias de los consumidores reflejándose en dos efectos (el efecto ingreso y el efecto sustitución) que tienden a mitigar el ahorro energético. Esta mitigación es llamada efecto rebote. En algunos casos, el efecto rebote podría incluso compensar completamente el ahorro energético inicial, dándose un resultado opuesto a lo inicialmente esperado (Saunders, 2009).

eficiencia energética si se ofrecen más productos o servicios por la misma cantidad de energía, o los mismos servicios o productos por menos cantidad de energía. Frecuentemente, se utiliza la intensidad energética como una proxy de la eficiencia energética. Sin embargo, algunos resultados de eficiencia pueden ser enmascarados por la variación de factores no relacionados con la energía, tales como: la estructura de la economía, el tipo de base de la industria, el tipo de cambio, la asequibilidad de los servicios de energía, la cantidad de usuarios o población, y el comportamiento del clima (IEA, 2014).

Como se mencionó antes, el sector industrial es el mayor consumidor de energía, por lo que mejorar la eficiencia es clave para la reducción del consumo energético y las emisiones, pues casi un tercio del consumo de energía del mundo y el 36% de las emisiones de CO₂ son atribuibles a las industrias manufactureras (IEA, 2007).⁶ Las materias primas de grandes industrias - química, petroquímica, hierro y acero, cemento, papel y pulpa, y otros minerales y metales - representan más de dos tercios de esta cantidad. En general, el uso de la energía industrial ha crecido en un 61% entre 1971 y 2004, aunque con una creciente demanda de energía en los países en desarrollo y el estancamiento de la demanda de energía en los países de la OCDE. La cuota de las energías industriales utilizadas para la producción de materias primas ha sido bastante estable durante los últimos treinta años, pero las acciones de los subsectores han cambiado de manera significativa (IEA, 2007).

Para comprender los cambios que se generan en la industria, investigadores y analistas estudian desde los años ochenta los factores que contribuyen al cambio en la *intensidad energética de la industria*; entendiendo esto como un indicador agregado para el conjunto de todas las actividades industriales, y definido como el uso total de energía final de la industria de un país dividido por el total de la producción industrial. Se han llevado a cabo varios estudios comparativos entre países industrializados analizando y comparando su intensidad energética, y aquellos países que presentan una menor intensidad energética se consideran más eficientes.

En los estudios realizados sobre el cambio en la intensidad energética se han identificado dos factores, denominados: cambio estructural y cambio en la intensidad energética sectorial. Al

⁶ Se excluyen actividades industriales relacionadas con la minería y el sector transporte.

saber sobre la importancia de estos factores se hizo necesario identificar y cuantificar su impacto para ayudar en la formulación de políticas, lo cual se realizó mediante el desarrollo y aplicación de las metodologías de análisis de descomposición de la intensidad energética.

La intensidad energética es producto tanto de la eficiencia en el proceso de fabricación como en la composición de productos que están siendo producidos. Conforme avanza el tiempo, nuevos productos (por ejemplo, computadores personales, libros electrónicos, teléfonos inteligentes) están disponibles y sustituyen la tecnología anterior (máquinas de escribir, fonógrafos, etc.). El análisis de cambio estructural identifica este cambio en la demanda y el impacto que tiene sobre los establecimientos de fabricación (por ejemplo, el consumo de energía por establecimiento o el cambio de grandes grupos de actividades en respuesta a un aumento o disminución de la demanda de productos).

Por otro lado, los fabricantes producen unidades físicas de productos o servicios para los usuarios finales u otros fabricantes. El productor está interesado en consumir el mínimo de insumos posible para realizar su producción. En concreto, si los requerimientos de energía se reducen con respecto a la producción, entonces, cada unidad de producto es menos intensiva en energía; lo que significa una mejora en la eficiencia energética. De ahí, la importancia de identificar y cuantificar el cambio estructural y el cambio en la intensidad energética sectorial en relación con la intensidad energética total.

1.2.2. Marco de referencia empírico

Existen numerosos estudios que han hecho un esfuerzo por determinar y cuantificar los principales factores que explican la evolución de gases contaminantes y el consumo energético mediante el análisis de descomposición. Huntington y Myers (1987), realizaron una revisión bibliográfica de 8 estudios sobre el análisis de descomposición de la intensidad energética y Ang y Zhang (2000) referenciaron 124 estudios relacionados con este tema. En general, estos estudios se centraron en la demanda de energía industrial de las economías asiáticas (Taiwán, Singapur y China) y la estadounidense. Liu y Ang (2007) examinaron 70 estudios sobre consumo de energía y/o intensidad energética que corresponden a 335 ejercicios de

descomposición para el período 1976–2005. De la misma manera, más recientemente, se ha desarrollado una amplia literatura referida a sustancias contaminantes. En esta sección se presenta una revisión de los estudios más relevantes sobre la técnica de descomposición aplicada a sustancias contaminantes y la intensidad de la energía. En concreto, se recogen 19 estudios que utilizaron distintas metodologías para analizar la relación entre actividad económica, energía y calidad ambiental mediante un conjunto de indicadores ambientales (Ver anexo 1A.1). En los estudios se utilizan datos de corte transversal y longitudinal para distintas regiones y/o países y se analizan distintas dimensiones de la calidad del medio ambiente que interaccionan (afecta y/o es afectada) con la economía, la población y los recursos naturales. En varios trabajos se mencionan la dificultad para comparar los datos y la calidad de la información, pues no siempre se tienen secuencias cronológicas completas para todas las zonas, y varían las unidades de medición, excepto en el caso de los estudios realizados para EEUU que no reportan esta particularidad.

En los trabajos se hace un esfuerzo por separar, a lo largo del tiempo, los componentes que están detrás de la energía y/o las emisiones con el fin de identificar y cuantificar los factores que generan los cambios en cada región y/o país. Algunos trabajos realizan análisis comparativos entre diferentes regiones que pertenecen a la OCDE, Europa, Asia, Norte América, Latinoamérica, Ex-Unión Soviética y algunos países como China, España, Estados Unidos, Francia, Hungría, India, Polonia, Reino Unido y Turquía.

La descomposición se desarrolla básicamente para conocer el comportamiento de las emisiones (especialmente de CO₂), intensidad energética y el consumo de la energía. Los efectos más utilizados para el análisis de las emisiones son efecto actividad económica, efecto intensidad energética, efecto estructura, efecto sustitución de combustibles, efecto composición y efecto total. En algunos casos se desglosan los efectos a nivel de industria, sectores y subsectores. En el caso de la energía, el análisis comprende el efecto actividad, efecto intensidad, efecto estructura, efecto sustitución y efecto total. Sólo uno de los estudios revisados considera un modelo insumo-producto de la energía donde se considera el efecto consumo de energía final, efecto transformación, efecto sustitución y una interacción (Alcántara y Roca, 1995b). Las

denominaciones asignadas a los efectos varían según el autor, el tipo de datos y la región analizada (ver anexo 1A.1).

La descomposición se realiza de forma multiplicativa y aditiva utilizando diferentes índices, a saber: índice Laspeyres (LM), índice Laspeyres refinado (RLM), índice Divisia de media logarítmica (LMDI), índice Divisia de media aritmética (AMDI), índice de Divisia convencional, etc. (Alcántara y Roca, 1995b; Ang y Zhang, 1999; Choi y Ang, 2003; Diakoulaki y Mandaraka, 2007; Farla y Blok, 2000; Hatzigeorgiou et al., 2008; Ma y Stern, 2006; Paul y Bhattacharya, 2004; Sun, 1998; Viguié, 1999; Wang et al., 2005; Zhang y Ang, 2001). En varios estudios se mencionan las virtudes/carencias de los diferentes métodos de descomposición, por lo que en la sección metodológica (3) se realiza una breve reseña sobre la evolución de los métodos más utilizados. En este sentido, Zhang y Ang (2001), señalan que los métodos de descomposición convencionales no son efectivos para estudios transversales (de regiones o países) debido a que se obtiene un componente residual grande.

Cada estudio presenta sus hallazgos particulares, según el período de tiempo analizado, la información disponible, la desagregación de los datos, las características de la región, y el tipo de índice de descomposición estimado. No obstante, una característica observada, en los países desarrollados, es que la intensidad energética y el PIB per cápita son factores que influyen de forma significativa en el comportamiento de las emisiones. La cuantía varía según el período analizado.

Otra característica relevante de la literatura revisada es la frecuencia con la cual se utiliza los factores que componen la identidad de Kaya, desglosada a cuatro componentes (efecto carbonización, efecto intensidad energética, efecto riqueza y efecto escala), aunque varía el nombre asignado a cada uno de los factores (Alcántara y Padilla, 2005; Kawase et al., 2006; Lise, 2006; Martín-Vide et al., 2007; Zhang et al., 2009).

Adicionalmente, en algunos estudios donde se usa esta identidad, se desarrolla la descomposición también a nivel de sectores económicos (industria, transporte, agrícola, otros sectores, etc.), lo que permite tener una mejor explicación de lo que sucede con el

comportamiento de las emisiones (Lise, 2006; Martín-Vide et al., 2007; Paul y Bhattacharya, 2004; Viguier, 1999; Zhang y Ang, 2001; Zhang et al., 2009).

La IEA anualmente publica algunos datos globales agregados por región y por país relacionados con la identidad de Kaya (EIA, 2010; IEA, 2014). Es decir, que se estiman algunos indicadores agregados básicos que componen la identidad, lo que permite tener una idea general sobre la situación de los diferentes países. Sin embargo, los datos descriptivos impiden deducir conclusiones definitivas sobre un país y su evolución. A diferencia de otros estudios anteriores (Alcántara y Padilla, 2005; Ang et al., 2003; Duro y Padilla, 2006; Hatzigeorgiou et al., 2008; Lin y Long, 2014; Sun, 1998; Zhang y Ang, 2001; Zhang et al., 2009), el presente trabajo realiza un análisis de la variable ambiental desagregando la identidad de Kaya (1989) a seis factores. Se trata de un estudio integral, profundo y longitudinal para las últimas décadas. El análisis de un período tan largo permite explorar mejor los efectos sobre el comportamiento de la variable ambiental, en este caso de las emisiones de CO₂. Se emplea el índice de la media logarítmica utilizado en otros estudios, aplicados a varios países como una herramienta óptima para realizar este tipo de mediciones. Esta metodología utiliza energía primaria, en lugar de energía final, siendo la EP más precisa en cuanto al consumo total de energía. Para ello, se desarrolla la aplicación del modelo IO de Leontief que permite estimar la EP total requerida, desagregada sectorialmente, incluyendo las pérdidas por transformación y distribución. El trabajo se complementa con una descomposición multiplicativa logarítmica de la intensidad energética, principal factor influyente en el descenso de las emisiones y la mejora en la eficiencia energética del país. La descomposición multiplicativa permite realizar un análisis más especializado, a nivel sectorial, desde la perspectiva de un índice, en términos porcentuales y sin recurrir a unidades de medida; logrando de este modo un análisis más fino, de fácil comprensión y siguiendo un enfoque sugerido en la literatura para estos propósitos (Ang y Zhang, 2000; Baležentis et al., 2011). Además, se trabaja con datos del VA constantes encadenados con una base móvil actualizada al período de referencia; pues los precios corrientes, aunque muestran toda la dinámica de la economía, no descuentan el efecto de la inflación, y una disminución en

la intensidad puede ser resultado de un aumento en los precios⁷. Un trabajo con estas características no se ha elaborado para Colombia hasta el momento.

1.3. Métodos y Datos

1.3.1. Métodos

Los métodos de descomposición más reconocidos en la literatura que pueden ser usados en el análisis de descomposición de la energía y algunos indicadores ambientales, son: i) el análisis de descomposición estructural, basado en el modelo insumo-producto (input-output)⁸ y ii) el análisis de descomposición basado en los métodos relacionados con el índice de Laspeyres y los métodos vinculados con el índice de Divisia (Ang, 2004b, 2005; Ang et al., 2009; Ang y Zhang, 2000; Chung y Rhee, 2001; Liao et al., 2007). Estos últimos presentan varias extensiones y refinamientos.

Los métodos relacionados con el índice de Laspeyres, se usaron especialmente a finales de los 70`s y en la década de los 80`s, mientras que los métodos basados en el índice de Divisia (Divisia, 1925), empezaron a ser utilizados desde comienzos de la década de los 90`s con una acogida creciente.

Ang y Zhang (2000) expresan con claridad que antes de 1995 los análisis de descomposición se caracterizaban por ser imperfectos, puesto que la descomposición tenía un término residual (componente no explicado). Este residual es especialmente importante en el caso del índice de Laspeyres. Luego como alternativa a este índice, surge la descomposición mediante el índice de Divisia de la media aritmética, que se caracterizaba por tener la desventaja de arrojar un término residual y la dificultad de operar con el valor cero⁹. Posteriormente (hacia 1997), se llevó a cabo la descomposición mediante el índice de Divisia multiplicativo (en términos de índice) y el

⁷ Los precios contantes con un período de base fija no pueden capturar adecuadamente los cambios ocurridos en las preferencias, patrones de compra, cambios tecnológicos, y de las propiedades de los bienes.

⁸ Este modelo será objeto de análisis en profundidad en el capítulo 3 de la presente investigación.

⁹ Se refiere a los problemas computacionales que se generan al calcular el logaritmo de cero en las bases de datos que contienen este valor. Ang y Liu (2001) citando el trabajo de Ang y Choi (1997), señalan que el procedimiento para remediar este inconveniente consiste en reemplazar el valor cero por un número muy pequeño.

análisis de descomposición aditivo¹⁰ (en términos de una unidad de medida) usando la media logarítmica planteada por Tornqvist et al. (1985). Ang y Liu (2001) muestran que la técnica que usa la función de la media logarítmica no tiene las desventajas mencionadas y realizan en su estudio la prueba de la descomposición perfecta.

En la selección del método, generalmente, el investigador o analista tiene en cuenta cuatro criterios: i) fundamentación teórica, ii) adaptabilidad del método, iii) facilidad de uso y aplicación y iv) facilidad de comprensión y presentación de resultados. En la fundamentación teórica algunos métodos son superiores a otros. Esto varía según las propiedades que cumpla. Una revisión de estos aspectos se presenta en Ang et al. (2009) y Ang y Zhang (2000). Valga anotar que la sencillez y facilidad de uso son una consideración importante.

Hasta finales de la década de los 90`s no había consenso sobre cuál era el mejor método de índice de descomposición. Sin embargo, en la actualidad, numerosos investigadores y analistas de organismos nacionales e internacionales se decantan por los métodos derivados del índice de Divisia; en particular, por el método del índice de Divisia de la media logarítmica, pues esta descomposición resuelve el problema del cero y arroja una descomposición perfecta (Ang y Liu, 2001). La razón fundamental de esta acogida se debe a que cumple varias de las propiedades deseables de un buen número índice como: la propiedad de identidad, de reversibilidad¹¹ (de factor y de tiempo), de proporcionalidad y la prueba de agregación (es consistente en agregación). Además, los resultados de la versión multiplicativa y aditiva están vinculados de forma simple y única, lo que permite convertir los resultados de una versión a otra fácilmente (Ang, 2004b; Ang y Liu, 2001; Ang y Zhang, 2000).

Actualmente, el método de descomposición de Divisia de la media logarítmica aplicado a la identidad Kaya, al consumo la energía y la intensidad de la energía, se presenta en publicaciones oficiales de Nueva Zelanda (EECA, 2009), Estados Unidos (EERE, 2011) y Canadá (OEE, 2006). La IEA usa el índice de Laspeyres refinado, este método obtiene resultados similares al

¹⁰Para una descripción detallada de los métodos ver (Ang, 2005; Ang et al., 1998; Liu y Ang, 2003).

¹¹ Similar a la descomposición del valor donde el producto del índice de precios y el índice de cantidades es igual al índice de valor.

de Divisia porque distribuye el componente residual de forma proporcional entre los factores de la descomposición (Ang y Liu, 2007a; Howarth et al., 1991; IAEA, 2005b; IEA, 2004).

La metodología del presente estudio utiliza las técnicas de análisis de descomposición aditiva y multiplicativa del índice de Divisia de la media logarítmica porque arroja una descomposición perfecta; es decir, que el componente residual es cero. La descomposición aditiva se utiliza para descomponer las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de energía primaria. La descomposición multiplicativa se usa para descomponer la intensidad energética (consumo de energía por unidad de actividad económica). Esta última se pudo aplicar porque se contaba con datos del consumo de energía a nivel sectorial.

1.3.1.1. Metodología de descomposición aditiva

La descomposición aditiva utiliza las siguientes variables, definidas así: C representa las emisiones sectoriales de CO₂, E comprende los requerimientos totales de energía primaria, P indica la población y, por último, PIB señala el producto interno bruto (ingreso o renta) en dólares del año 2005.

Como se mencionó anteriormente, la descomposición aditiva basada en el enfoque de la identidad de Kaya se usa para analizar la variación de las emisiones de CO₂ (Ang y Zhang, 1999; Kawase et al., 2006; Kaya, 1989; Wang et al., 2005). Ésta se fundamenta en la relación de cuatro factores (emisiones de CO₂, energía, PIB y población).

$$(1.1) \quad C_{(t)} \equiv \frac{C_{(t)}}{E_{(t)}} * \frac{E_{(t)}}{PIB_{(t)}} * \frac{PIB_{(t)}}{P_{(t)}} * P_{(t)}$$

$$C_t \quad a_t \quad b_t \quad d_t \quad P_t$$

Como se puede observar la identidad de Kaya puede ser ampliada a otros factores siempre que se mantenga la identidad y sean pertinentes para el análisis. En este caso, relaciona a cuatro componentes: el primer elemento es un factor de carbonización $a_t = \frac{C_{(t)}}{E_{(t)}}$, esto es CO₂ emitido

por unidad de energía consumida. Este factor generalmente se relaciona con la combinación de distintas fuentes energéticas que se utilizan en un país. El segundo elemento se corresponde con la intensidad energética $b_t = \frac{E_{(t)}}{PIB_{(t)}}$, es decir la cantidad de EP consumida por unidad de PIB.

El siguiente elemento muestra la afluencia de bienes a la sociedad $d_t = \frac{PIB_{(t)}}{P_{(t)}}$, o sea el producto interno bruto per cápita o ingreso per cápita (efecto riqueza), y por último, la población es un factor de escala (Alcántara y Padilla, 2005; Lise, 2006; (Martín-Vide et al., 2007; Roca y Padilla, 2003; Wang et al., 2005).

Para lograr una mejor explicación de la evolución de las emisiones en Colombia se agregan unos factores que tienen en cuenta el peso de las fuentes energéticas y su intensidad de uso. Estos elementos se incorporan siguiendo el estudio desarrollado por Martín-Vide et al., (2007), que descompone la intensidad energética en tres elementos adicionales que permiten conocer con mayor detalle la influencia de la estructura de combustibles, de los procesos de transformación del sector energético y del consumo de la energía final en la generación de emisiones. Estos nuevos elementos son: $s_t = \frac{EFO_{(t)}}{EP_{(t)}}$, indica la cantidad de energía fósil consumida por unidad de

EP y describe la composición de los consumos de energía (la variación asociada a cambios en este factor se identificará como efecto sustitución), $t_t = \frac{EP_{(t)}}{EF_{(t)}}$, señala la cantidad de EP consumida por unidad de energía final y da cuenta de la eficiencia del cambio técnico en el sector energético (dando lugar al efecto transformación), $e_t = \frac{EF_{(t)}}{PIB_{(t)}}$, revela la cantidad de

energía final consumida por unidad de producto e indica la eficacia aparente con la cual los agentes públicos y privados usan la energía (efecto eficiencia). Este elemento está vinculado con la estructura sectorial del PIB, el modelo de transporte, y la evolución de las tecnologías aplicadas en la producción y los servicios. La relevancia de este indicador estriba en que un aumento del consumo de energía final por unidad de PIB se traduce en mayores costes además de una mayor presión sobre los recursos naturales y mayores consecuencias sobre el medio ambiente. La incorporación de estos nuevos elementos mencionados conlleva que se modifique el primer elemento de la ecuación referido al efecto carbonización, pues ahora éste estará

determinado por una relación más precisa $m_t = \frac{C_{(t)}}{EFO_{(t)}}$ esto es, CO₂ emitido por unidad de energía fósil consumida; es así como los cambios relacionados con la composición de los combustibles fósiles estarán comprendidos en este elemento.

Ahora la expresión (1.2) se puede presentar de la siguiente forma:

$$(1.2) \quad C_{(t)} \equiv \frac{C_{(t)}}{EFO_{(t)}} * \frac{EFO_{(t)}}{EP_{(t)}} * \frac{EP_{(t)}}{EF_{(t)}} * \frac{EF_{(t)}}{PIB_{(t)}} * \frac{PIB_{(t)}}{P_{(t)}} * P_{(t)}$$

$$C_t \quad \underbrace{\quad}_{m_t} \quad \underbrace{\quad}_{s_t} \quad t_t \quad e_t \quad d_t \quad p_t$$

La diferencia en los niveles de emisiones entre dos años se puede expresar así:

$$(1.3) \quad \Delta C_t = C_t - C_0 = m_t * s_t * t_t * e_t * d_t * p_t - m_0 * s_0 * t_0 * e_0 * d_0 * p_0$$

De donde se obtiene la variación experimentada por las emisiones de CO₂ denominada efecto total, el cual se explica por las variaciones asociadas a los diferentes factores considerados: efecto carbonización, efecto sustitución, efecto transformación, el efecto intensidad energética, el efecto afluencia y el efecto poblacional.

$$(1.4) \quad \Delta C_t = C_t - C_0 = \Delta C_{m\text{-efecto}} + \Delta C_{s\text{-efecto}} + \Delta C_{t\text{-efecto}} + \Delta C_{e\text{-efecto}} + \Delta C_{d\text{-efecto}} + \Delta C_{p\text{-efecto}}$$

Adicionalmente, la ecuación anterior se puede descomponer mediante el uso de la media logarítmica, compuesta por los números positivos x y y (Carlson, 1972; Tornqvist et al., 1985), definida así:

$$(1.5) \quad L(x, y) = \frac{y-x}{\ln\left(\frac{y}{x}\right)}, \text{ para } x \neq y \quad L(x, x) = x, \text{ para } x = y$$

Como señalan Tornqvist, et al., (1985), L es simétrica y homogénea en x e y , y continua cuando $x = y$. Cabe anotar que L separa la media aritmética y la media geométrica

$$\sqrt{xy} < L(x, y) < \frac{1}{2}(x + y), \text{ si } x \neq y.$$

Donde

$$L(C_t, C_0) = \frac{C_t - C_0}{\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)}$$

$$(1.6) \quad \begin{aligned} \Delta C_{m\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(m_t / m_0) \\ \Delta C_{s\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(s_t / s_0) \\ \Delta C_{t\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(t_t / t_0) \\ \Delta C_{e\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(e_t / e_0) \\ \Delta C_{d\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(d_t / d_0) \\ \Delta C_{p\text{-efecto}} &= L(C_t, C_0) \ln(p_t / p_0) \end{aligned}$$

Las ecuaciones (1.6) cada una definen un vector, y señalan la variación anual en las emisiones de CO₂, según la contribución parcial de cada efecto al crecimiento global de CO₂ en relación con el año base (Ang y Zhang, 1999).

Para comprobar la descomposición realizada anteriormente, estimamos el incremento anual del total de emisiones de CO₂, según cada componente de la identidad de Kaya y se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
(1.7) \quad \Delta C_t &= L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{m_t}{m_0}\right) + L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{s_t}{s_0}\right) + \\
&L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{t_t}{t_0}\right) + L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{e_t}{e_0}\right) + \\
&L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{d_t}{d_0}\right) + L(C_t, C_0) \ln\left(\frac{p_t}{p_0}\right)
\end{aligned}$$

Se verifica la correcta descomposición al comprobar que los datos obtenidos en las expresiones (1.4) y (1.7) son iguales.

La descomposición aditiva cumple las propiedades deseables de este tipo de descomposición (continua, simétrica y homogénea) y es consistente en la agregación (Ang y Liu, 2001; Ang y Liu, 2007b, 2007c; Ang y Zhang, 1999; Ang et al., 1998).

1.3.1.2. Metodología de descomposición multiplicativa

La descomposición multiplicativa se considera en la literatura como el método más idóneo para el análisis sectorial del ratio de la intensidad energética agregada, definida en este caso, como el cociente entre el consumo de EP total y el valor agregado total industrial (Ang, 1995, 2004a). El método permite realizar un análisis más específico a nivel sectorial, donde todos los términos están dados en índices, cuantificando de forma más precisa los cambios relativos de un año a otro.

La descomposición multiplicativa utiliza las siguientes variables, definidas así: E_t consumo total de energía industrial, E_{it} consumo de energía industrial en el sector i en el período t (en toneladas equivalentes de petróleo), VA valor agregado industrial total (en millones de pesos colombianos del año 2000), VA_{it} , valor agregado industrial en el sector i en el período t (en millones de pesos colombianos a precios constantes del año 2000).

De la misma forma, como lo presentan varios autores (Ang et al., 2009; Ang y Lee, 1994; Ang y Zhang, 2000; Liao et al., 2007; Liu y Ang, 2003), la intensidad de energía industrial agregada se puede expresar en términos de la estructura de producción y la intensidad de energía sectorial.

$$(1.8) \quad I_t = \sum_i S_{i,t} I_{i,t}$$

El primer componente $I_t = \frac{E_t}{VA_t}$ indica la intensidad de energía industrial agregada en el período t, el segundo componente referido a la estructura de producción $S_{i,t} = \frac{VA_{i,t}}{VA}$, señala la proporción de VA del sector i del total industrial, en el período t, y el tercer componente $I_{i,t} = \frac{E_{i,t}}{VA_{i,t}}$ muestra la intensidad de energía del sector i en el período t. Se supone que la intensidad energética agregada varía del período 0 al período t, evidenciando un cambio relativo¹² de la intensidad de energía industrial agregada, que puede ser expresado, así:

$$(1.9) \quad \frac{I_t}{I_0} = \exp \left(\underbrace{\sum \frac{L(C_{it}, C_{i0})}{L(C_t, C_0)} \ln \left(\frac{S_{it}}{S_0} \right)}_{D_{str}} \right) + \exp \left(\underbrace{\sum \frac{L(C_{it}, C_{i0})}{L(C_t, C_0)} \ln \left(\frac{I_{it}}{I_0} \right)}_{D_{int}} \right)$$

Donde

$$\frac{L(C_{it}, C_{i0})}{L(C_t, C_0)} = \frac{\frac{C_{it} - C_{i0}}{\ln \left(\frac{C_{it}}{C_{i0}} \right)}}{\frac{C_t - C_0}{\ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right)}}$$

Esto es, en términos de índices que se relacionan multiplicativamente¹³ y puede ser descompuesto en el efecto estructura D_{str} y el efecto eficiencia D_{int} , que dan el impacto estimado del cambio estructural y la intensidad sectorial. El cambio estructural está asociado con una

¹² Otra forma expresar el cambio de la intensidad de energía industrial agregada, es en términos absolutos, y se puede descomponer en: el efecto estructura y el efecto eficiencia $\Delta I_{tot} = I_T - I_0 = \Delta I_{str} + \Delta I_{int}$.

¹³ El concepto es similar a la aplicación de números índices económicos, al estudiar la contribución del precio y la cantidad al nivel del cambio en el consumo del producto total.

variación en las tasas de crecimiento entre los sectores, que conducen al cambio en la composición de los productos. El cambio en la intensidad energética es determinado por cambios en la intensidad energética de los sectores industriales, y se refiere a la cantidad de energía usada por unidad de producto o actividad, medida a nivel sectorial o a nivel de actividad (Ang, 2004a).

En el caso de la descomposición multiplicativa todos los términos están dados en índices, mientras que, en el caso de la descomposición aditiva, éstos tienen la misma unidad de medida.

La técnica explicada anteriormente también puede ser aplicada para descomponer el consumo de energía industrial, sólo que en este caso se adiciona un componente nuevo (VA), y se expresa así:

$$(1.10) \quad E_t = \sum_i VA_i S_{i,t} I_{i,t}$$

El inconveniente de usar la nueva variable (VA en términos absolutos) es que su efecto puede ser tan grande que absorbe el resto de los efectos (efecto estructura y efecto intensidad).

El indicador de intensidad energética es una medida relativamente fácil de comparar (entre países, regiones o sectores) en tanto exista la disponibilidad de datos. Sin embargo, la interpretación puede ser complicada por las diferencias entre los productos dentro de una categoría, por sus características y por el tiempo de utilización. A nivel sectorial puede darse el caso de sectores que compren insumos intensivos energía y/o vendan materias primas para otros sectores, lo que conlleva un mayor o menor consumo de energía de forma indirecta.

1.3.1.3. Metodología para la estimación de la energía primaria total sectorial

Los datos de la EP total sectorial usados en la descomposición multiplicativa se estimaron a partir de la transformación de los balances energéticos en un cuadro de entradas y salidas para

aplicar el modelo input-output de Leontief, siguiendo la metodología utilizada por Alcántara y Roca (1995) y Roca et al. (2007). El procedimiento desarrollado por los autores se basa en la redefinición de los balances energéticos de forma semejante a un modelo input-output, y tiene como propósito convertir la energía final en EP total sectorial (ver anexo 1A.2¹⁴). Este proceso se aplica para el período 1971–2010.

1.3.2 Datos y descripción

Para la realización del estudio se usaron datos estadísticos de requerimientos totales de EP y consumo de energía primaria total sectorial, medida en millones de toneladas equivalentes de petróleo, las emisiones de CO₂ medidas en millones de toneladas, la población en millones de habitantes, y el PIB en billones de dólares del año 2005, en valores de paridad de poder adquisitivo, los cuales fueron tomados de la base de datos de la OCDE,¹⁵ específicamente los publicados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2007; IEA, 2008b; 2012a, 2012b); la información sobre energías renovables medida en teracalorías (Tcal), se tomó de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); los datos sobre instalaciones domiciliarias de gas y vehículos gasificados se adquirió del Ministerio de Minas y Energía (MINAE); y los datos del VA total y sectorial se toman de las cuentas nacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

1.3.2.1. Tratamiento para la agrupación de datos

La aplicación del método de descomposición multiplicativa para estimar el índice de intensidad energética, requiere que exista correspondencia entre la clasificación de las actividades económicas de los balances energéticos y las del sistema de cuentas nacionales de Colombia con la ayuda de la clasificación industrial internacional uniforme de las actividades económicas

¹⁴ Este anexo con el procedimiento aplicado a 35 años está disponible para los interesados en revisarlo, en el presente documento solo se incorpora el resumen del vector de energía primaria total para un año.

¹⁵ Website <http://newsourcesocde.org/statistics/>

(CIIU). Para lograr esta consistencia se construyó una tabla de correspondencia que permitió enlazar la información del consumo de EP sectorial y los datos del VA de los sectores productivos.

La construcción de la correlativa permite unificar la CIIU Rev. 3 de Naciones Unidas (NU), los balances energéticos y la CIIU Rev. 2 y 3 adaptada para Colombia (A.C.)¹⁶. Esta tabla de correspondencia facilita el uso de las clasificaciones correlacionando las diferentes categorías que conforman su estructura; permitiendo, por un lado, homogeneidad en las estadísticas sectorizadas por actividad económica, y por otro lado, realizar la agregación de la información respectando la correspondencia con la estructura del VA de Colombia y las estructuras de los balances energéticos.

La tabla de correspondencia se presenta mediante una tabla con 15 clasificaciones, a dos dígitos y expresa, en primer lugar, la clasificación que se toma como base (CIIU 3 NU), seguida de las categorías usadas en los balances energéticos, las clasificaciones de la CIIU 2 A.C. y 3 A.C., su enumeración se presenta en orden descendente y se debe interpretar por filas (ver anexo 1A.5).

1.3.2.2. Tratamiento del Valor Agregado

Se toman los datos del VA como indicador de producción porque el PIB tiene el problema de la doble contabilidad, ya que la industria manufacturera usa insumos producidos por otros grupos de industrias dentro del sector industrial (EIA, 1998; Howarth et al., 1991). Además, la información del VA es comparable con otros países.

La información del VA se tomó de las cuentas nacionales del DANE al año base 2005. Los datos corresponden a tres períodos, 1975-1990, 1990-2000 y 2000-2007, que tienen como año base 1975, 1994 y 2005, respectivamente. Las series históricas se empalman mediante el método de interpolación usando la tasa promedio geométrica y el método de la tasa de variación o retropolación.

¹⁶ En Colombia la publicación de la 2ª y 3ª revisión de la CIIU adaptada, se realizó en los años 70 y 98, respectivamente. La revisión fue oficializada mediante la resolución 300 del 13 de mayo de 2005. La última correlativa del DANE fue publicada en Julio de 2008.

La información a precios constantes del VA se estima de acuerdo a las recomendaciones internacionales del SCN 1998 y 2008 (United Nations, 1999; United Nations et al., 2009). Esto significa que aunque se llama VA a precios constantes, la variable no hace referencia a un sistema de precios observable relacionado con un período de base fija, sino que se elimina el efecto de cambio en los precios año a año, basado en la teoría de los números índices encadenados. En las series de tiempo con precios de base fija las tasas de crecimiento varían según el año base y no se consideran los cambios frecuentes de la estructura económica¹⁷. Los valores de la serie de tiempo de base móvil o encadenada se acercan más al valor verdadero¹⁸, convirtiéndose en una mejor medida del crecimiento económico a corto y largo plazo, se reduce el sesgo sustitución, y son más fiables, pues los problemas de incorporación de nuevos bienes, desaparición de otros y de cambios de calidad, son menores; además, se actualiza el período de referencia reflejando pesos de períodos recientes, evolucionando hacia el estándar internacional. Entre los inconvenientes de la serie encadenada se destacan¹⁹: la pérdida de aditividad y la presencia del sesgo cuando los cambios de precios son “bruscos y cíclicos” (Curiel, 1997; Garavito et al., 2011; ILO-International Labour Office, 2004; Lora, 2008; Robjohns, 2006; Tuke, 2002; Tuke y Beadle, 2003; Whelan, 2000).

Las limitaciones en la disponibilidad de datos relacionados con las emisiones de CO₂ a nivel sectorial y por tipo de energía, y del VA según el tipo de energía utilizada, impidió incorporar otros efectos y realizar un análisis de descomposición (para las emisiones y la energía) a mayor profundidad. En el caso del VA el desglose sectorial de las cuentas nacionales se tiene a partir de 1975. Antes de este año, las cuentas nacionales las llevaba el Banco de la República y se utilizaba otra metodología para su estimación.

¹⁷ Un período de base fijo no captura adecuadamente los cambios ocurridos en las preferencias, patrones de compra, cambios tecnológicos y de las propiedades de los bienes.

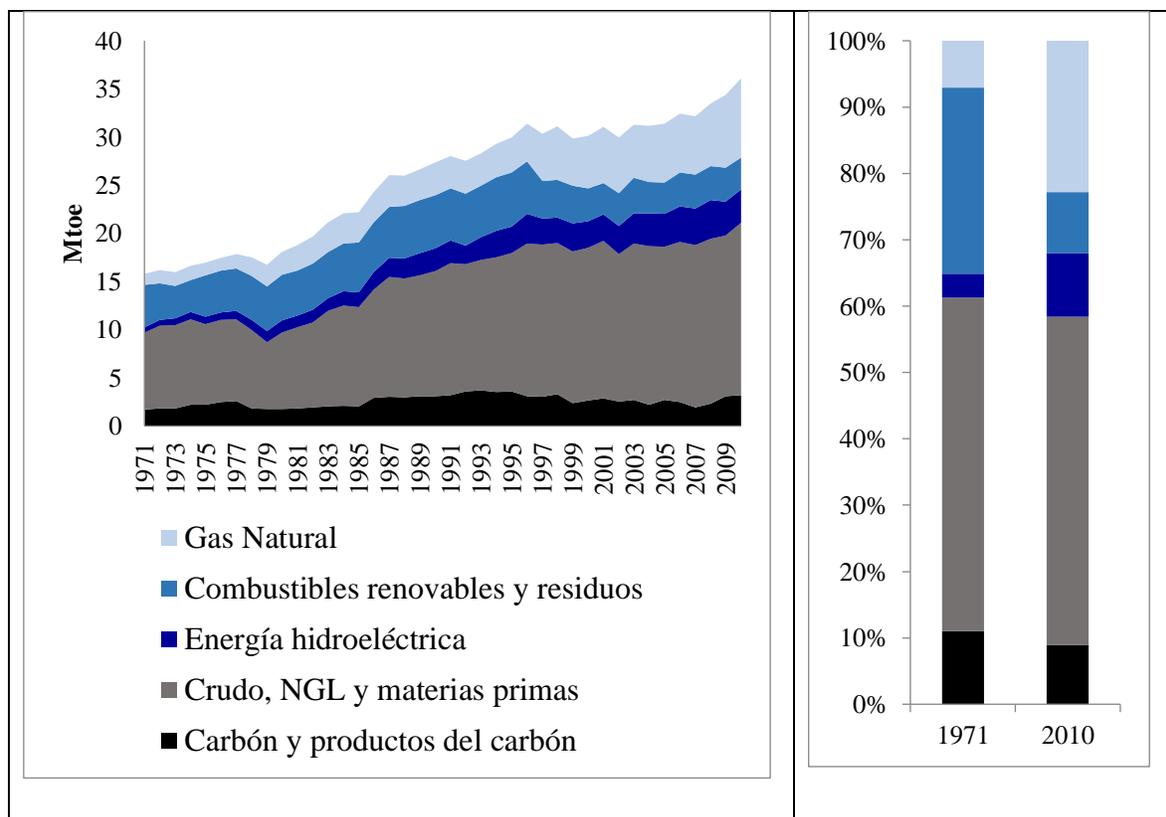
¹⁸ El índice encadenado no tiene un año base fijo (existen tantos años base como pares de años consecutivos), no obstante, tienen un año de referencia. En este caso, al cambiar el año de referencia se modifican los valores de toda la serie, pero no las tasas de crecimiento.

¹⁹ Una explicación teórica y práctica sobre los índices de base fija y encadenada se presenta en (ILO, 2004).

1.3.2.3. Estructura de los datos

De acuerdo con los datos obtenidos de la IEA, la oferta de EP en Colombia durante el período 1971-2010 presenta la siguiente estructura.

Figura 1.1. Oferta de energía primaria. Colombia, 1971-2010



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la Agencia Internacional de Energía (2014). Datos disponibles en: <http://new.sourceoecd.org>

La oferta total de EP creció a una tasa promedio anual de 2.13% y el consumo de energía final creció a una tasa promedio anual de 1.65%, durante el período 1971-2010²⁰. En la figura 1.1. se puede observar que todas las fuentes energéticas presentan un descenso importante en los años 1979 y 1999, siendo este último el más relevante, pues el descenso en la oferta energética

²⁰ Estimaciones real

coincide con una baja en la tasa de crecimiento económico (-4.01%) y una disminución de las emisiones de CO₂.

Al comparar el año 2010 con el año 1971, se observa que la composición de la oferta de EP es diferente. Los principales cambios favorables se observan en el incremento de la proporción de hidroenergía, al pasar de 4.1% al 10.8%, y el gas natural al cambiar de 8% al 25.5%. Otro cambio destacado es la proporción de energías renovables, que durante este período paso de 31.9% a 10.2%. Esta variación podría explicarse por la disminución del uso de leña, pues de acuerdo con las estimaciones realizadas a partir de los datos del Ministerio de Minas y Energía decreció a una tasa promedio del 28%.

Cabe subrayar que las fuentes de energía (medidas en toneladas equivalentes de petróleo) que presentan mayor tasa de crecimiento durante el período 1971-2010, son la energía hidroeléctrica con un 4.6% y el gas natural con 5.1%, lo que explica en parte el descenso de las emisiones de CO₂.

En relación con la oferta de energías renovables, durante las últimas tres décadas se registró una tasa de variación de 63% al pasar de 54,499 a 88,808 Tcal, se destaca la variación presentada en el uso de residuos (672.1%) y la hidroenergía (321.8%)²¹. En la figura 1.2 se observa que desde mediados de la década de los 90`s ha habido un aumento del uso de residuos como fuente energética, así como un incremento constante de la hidroenergía, con excepción de 1992, año en el cual los embalses de las hidroeléctricas²² estuvieron por debajo de los límites de reserva debido a la temporada de sequía (escasez de lluvias) provocada por el fenómeno de El Niño.²³

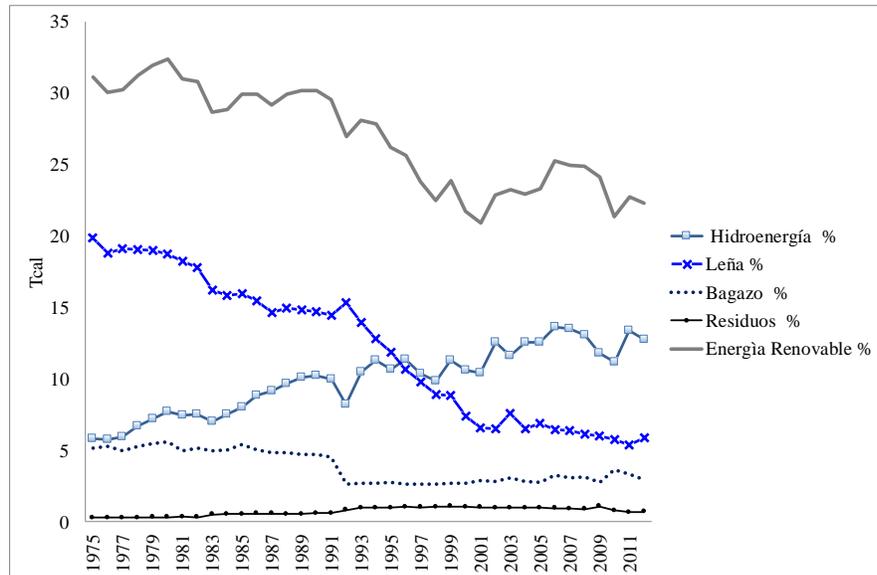
Al analizar la evolución del consumo de energía final durante el período 1971-2010, se observa que después de 1998-1999 ha habido un descenso importante en la mayoría de energías procedentes de combustibles fósiles y sus derivados (petróleo crudo, gas natural

²¹ Estimaciones realizadas con base en datos de MINMINAS (2011)

²² 15 de diciembre de 1992 se creó la Central Hidroeléctrica del Guavio, la segunda central en funcionamiento más grande de Colombia con una capacidad de 1213 MW (megavatio 10⁶ W).

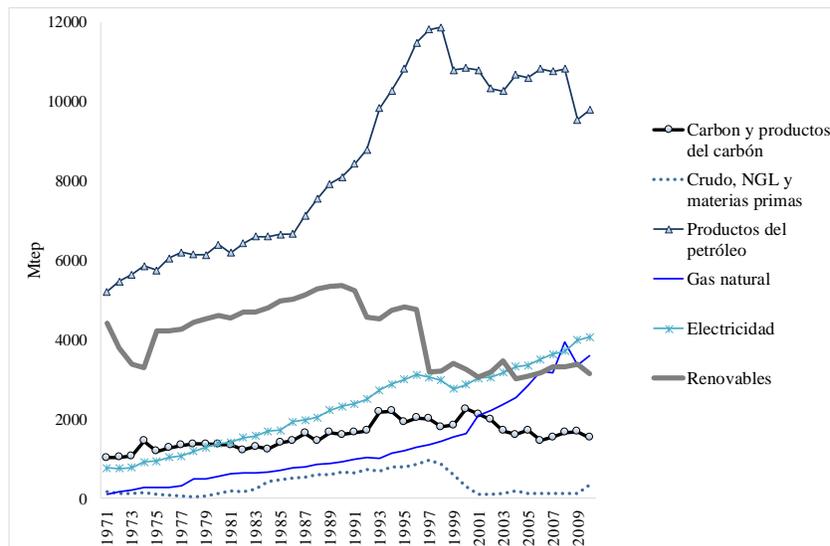
²³ La crisis energética fue desde el 2 de marzo de 1992 hasta el 1 de abril de 1993.

Figura 1.2. Oferta de energía renovable como proporción de la oferta de energía primaria. Colombia, 1975-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de MINMINAS (2011)

Figura 1.3. Evolución del consumo de energía final. Colombia, 1971-2010

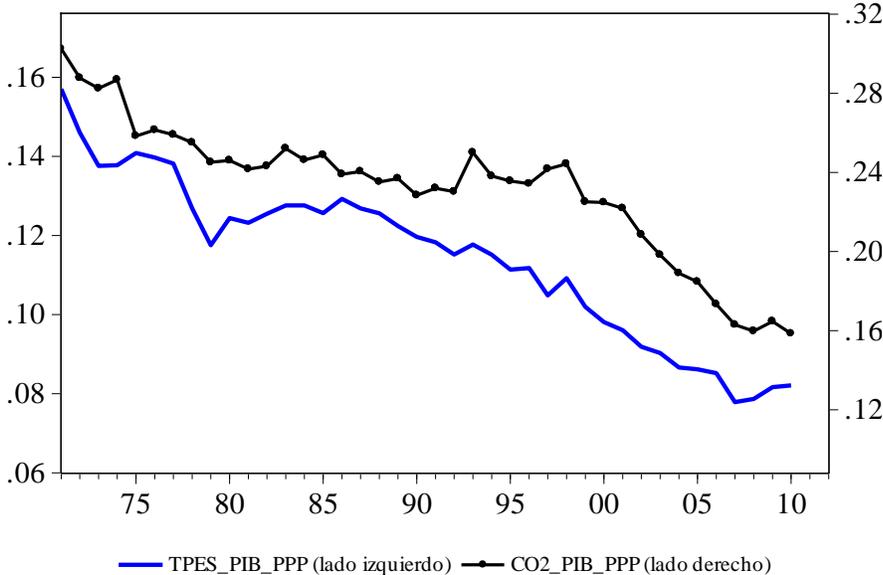


Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la IEA (2014). Base datos disponible en: <http://new.sourceoecd.org>

licuado y materias primas, productos del petróleo, carbón y productos del carbón), así como un aumento del consumo de gas natural y de la electricidad con unas tasas de crecimiento del 9.2% y del 4.3%, respectivamente, evidenciando el uso intensivo de fuentes energéticas menos nocivas con el medio ambiente como las procedentes de combustibles fósiles (ver figura 1.3).

En general, los datos relacionados con la intensidad de energía por unidad de PIB PPP en dólares del 2005 y la intensidad de emisiones por unidad PIB PPP en dólares del 2005 reflejan un comportamiento descendente a lo largo de las cuatro últimas décadas tanto para Colombia como para América Latina. De acuerdo con las unidades de medida mencionadas durante el período 1971-2011, la intensidad energética pasó de 0.157 Mtep por unidad de PIB por año a 0.076 Mtep por unidad PIB por año y la intensidad de emisiones pasó de 0.30 kg de CO₂ por unidad de PIB por año a 0.16 kg de CO₂ por unidad de PIB por año (ver figura 1.4), cayendo ambos alrededor de un 50%, a una tasa promedio anual de aproximadamente -1.75% y -1.54%, respectivamente, mientras que para América Latina durante el mismo período, estos datos pasaron de 0.16 a 0.13 Mtep/PIB y 0.29 a 0.25 kg CO₂/PIB; con unas tasas promedio anual de -0.33% y -0.37%, respectivamente.

Figura 1.4. Intensidad de las emisiones e intensidad de la energía. Colombia, 1971-2011



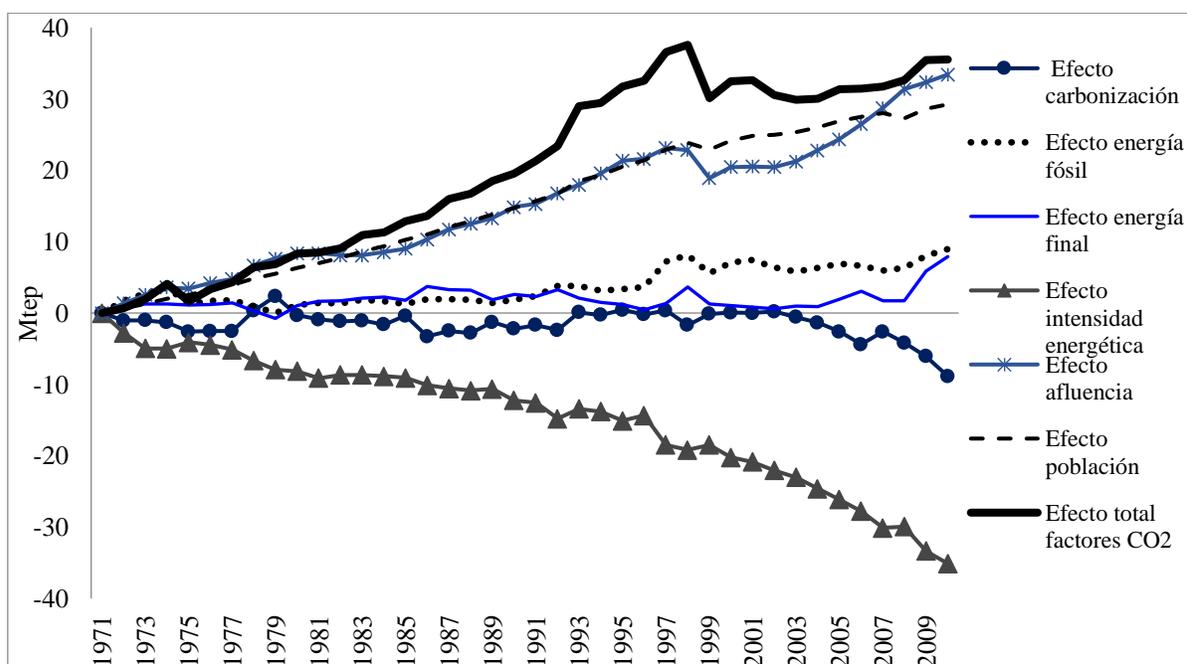
Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la Agencia Internacional de Energía (2014). Base datos disponibles en: <http://new.sourceoecd.org>

1.4. Evidencia Empírica y Análisis de resultados

1.4.1. Descomposición y análisis de la variación de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía

Con el fin de tener una mayor claridad sobre los cambios en las emisiones y su relación con el crecimiento económico y el consumo de la energía, en la figura 1.5 se presenta el resultado del cómputo de las ecuaciones (1.6 y 1.7), señalando la evolución de la descomposición de las emisiones de CO₂ en relación con el año base 1971. La variación total de las emisiones viene dada por la línea más elevada. El resto de los efectos (líneas inferiores) representan la contribución de cada uno de los efectos a la variación total de las emisiones a lo largo del período 1971-2010, considerando la descomposición factorial de Kaya. Ahora bien, la mejor forma de entender las variaciones es teniendo en cuenta las circunstancias del momento y las políticas energéticas y ambientales de la región.

Figura 1.5. Descomposición del crecimiento de las emisiones de CO₂. Colombia, 1971-2010



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la Agencia Internacional de Energía (2014). Base de datos disponibles en: <http://new.sourceoecd.org>

De acuerdo con lo observado en la figura 1.5, los principales efectos que explican la variación de las emisiones en Colombia son: población, afluencia, intensidad energética y el efecto carbonización. Los dos primeros contribuyen a su incremento, mientras que los dos últimos a su reducción, neutralizando a los a los dos primeros (ver anexo 1A.6). Cabe anotar que los factores que componen la identidad de Kaya pueden establecer entre sí relaciones de diferente índole, de ahí que no se puedan considerar como factores independientes, puesto que sería como negar sus interrelaciones mutuas (Alcántara y Padilla, 2005; Duro y Padilla, 2006; Kawase et al., 2006; Martín et al., 2007). Estos factores, además, están afectados por el contexto político, social, demográfico y económico. A continuación, se analiza la relación entre cada efecto y la variación de las emisiones totales de CO₂ (efecto total). Para este propósito se supone que al analizar un efecto, el resto de los efectos permanece constante. En general, durante el período 1971-2010, las emisiones totales de CO₂, presentan un comportamiento ascendente con respecto al año base (1971), siendo 1998 el año donde el incremento neto es más elevado con 37.6 Mtep, explicado por la influencia de los diferentes factores. Los efectos que contribuyeron en este año al aumento de emisiones son: el efecto población, el efecto riqueza, el efecto sustitución y el efecto transformación, con 23.9 Mtep (63%)²⁴, 22.8 Mtep (60.8%), 8 Mtep (21.5%) y 3.7 Mtep (9.7%), respectivamente. Mientras que los efectos que neutralizaron este incremento con un descenso en la generación de las emisiones de CO₂ son los efectos intensidad energética con -19 Mtep (51%) y carbonización con -1.7 Mtep (4.5%). A continuación, se presenta un análisis sobre la evolución de cada efecto en relación con el comportamiento de las emisiones tomando como año base 1971.

Efecto población, en relación con la proporción explicada de las emisiones por este factor. Se observa a lo largo del período que presenta tendencia creciente, lo que es fácilmente comprensible, dada la tasa de crecimiento media anual acumulativa de la población, que es aproximadamente del 1.9%. Destaca la década 1997-2007, por ser el período donde este efecto supera a todos los demás con diferencia y, en particular, los años 1997 y 1998, por ser los de mayor impacto sobre la generación de emisiones, con aproximadamente 23 Mtep. Ambos años

²⁴Los valores Mtep de cada factor indican el aporte de aumento o disminución de las emisiones con respecto al año base 1971. Los valores porcentuales entre paréntesis señalan el porcentaje explicado por el factor en relación con el resto de los factores.

presentan las emisiones per cápita más altas del período con 1.67 Mtep CO₂ por persona por año (IEA, 1966; Serrano, 2008).

Efecto afluencia o variación causada por los cambios en el PIB per cápita. La figura 1.5 muestra que existe una trayectoria ascendente de la generación de emisiones y el PIB per cápita. No obstante, es importante subrayar que, durante el período 1971-1982, el ritmo de crecimiento del PIB per cápita fue ligeramente superior al crecimiento de las emisiones. Algunos factores que favorecieron el impulso de la actividad económica a finales de la década de los 70's fueron la demanda externa del café y la bonanza petrolera. Después de 1982, se observa que las emisiones de CO₂ crecen a un ritmo superior al PIB per cápita. Asimismo, cabe subrayar que a finales de la década de los noventa se presenta una contracción de la economía (al período 1992-1998 se le conoce como “la burbuja” de los años noventa porque el exceso de gasto se pagó con endeudamiento), siendo particularmente fuerte durante el año 1999 con una tasa de crecimiento negativa (-4.02%), año que coincide con un descenso fuerte de las emisiones. A partir del año 2007 el efecto afluencia supera a todos los demás (incluso al efecto población), retomando la senda del crecimiento de la economía en concordancia con el crecimiento de las emisiones.

Efecto carbonización o variación causada por los cambios en el factor carbonización. En general, en la figura se observa que el efecto presenta una tendencia descendente oscilatoria a lo largo del período con un impacto favorable a la disminución de emisiones. Sin embargo, en el año 1979 durante la crisis del petróleo, este efecto presenta su impacto más alto, contribuyendo con 2.4 Mtep (34.5%) a la generación de emisiones. Este incremento puede estar asociado con el aumento de consumo de combustibles fósiles y sus derivados (ver figura 1.3). Después del año 1979 hay una tendencia descendente moderada cíclica hasta comienzos del nuevo milenio, donde se acentúa el descenso, destacando el año 2010 por su impacto negativo a la generación de emisiones con -8.86 Mtep (24.9%); posiblemente debido al incremento en el uso de algunas energías renovables²⁵ y de gas natural. En este sentido, es importante mencionar que el gobierno ha realizado campañas orientadas a estimular el uso del gas en las principales

²⁵ El uso de residuos como energía primaria renovable creció a una tasa promedio anual del 4.5% .

ciudades, al tiempo que ha llevado a cabo un desmonte de los subsidios a otros combustibles²⁶. Esta política del gobierno ha motivado la transformación de los vehículos al gas natural, ya que se han abaratado los costos de conversión en un 50% (ver anexo 1A.6).

Efecto sustitución o la variación causada por los cambios en la energía fósil consumida por unidad de EP. Este factor ha permanecido relativamente estable con tendencia ascendente, desfavorable al ahorro de emisiones, a lo largo del período analizado. Se distinguen dos períodos. El primero se caracteriza por una influencia leve sobre el aumento de las emisiones (varía de 1 a 4 Mtep), durante el período 1971-1996, y el segundo, por una influencia mayor al incremento de las emisiones (de 6 a 9 Mtep) durante el período 1996-2010. La tendencia ascendente se debe al incremento del consumo de gas natural²⁷ e indica que la energía fósil se ha sustituido menos de lo esperado por otro tipo de energía, como la hidráulica u otras energías primarias renovables limpias.

Efecto transformación o la variación causada por los cambios en la EP consumida por unidad de energía final. Este efecto presenta una tendencia oscilatoria estable con una influencia relativamente leve sobre el incremento de las emisiones durante el período 1971-2008, pues su aporte al incremento de emisiones oscila entre 0.3 y 3.7 Mtep por año. Se destaca el año 1979, por ser el único año que contribuye al ahorro de emisiones por esta vía con -0.76 Mtep (11%). Después del 2008, existe una tendencia al alza, con un mayor aporte al aumento de emisiones, pues supera las 5.9 Mtep por año; reflejando una desmejora aparente en la transformación de la EP en energía final.

Efecto intensidad energética o variación causada por los cambios en la cantidad de energía final usada por unidad de producto (Tep/U\$PPP). La figura 1.5 muestra que las emisiones totales de CO₂ aumentan hasta 1998 y la intensidad energética presenta una tendencia decreciente durante las cuatro décadas. Prueba de ello es que es el factor que más influye en el descenso de las emisiones a largo del período analizado. En concreto, en el 2010 contribuye a la reducción

²⁶ Los subsidios llegan a representar más del 1% del PIB y más del 2% del total de la deuda pública, con el agravante de que básicamente beneficia a los estratos más altos de la población.

²⁷ Al considerar en la estimación únicamente los combustibles del petróleo y el carbón mineral como combustibles fósiles (excluyendo el gas natural), la influencia conjunta de estos dos combustibles sobre el aumento de emisiones pasa a ser negativa durante todo el período en la identidad de Kaya.

con -35.13 Mtep con respecto al año base, explicando el 98% de la bajada en las emisiones (ver anexo 1A.6). Esto significa que ha habido una disminución en el consumo de energía por unidad de producto evidenciando una desvinculación en el “sentido débil”. Las posibles explicaciones, entre otras razones, podrían ser la incorporación de tecnologías eficientes en la energía (en los hogares las instalaciones de gas incrementaron en un 11.4% durante el período 1994-2013), y el uso eficiente en el parque automotor. En este sentido, es importante mencionar que debido a la política de masificación de gas, durante el período 2000-2013, la conversión de vehículos a gas creció a una tasa promedio del 38.7%²⁸, energía que emite un 85% menos de emisiones de CO₂ que la gasolina (MINMINAS, 2007).

Asimismo, al observar la trayectoria de los datos de la intensidad energética de la economía durante el período 1971-2011, también se evidencia la mejora en la eficiencia energética, pues este indicador disminuyó a una tasa promedio anual de -1.6%, logrando una contribución favorable a la mejora ambiental (ver anexo. 1A.6). De acuerdo con la IAEA (2005a) esta situación también podría ser explicada por cambios técnicos en el proceso productivo de los bienes o por cambios en la estructura productiva. por ejemplo, la terciarización de la economía mediante el impulso al sector comercio y el sector servicios que probablemente consumen menos energía directa, con excepción del sector de transporte, aunque hay estudios que subrayan que las actividades de servicios vinculan diversas actividades que presentan fuertes impactos sobre el medio ambiente (Alcántara y Padilla, 2007). Dada la relevancia de este factor en la descomposición aditiva realizada y en valores absolutos, a continuación, se realizará una descomposición desglosada por sectores, pues los indicadores desagregados reflejan mejor la evolución de la eficiencia energética.

1.4.2. Descomposición y análisis de la variación en la intensidad energética

El consumo de EP total del sector industrial en Colombia durante el período 1975-2010 se incrementó en 11,530 Mtep, pasando de 10,622 Mtep en 1975 a 22,592 Mtep en el 2010, con una tasa de crecimiento promedio anual de 2.1%, siendo menor que la tasa de crecimiento

²⁸ De acuerdo con ECOPETROL, este aumento se ha visto favorecido por el programa de incentivos en la conversión de vehículos, el cual provee entre \$400000 y \$1000000 pesos colombianos por vehículo. En euros esta cifra varía entre 154.7 – 386.7, pues un euro equivale a 2586.29 pesos colombianos al 2 de Junio del 2014. http://www.colombia.com/cambio_moneda/.

promedio anual del VA a precios constantes (3.5%). La intensidad de energía²⁹ considerando el VA a precios constantes en el mismo período bajó 0.04112 (Tep por miles de pesos a precios constantes del 2005), al pasar de 0.0987 en 1975 a 0.05758 en el 2010. Esto significa que bajó a una tasa promedio anual durante este período de -1.5%.

Con el propósito de ver a mayor detalle los factores que han incidido en el descenso de la intensidad energética total, a continuación se presenta su descomposición considerando el efecto intensidad y el efecto estructura. Las estimaciones se realizaron usando el método de descomposición multiplicativa aplicando las ecuaciones (1.8 y 1.9).

En las figuras un incremento en la proporción (ratio) de la intensidad energética (desde el año base hasta los años subsecuentes) implica un decrecimiento de la eficiencia, mientras que un decrecimiento de la proporción de la intensidad energética indica un incremento de la eficiencia en el consumo de la energía por unidad de producto. La intensidad energética se calculó a nivel agregado y por sectores.

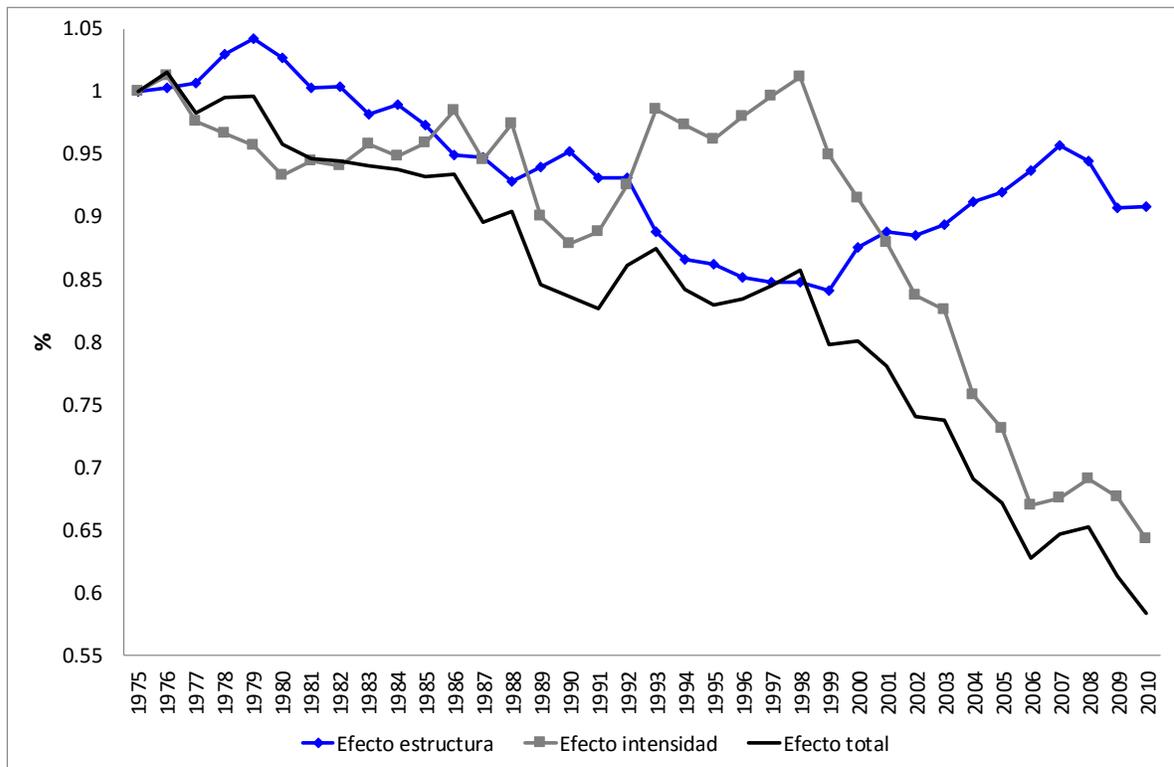
En las estimaciones se encontró que los efectos estructura e intensidad energética presentan tendencia descendente durante el período. Reflejándose esta tendencia de forma clara en el efecto total (ver figura 1.6). El efecto intensidad energética sectorial es el que más contribuye al descenso de la intensidad energética agregada, especialmente en el nuevo milenio. No obstante, este efecto durante la década de los noventa, refleja un comportamiento ascendente, mostrando de este modo una menor eficiencia aparente en el uso de energía. La contribución de este efecto a la disminución del ratio de la intensidad energética agregada, se puede notar mejor analizando un año. Por ejemplo, para la EP total del año 2010, la contribución del cambio estructural al descenso total de la intensidad energética primaria total es del -9.2%, mientras que el cambio en la intensidad de la energía sectorial es del -35.75%, resultando una variación neta del -41.7% en la intensidad energética agregada (ver figura 1.6 y anexo 1A.7)³⁰. Resultados similares se presentan en las estimaciones realizadas por la IEA para Estados Unidos durante el

²⁹ Estimación considerando el consumo de energía primaria total sectorial, excluyendo el consumo de los hogares.

³⁰ El anexo presenta los resultados finales de la descomposición multiplicativa. La presentación del procedimiento completo de la descomposición multiplicativa está disponible para los interesados en revisarlo.

período 1985-1994 (EIA, 1998) y por Howarth et al. (1991) para ocho países de la OECD durante el período 1973-1987.

Figura 1.6. Descomposición multiplicativa de la intensidad. Colombia, 1975-2010



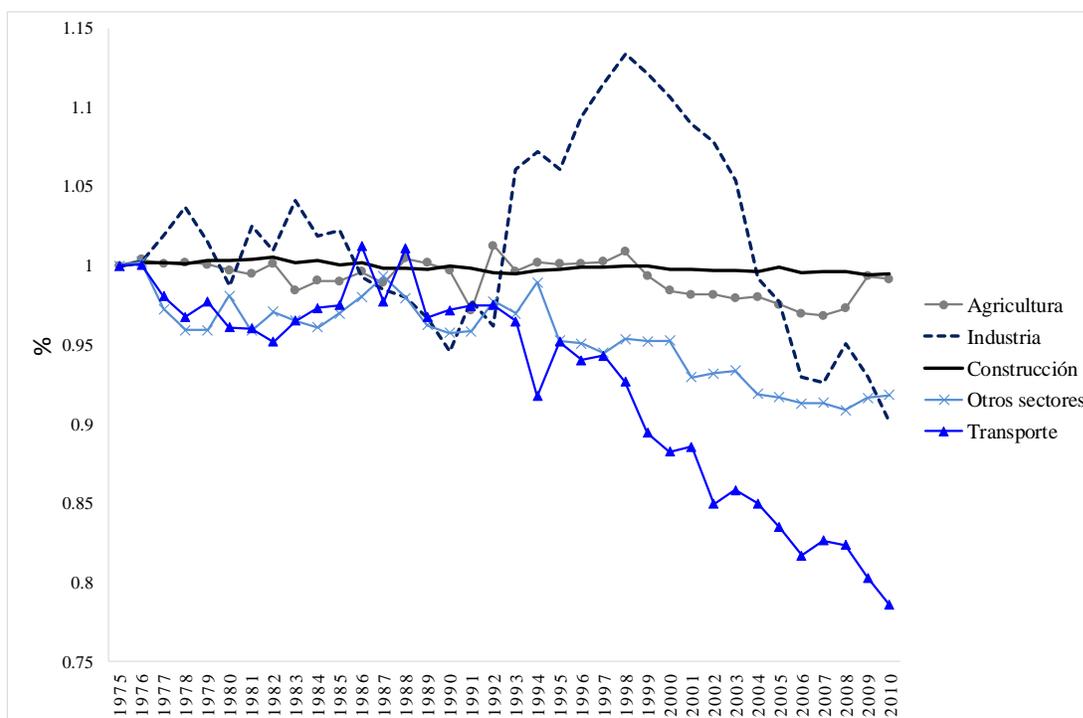
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA (2012) y de las cuentas nacionales DANE, 2011

Efecto intensidad, las estimaciones por sector reiteran lo observado a nivel agregado, en lo relacionado con la influencia que tiene este efecto en el descenso de la intensidad energética del país (ver figura 1.6). Asimismo, las estimaciones sectoriales desagregadas sugieren que el incremento en el ratio de la intensidad energética observado en la década de los noventa en la figura 1.6, se explica especialmente por el aumento del ratio de la intensidad energética del sector industrial durante el mismo período, como lo ilustra la figura 1.7 (ver anexo 1A.7). Las estimaciones desagregadas que presentaron mayor disminución en la intensidad energética sectorial, especialmente al finalizar la década de los noventa, son: el sector transporte y el sector

industrial³¹, mientras que los de menor disminución son: construcción y otros sectores³² (ver figura 1.7). Dentro del sector industrial, se destacan por presentar las mayores tasas de crecimiento promedio anual de consumo de energía durante el período analizado: química y petroquímica (4.2%) y hierro, acero y metales no férreos (3.5%) (ver anexo 1A.7)

La mejora en la intensidad energética del sector transporte y el sector industrial, posiblemente podría estar asociada con algunas medidas de ahorro energético, cambios tecnológicos y sustitución de energías, así como la puesta en marcha de políticas de impacto global en el descenso del consumo energético. Queda el interrogante sobre ¿cuáles son los tipos de energía que más han contribuido a este descenso de la intensidad energética a nivel sectorial y agregado?

Figura 1.7. Efecto intensidad sectorial (a precios constantes del 2005). Colombia 1975-2010



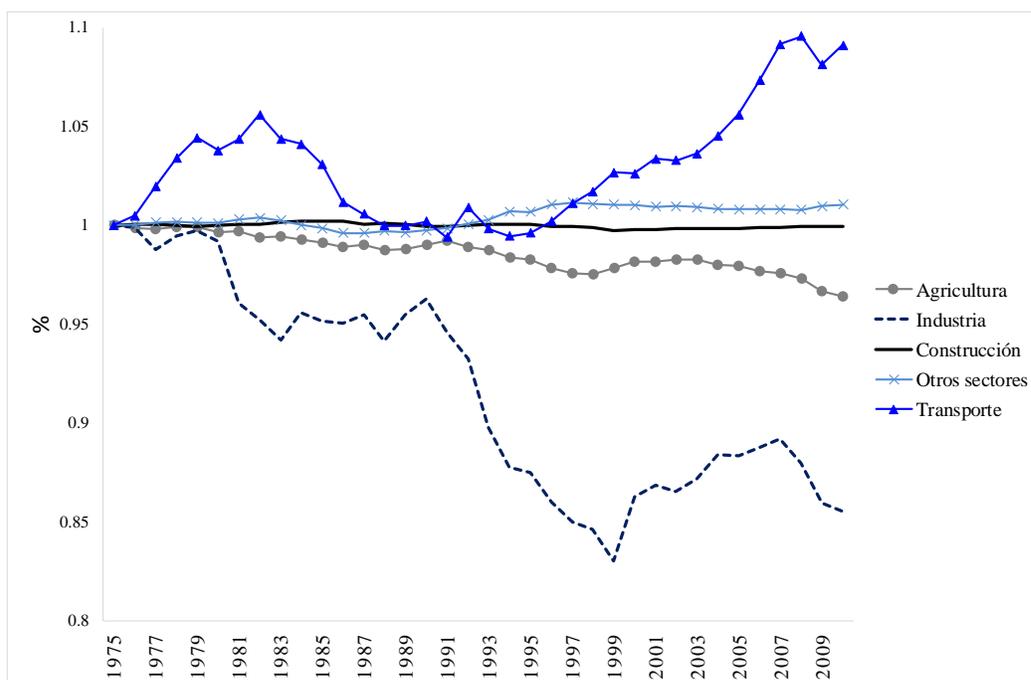
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA y de las cuentas nacionales DANE, 2014

³¹El sector industrial agrupa alimentos y tabaco, textiles y cuero, madera y productos de madera, papel e impresión, química y petroquímica, minerales no metálicos, industria no específica, maquinaria y equipo, y hierro, acero y metales no férreos.

³²Otros servicios según la CIU 3.1 comprende las divisiones 50-55 y 65-99.

Efecto estructura o variación causada por el cambio estructural en la economía. Esto es, cambios en la composición de los productos demandados en el sector industrial. El cambio estructural tuvo una influencia significativa en el descenso de la intensidad energética durante el período 1993-1999, esto se observa claramente en las estimaciones agregadas (ver figura 1.6.) Por ejemplo, en el año 1998 se observa que la contribución del cambio estructural al descenso de la intensidad energética primaria total es del -15.3%, mientras que la intensidad de la energía sectorial contribuye con un ascenso del 1.1%, resultando un descenso neto del -14.3% en la intensidad energética total observada. Este efecto tiene una importancia fundamental en el caso del sector industrial y el sector transporte, mientras que en el resto de los sectores su influencia es menor (ver figura 1.8). En el caso del sector industrial el efecto estructura favorece la eficiencia en el consumo de energía. Sin embargo, en el caso del sector transporte se produce un efecto contrario a la eficiencia, especialmente al final del nuevo milenio, como se observa en la figura 1.8. Se requiere profundizar en las razones por las cuales el sector transporte presenta este comportamiento.

Figura 1.8. Efecto cambio estructural sectorial (a precios constantes del 2005). Colombia, 1975-2010



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA y de las cuentas nacionales DANE, 2014

1.5. Conclusiones

El trabajo hace un aporte importante en la comprensión de la problemática nacional relacionada con el comportamiento de las emisiones y la eficiencia energética (entendida como el consumo de energía por unidad de producto), de modo que se logra identificar y cuantificar los principales factores que influyen en la evolución de las emisiones y cuál es su relación con el consumo de energía, así como identificar la influencia que ha tenido el cambio estructural en la eficiencia energética durante el período observado.

En relación con la evolución de las emisiones durante las cuatro décadas analizadas, el principal efecto explicativo del descenso de las emisiones de CO₂ en Colombia es la intensidad energética (es decir, que se requiere menos energía por unidad monetaria de producción económica, lo que se traduce en menos presión ambiental). Le sigue, en un segundo plano, el efecto carbonización, evidenciando algunos cambios en la combinación de combustibles fósiles utilizados. Mientras que los efectos que mejor explican el aumento de emisiones son: el efecto escala relacionado con el cambio en el factor población, luego, el efecto riqueza medido a través del PIB per cápita y, por último, de forma oscilatoria con tendencia ascendente, el efecto transformación y el efecto sustitución.

Por otra parte, los resultados muestran que la disminución en la intensidad energética agregada de la industria se debe principalmente a la disminución en la intensidad energética sectorial y, en menor medida, al cambio estructural. En cuanto al cambio estructural, se encontró que éste ocurrió principalmente entre 1993-1999, y fue más relevante en algunos sectores, entre los que destacan el sector industrial y el sector transporte.

En general, el efecto intensidad energética es el que ha tenido mayor incidencia en la disminución de las emisiones y en la mejora en la eficiencia energética, lo que refleja un panorama satisfactorio, acorde con la tendencia internacional, la cual se caracteriza por las mejoras tecnológicas, y la creación de nuevos estándares técnicos. Entre los hechos más sobresalientes durante las casi cuatro décadas analizadas, se encuentra el crecimiento constante

de la oferta de hidroenergía y de gas natural. Esta última se intensificó en el nuevo milenio por ser uno de los objetivos de política más importante del sector energético, aumentando su participación porcentual en el consumo final de energía. A esto contribuyó la existencia de unos precios competitivos que volcaron la tendencia hacia fuentes energéticas más amigables con el medio ambiente, sustituyendo la electricidad, la leña y el uso de combustibles como el cocinol.

Las estimaciones tienen la bondad de tener en cuenta los requerimientos totales de energía (en términos de los procesos de transformación y de pérdidas) de los sectores energéticos, pues a diferencia de realizar subestimaciones con la energía final, con la metodología Alcántara y Roca (1995) se logra cuantificar mejor y de forma más precisa el vector de requerimientos totales de energía (directo e indirecto) para casi cuatro décadas a nivel sectorial. Además, se utilizan datos encadenados del VA que permite hacer un mejor seguimiento del comportamiento de las variables. No obstante, tiene limitaciones relacionadas con el desglose de la información sectorial que impiden identificar los sectores que más han contribuido a las modificaciones en las emisiones a lo largo del período 1971-2010; esto debido a la falta de datos de las emisiones de CO₂, sectorialmente y por tipo de energía, para el período de análisis. Tampoco se cuenta con la información para aplicar la descomposición de Kaya a la intensidad de energía.

Con el fin de consolidar y fomentar una cultura de eficiencia energética (menor consumo de energía por unidad de producto) en la población y actores clave, se requiere: ampliar el conocimiento y la información relacionada de: buenas prácticas en el uso de la energía, y nuevas tecnologías (duras y suaves) relacionadas con el ahorro de energía en el sector servicios y la construcción, en aspectos como: sistemas de iluminación, aire acondicionado, refrigeración, nuevos materiales en construcción, gestión de la organización (Sistema de gestión de la energía ISO 50001), etc.

Así como continuar con las medidas de uso racional de la energía en el sector industrial y el sector transporte, especialmente en lo relacionado con la sustitución de energéticos, pues el ratio del factor transformación y el factor carbonización reflejan un leve incremento en el último quinquenio, evidenciando un comportamiento contrario a la eficiencia energética y a la disminución de emisiones, por lo que se requiere: a) mejorar la tecnología y la eficacia de los equipos utilizados en la industria (motores de alta eficiencia) y en los procesos y procedimientos

asociados con la transformación de la energía (cogeneración). b) Revitalizar, promover e impulsar el uso de los residuos de los procesos industriales como energético reincorporándolos nuevamente al proceso (por ejemplo, gases calientes, vapor).

Los hallazgos encontrados generan varios cuestionamientos y desafíos: i) el primero de éstos es si en el futuro la intensidad energética sectorial continuará descendiendo y mejorando la eficiencia energética, o cual será el rol que desempeñará el cambio estructural en el largo plazo. Asimismo, sería relevante saber ¿cuál es rol que desempeñan las importaciones y/o las exportaciones en el consumo de energía en el país?. Las causas y consecuencias de estos factores merecen una mayor investigación. ii) en segundo lugar, sería conveniente conocer cómo ha influido durante el período analizado la política ambiental, energética, y la regulación llevada a cabo por parte de las instituciones para el cumplimiento de las mismas. iii) Por último, el desafío más inmediato que tiene el país, es cómo se va atender la creciente demanda por gas con precios razonables, ante las limitadas reservas, pues de acuerdo con la UPME del Ministerio de Minas y Energía (UPME, 2016) éstas alcanzan hasta el año 2023, por lo que se requiere identificar nuevos depósitos de este hidrocarburo y/o realizar importaciones.

También sería importante conocer i) ¿cuándo se presenta el cambio estructural en las emisiones de CO₂ y en el consumo de la energía? ¿Cómo es la relación de estas variables con respecto al PIB per cápita y otras variables socioeconómicas? A esto se le da respuesta mediante modelos econométricos que se presentan en el capítulo 2. Otro interrogante que surge es ii) ¿cuál es el consumo directo e indirecto de energía de los diferentes sectores en el momento del cambio estructural? ¿Cuál es la elasticidad energía/demanda y energía/VA? ¿Qué sucede con el consumo de la energía si aumenta o disminuye la demanda final del sector productivo? Un modelo que permite tener una visión más detallada del comportamiento del consumo de energía y la eficiencia energética es el modelo insumo-producto que se desarrollará en el capítulo 3.

1.6. Bibliografía

- Alcántara, V., y Padilla, E. (2005). Análisis de las emisiones de CO₂ y sus factores explicativos en diferentes áreas del mundo *Document de treball 05.07*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Alcántara, V., y Roca, J. (1995a). Energy and CO₂ emissions in Spain : Methodology of analysis and some results for 1980 -1990. *Energy Economics*, 17(3), 221-230.
- Alcántara, V., y Roca, J. (1995b). Energy and CO₂ emissions in Spain: Methodology of analysis and some results for 1980 -1990. *Energy Economics*, 17(3), 221-230.
- Ang, B. W. (1995). Decomposition methodology in industrial energy demand analysis. *Energy*, 20(11), 1081-1095.
- Ang, B. W. (1999). Decomposition methodology in energy demand and environmental analysis. In C. J. M. Van den Bergh Jeroen (Ed.), *Handbook of environmental and resources economics* (pp. 1146-1163). Chentelham: Edward Elgar.
- Ang, B. W. (2004a). Decomposition analysis applied to energy. *Encyclopedia of Energy*, 1, 761-769.
- Ang, B. W. (2004b). Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, 32(9), 1131-1139.
- Ang, B. W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 33(7), 867-871.
- Ang, B. W., Huang, H. C., y Mu, A. R. (2009). Properties and linkages of some index decomposition analysis methods. *Energy Policy*, 37(11), 4624-4632.
- Ang, B. W., y Lee, S. Y. (1994). Decomposition of industrial energy consumption : Some methodological and application issues. *Energy Economics*, 16(2), 83-92.
- Ang, B. W., y Liu, F. L. (2001). A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 26(6), 537-548.
- Ang, B. W., Liu, F. L., y Chew, E. P. (2003). Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 31(14), 1561-1566.
- Ang, B. W., y Liu, N. (2007a). Energy decomposition analysis: IEA model versus other methods. *Energy Policy*, 35(3), 1426-1432.
- Ang, B. W., y Liu, N. (2007b). Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 35(1), 238-246.
- Ang, B. W., y Liu, N. (2007c). Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 35(1), 739-742.
- Ang, B. W., y Zhang, F. Q. (1999). Inter-regional comparisons of energy-related CO₂ emissions using the decomposition technique. *Energy*, 24(4), 297-305.
- Ang, B. W., y Zhang, F. Q. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, 25(12), 1149-1176.
- Ang, B. W., Zhang, F. Q., y Choi, K.-H. (1998). Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. *Energy*, 23(6), 489-495.
- Baležentis, A., Baležentis, T., y Streimikiene, D. (2011). The energy intensity in Lithuania during 1995 - 2009: A LMDI approach. *Energy Policy*, 39(11), 7322-7334. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.055>
- Bruce, J. P., Hoesung, L., y Haites, E. F. (Eds.). (1996). *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the*

- Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
Cambridge: Cambridge University Press.
- Carlson, B. C. (1972). The Logarithmic Mean. *The American Mathematical Monthly*, 79(6), 615-618.
- Commoner, B., M. Corr, y P. J. Stamler. (1971a). The causes of pollution. *Environment*, 13(3), 2-19.
- Commoner, B., M. Corr, y P. J. Stamler. (1971b). *The closing circle: nature, man, and technology*. New York: Knopf.
- Cumberland, J., H. (1966). A Regional Interindustry Model for Analysis of Development Objectives. *Papers of the Regional Science Association*, 17, 64-94.
- Curiel, D. J. (1997). Teoría de los índices de precios. *Cuadernos de estudios empresariales*, (7), 71-88.
- Choi, K.-H., y Ang, B. W. (2003). Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference. *Energy Economics*, 25(6), 615-624.
- Chung, H.-S., y Rhee, H.-C. (2001). A residual-free decomposition of the sources of carbon dioxide emissions: a case of the Korean industries. *Energy*, 26(1), 15-30.
- Daly, H. (1990). Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, 2(1), 1-6.
- Diakoulaki, D., y Mandaraka, M. (2007). Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO2 emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 29(4), 636-664.
- Divisia, F. (1925). L'indice monétaire et la théorie de la monnaie. *Revue d'Economie Politique*, 9(2), 109-135.
- Duro, J. A., y Padilla, E. (2006). International inequalities in per capita CO2 emissions: A decomposition methodology by Kaya factors. *Energy Economics*, 28(2), 170-187. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2005.12.004>
- EECA-Energy Efficiency and Conservation Authority. (2009). Energy Efficiency and Renewable Energy in New Zealand. Year Six Report: March 2001 to 2007 Wellington: Monitoring and Technical Group Energy Efficiency and Conservation Authority.
- EERE -Energy Efficiency and Renewable Energy. (2011). Industrial Total Energy Consumption *Planning, Budget, and Analysis*. *Energy Intensity Indicators*: U.S. Department of Energy.
- Ehrlich, P., y Holdren, J. (1972). A bulletin dialogue on the 'Closing Circle'. Critique: One dimensional ecology. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 28(5), 16-27.
- Ehrlich, P., xxxxx, y Holdren, J. (1971). Impact of population growth. *Science*, 171, 1212-1217.
- EIA - Energy Information Administration. (1998). *Changes in energy intensity in the manufacturing sector 1985-1994* Washington, D.C.: U.S. Department of Energy.
- EIA - Energy Information Administration. (2010). *International Energy Outlook*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy.
- Farla, J. C. M., y Blok, K. (2000). Energy Efficiency and Structural Change in the Netherlands, 1980-1995. *Journal of Industrial Ecology*, 4(1), 93-117. doi: 10.1162/108819800569203
- Foundation Climate Works y Grupo Banco Mundial. (2014). *El desarrollo adaptado al cambio climático. La suma de los beneficios derivados de las medidas que contribuyen*

- a generar prosperidad, poner fin a la pobreza y combatir el cambio climático.*
Washintong,: Grupo Banco Mundial.
- Fouquet, R. (2009). A brief history of energy. In J. Evans & L. C. Hunt (Eds.), *International Handbook on the economics of energy*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Garavito, A. A., Huertas, C. C., Lopez, V. D., Parra, P. J., y Ramos, V. M. (2011). Construcción del índice de términos de intercambio para Colombia. *Borradores de Economía*, (639), 1-18.
- Goldemberg, J., Squitieri, R., Stiglitz, J., Amano, A., Shaoxiong, X., y Saha, R. (1996). Introduction: Scope of the Assessment. In J. P. Bruce, L. Hoesung & E. F. Haites (Eds.), *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hatzigeorgiou, E., Polatidis, H., y Haralambopoulos, D. (2008). CO2 emissions in Greece for 1990-2002: A decomposition analysis and comparison of results using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index techniques. *Energy*, 33(3), 492-499.
- Howarth, R. B., Schipper, L., Duerr, P. A., y Strøm, S. (1991). Manufacturing energy use in eight OECD countries: Decomposing the impacts of changes in output, industry structure and energy intensity. *Energy Economics*, 13(2), 135-142.
- Huntington, H. G., y Myers, J. G. (1987). Sectoral Shift and Industrial Energy Demand: What Have We Learned. In A. Farunqui, J. J. Broehl & G. C.W. (Eds.), *The Changing Structure of American Industry and Energy Use Patterns*. Columbus, Ohio: Battelle Press.
- IAEA -International Atomic Energy Agency. (2005a). *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. Vienna: IAEA.
- IAEA -International Atomic Energy Agency. (2005b). *Energy Indicators for sustainable developments: guidelines and Methodologies*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IEA-International Energy Agency. (2014). *Energy Efficiency indicators: essentials for policy making*. Paris: OECD/IEA.
- IEA - International Energy Agency. (2007). *Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2004). *Oil crises and climate challenges. 30 years of energy use in IEA countries*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2007). *Energy Balances of non-OECD countries 2004-2005*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2008a). *CO₂ capture and storage. A key carbon abatement option*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2008b). *CO₂ Emissions from fuel combustion 1971-2006*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2010a). *Carbon Capture and Storage. Model Regulatory Framework*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2010b). *Energy Balances of non - OECD countries. Documentation for beyond 2020 files*. Paris: OECD/IEA.

- IEA -International Energy Agency. (2012a). *Energy Balances of non-OECD Countries 2012*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2012b). *Indicators for CO2 emissions from Fuel Combustion Statistics (database)*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2014a). *CO2 Emissions from fuel combustion highlights*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2014b). World Energy Balances. Documentation for beyond 2020 files Disponible en <http://www.iea.org/statistics/topics/energybalances/>.
- IEA -International Energy Agency. (2014c). *World Energy Outlook 2014*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2016). World Energy Outlook.Special Report. Energy and air pollution Disponible en https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReportEnergyandAirPollution_Executivesummary_EnglishVersion.pdf
- ILO-International Labour Office. (2004). *Consumer price index manual: Theory and practice*. Genova: ILO, IMF, OECD, UNECE, Eurostat, The World Bank.
- Kawase, R., Matsuoka, Y., y Fujino, J. (2006). Decomposition analysis of CO2 emission in long-term climate stabilization scenarios. *Energy Policy*, 34(15), 2113-2122.
- Kaya, Y. (1989). Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. Paper presented to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Intergovernmental Panel on Climate Change. París.
- Liao, H., Fan, Y., y Wei, Y.-M. (2007). What induced China's energy intensity to fluctuate: 1997-2006? *Energy Policy*, 35(9), 4640-4649.
- Lin, B., y Long, H. (2014). How to promote energy conservation in China's chemical industry. *Energy Policy*, 73(0), 93-102. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.056>
- Lise, W. (2006). Decomposition of CO2 emissions over 1980-2003 in Turkey. *Energy Policy*, 34(14), 1841-1852.
- Liu, F. L., y Ang, B. W. (2003). Eight methods for decomposing the aggregate energy-intensity of industry. *Applied Energy*, 76(1-3), 15-23.
- Liu, N., y Ang, B. W. (2007). Factors shaping aggregate energy intensity trend for industry: Energy intensity versus product mix. *Energy Economics*, 29(4), 609-635.
- Lora, E. (2008). *Técnicas de medición económica. Metodología y aplicaciones en Colombia*. Bogotá, D.C.: Alfaomega Colombiana, S.A.
- Ma, C., y Stern, D. I. (2006). Environmental and ecological economics: A citation analysis. *Ecological Economics*, 58(3), 491-506.
- Martín-Vide, J., LLebot, R., Padilla, E., y Alcántara, V. (2007). Actividad económica y emisiones de CO2 en España *Aspectos económicos del cambio climático en España* (pp. 42-64). Barcelona: Estudios Caixa Catalunya.
- MINMINAS - Ministerio de Minas y Energía. (2011). *Balances Energéticos Nacionales de Colombia 1975-2009 (serie actualizada y revisada)*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética
- MINMINAS -Ministerio de Minas y Energía. (2007). *Plan Energético Nacional 2006-2025*. Bogotá, D.C.: UPME.

- OEE -Office of Energy Efficiency. (2006). *Energy efficiency trends in Canada 1990-2004*. Ottawa: Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency.
- Paul, S., y Bhattacharya, R. N. (2004). CO2 emission from energy use in India: a decomposition analysis. *Energy Policy*, 32(5), 585-593.
- Robjohns, J. (2006). Methodology notes: annual chain-linking. *Economic Trends*, (630), 25-28.
- Roca, J. (2002). The IPAT formula and its limitations. *Ecological Economics*, 42, 1-2.
- Roca, J., Alcántara, V., y Padilla, R. E. (2007). Anàlisi del Metabolisme Energètic de l'Economia Catalana (AMEEC). Consum final d'energia. Barcelona: Estudi encarregat pel Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS). Generalitat de Catalunya.
- Roca, J., y Padilla, E. (2003). Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. La curva de Kuznets Ambiental y el protocolo de Kyoto. *Economía Industrial*.(351), 73-86.
- Saunders, H. (2009). Theoretical foundations of the rebound effect. In J. Evans & L. C. Hunt (Eds.), *International handbook on the economics of energy*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Estrategia Nacional de cambio climático. México: SEMARNAT.
- Serrano, M. (2008). *Economic Activity and Atmospheric Pollution in Spain: an Input Output Approach. Tesis Doctoral*. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona. Disponible en <http://hdl.handle.net/10803/2883>
- Sun, J. W. (1998). Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. *Energy Economics*, 20(1), 85-100.
- Tornqvist, L., Vartia, P., y Vartia, Y. O. (1985). How Should Relative Changes Be Measured? *The American Statistician*, 39(1), 43-46.
- Tuke, A. (2002). Analysing the effects of annual chain-linking on the output measure of GDP. *Economic Trends*, (581), 26-33.
- Tuke, A., y Beadle, J. (2003). The effect of annual chain-linking on Blue Book 2002 annual growth estimates. *Economic Trends*, (593), 29-40.
- United Nations. (1991). *Energy statistics: a manual for developing countries*. New York: United Nations Publication.
- United Nations. (1999). *System of National Accounts (SNA) 1993*. New York: United Nations Publication.
- United Nations, International Monetary Fund, World Bank, Organization for Economic Cooperation and Development, y Commission of the European Communities. (2009). *System of National Accounts 2008*. New York: Eurostat, IMF, OECD, UN, WB.
- UPME- Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). Propuesta de Objetivos del Plan Energético Nacional. Disponible en <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/plan-energetico-nacional-pen#sthash.3BM8xftW.dpuf>
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2010). *PEN 2010-2030 Informe final*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). Balance de Gas Natural en Colombia 2016-2025. Disponible en

http://www.upme.gov.co/SeccionHidrocarburos_sp/Publicaciones/2016/Balance_Gas_Natural_2016_2025.pdf

- Viguiet, L. (1999). Emissions of SO₂, NO_x and CO₂ in Transition Economies: Emission Inventories and Divisia Index Analysis. *The Energy Journal*, 20(2), 59-87.
- Wang, C., Chen, J., y Zou, J. (2005). Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957-2000. *Energy*, 30(1), 73-83.
- Weyman-Jones, T. (2009). The Theory of energy economics: an overview In J. Evans & L. C. Hunt (Eds.), *International handbook on the economics of energy*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Whelan, K. (2000). *Guide to the Use of Chain Aggregated NIPA Data*. Washington: Division of Research and Statistics Federal Reserve Board.
- Zhang, F. Q., y Ang, B. W. (2001). Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environment indicators. *Energy Economics*, 23(2), 179-190.
- Zhang, M., Mu, H., Ning, Y., y Song, Y. (2009). Decomposition of energy-related CO₂ emission over 1991-2006 in China. *Ecological Economics*, 68(7), 2122-2128.

Anexo

Anexo 1A.1. Resumen de los estudios más representativos que aplican la técnica de descomposición multiplicativa y aditiva

Autor y fecha	Indicador de polución	Año base	Período analizado	Tipo de dato	Técnica utilizada	Región/ País	Factores de descomposición	Sectores analizados
Alcántara y Roca, 1995	CO ₂ y Energía	1980	1980 -1990	Serie temporal	Descomposición aditiva (Laspeyres)	España	efecto consumo de energía final, efecto transformación de energía, efecto sustitución consumo final de energía y efecto interacción.	Sectores económicos, residencial y transporte
Sun , 1998	consumo de energía e intensidad energética		1973-1990	Serie temporal	Descomposición aditiva (modelo de descomposición completa)	Países en desarrollo (sin china), China, países desarrollados, Europa oriental y la antigua URSS y el mundo	efecto actividad, efecto intensidad, efecto estructura y total	-
Ang y Zhang, 1999	CO ₂ (total y per cápita)	-	1993	Datos transversales	Descomposición aditiva (AMDI, LMDI y índice de Laspeyres)	Norte América, Europa, OCDE, OCDE Pacífico, OCDE, Resto del Mundo, la Ex-Unión Soviética y Europa (Central y oriental)	efecto ingreso, efecto intensidad energética, efecto sustitución de combustible, y efecto población.	-
Viguiet, 1999	NO _x , SO ₂ y CO ₂		1971-2004	Serie de tiempo	Descomposición multiplicativa (Medodo índice divisia)	Hungría, Polonia, Rusia Francia, Reino Unido, y EE.UU	efecto factores de emision, composición del combustible (fuel mix), efecto estructura económica e efecto intensidad energética	Industria, transporte y otros sectores
Zhang y Ang, 2001	CO ₂		1993	Datos transversales	Descomposición aditiva (LM, RLM, AMDI, LMDI)	OECD, países Ex-Unión Soviática junto con Europa central y oriental, y resto del mundo	efecto sustitución, efecto intensidad energética, efecto ingreso, efecto población, y el efecto residual	Agricultura, transporte, industria y otros sectores.
Paul y Bhattacharya, 2004	CO ₂	1980	1980-1996	Serie temporal	Descomposición aditiva (Índice divisia convencional)	India	efecto coeficiente de polución, efecto intensidad energética, efecto estructura y efecto actividad económica	Industrial, residencial, agrícola, transporte, y otros sectores

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada. Índice Laspeyres (LM), índice Laspeyres refinado (RLM), índice Divisia de media logarítmica (LMDI), índice Divisia de media aritmética (AMDI).

Anexo 1A.1. Resumen de los estudios más representativos que aplican la técnica de descomposición multiplicativa y aditiva (Continuación).

Autor y fecha	Indicador de polución	Año base	Período analizado	Tipo de dato	Técnica utilizada	Región/ País	Factores de descomposición	Sectores analizados
Alcántara y Padilla, 2005	CO ₂	1971	1971-1990	Serie temporal	Descomposición multiplicativa (identidad Kaya)	Norteamérica, Europa OCDE, Pacífico OCDE, Asia (sin China), Latinoamérica, África, Europa no OCDE, Oriente Medio, Mundo, etc.	Índice de carbonización, intensidad energética, PIB per cápita y población.	-
Wang et al., 2005	CO ₂	1957	1957-1979 1979-2000	Serie temporal	Descomposición aditiva (LMDI)	China	Efecto intensidad energética, efecto ingreso, efecto composición combustibles fósiles, efecto entrada de combustibles libres de carbono	-
Kawase et al., 2006	CO ₂ (captura y almacenamiento)		1960-2000 2000-2050	Serie temporal	Descomposición aditiva y multiplicativa (identidad kaya)	Japón, Francia, Alemania, Reino Unido	efecto intensidad de carbonización, efecto eficiencia energética, efecto intensidad energética y efecto actividad económica	-
Lise Wietze, 2006	CO ₂ (total y per cápita)	1980	1980-2003	Serie temporal	Descomposición aditiva (identidad kaya)	Turquía	efecto escala, efecto intensidad energética, efecto intensidad de la emisión, efecto composición,	Agricultura, transporte, industria y servicios.
Ma y Stern, 2006	Intensidad energética		1980-2003	Serie temporal	Descomposición aditiva (LMDI)	China	Efecto sustitución de combustibles, efecto cambio tecnológico, efecto cambio estructural a nivel de subsectores, sectores e industrias y efecto total	-
Llebot, et al., 2007	CO ₂	1960	1960-2003	Serie temporal	Descomposición multiplicativa (identidad Kaya)	España	Efecto carbonización, efecto intensidad, efecto actividad, efecto estructura y efecto total	12 sectores económicos

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada. Índice Laspeyres (LM), índice Laspeyres refinado (RLM), índice Divisia de media logarítmica (LMDI), índice Divisia de media aritmética (AMDI).

Anexo 1A.1. Resumen de los estudios más representativos que aplican la técnica de descomposición multiplicativa y aditiva (Continuación).

Autor y fecha	Indicador de polución	Año base	Período analizado	Tipo de dato	Técnica utilizada	Región/ País	Factores de descomposición	Sectores analizados
Diakoulaki y Mandaraka, 2007	CO ₂	1990	1990-2003	Serie temporal	Descomposición aditiva (RLM, índice de disociación, Índice de reajuste de la disociación)	14 países de la Unión Europea	efecto producción, efecto intensidad energética, efecto estructura, efecto sustitución de combustibles y efecto composición de la utilidad	-
Hatzigeorgiou et al., 2008	CO ₂	1990	1990-2002	Serie temporal	Descomposición aditiva (AMDI, LMDI)	Grecia	efecto ingreso, efecto intensidad energética, efecto carbonización, y efecto población	-
Zhang et al., 2009	CO ₂	1991	1991-2006	Serie temporal	Descomposición aditiva y multiplicativa (identidad kaya)	China	efecto intensidad de CO ₂ , intensidad energética, cambio estructural y actividad económica	Agricultura, transporte, industria, otros sectores y total
Baležentis, A., Baležentis, T., y Streimikiene, D., 2011	Consumo de energía		1995-2009	Serie temporal	Descomposición L	Lituania	Efecto actividad, efecto estructura, y efecto intensidad	Agricultura, industria, transporte, y resto de la economía.
Duro y Padilla, 2013	Índice de Theil CO ₂ per cápita	2000	1990 - 2009	Serie temporal	Descomposición AMDI (identidad Kaya)	Unión Europea - 27 Norte de Europa, Sur de Europa y Europa del este	Efecto carbonización, efecto intensidad, efecto afluencia económica y efecto población	-
Lin y Long, 2014	Consumo de energía fósil	1981	1981-2010	Serie temporal	Descomposición LMDI	China	Efecto intensidad, efecto estructura, efecto productividad y efecto escala	Industria química
Zhao et al., 2014	Consumo de energía	2005	1965-2010 1980-2010	Serie temporal	Descomposición LMDI	Japón China	efecto producción, efecto intensidad y efecto estructura	Sector Industrial

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada. Índice Laspeyres (LM), índice Laspeyres refinado (RLM), índice Divisia de media logarítmica (LMDI), índice Divisia de media aritmética (AMDI).

Anexo 1A.2. Exposición de la metodología Alcántara y Roca (1995)

La estimación del vector de energía primaria total se base en la metodología Alcántara y Roca (1995a), quienes definen la matriz input-output de la energía mediante un cuadro de entradas y salidas de EP y secundaria³³ partiendo de la matriz de transformación de los balances energéticos. Las columnas indican industrias energéticas (fuentes de energía), y las filas muestran las transacciones energéticas. En los siguientes párrafos, las matrices se expresan en letras mayúsculas negritas, los vectores se definen como vectores columna y se expresan en minúsculas negritas, la transposición de un vector o matriz se expresa con el símbolo primo ('), la expresión de un vector como una matriz diagonal con el símbolo circunflejo (^), así:

$$(1.11) \quad \mathbf{Zu} + \mathbf{q} = \mathbf{e}$$

La matriz de consumo intermedio es \mathbf{Z} con dimensión $n \times n$, en este caso concreto de la energía, representa la *matriz de entradas en transformación*. En la matriz cada componente z_{ij} señala la cantidad de energía del tipo i que se transforma para obtener la energía del tipo j . El vector de energía total está representado por \mathbf{e} , el vector de energía final disponible es \mathbf{q} y \mathbf{u} es un vector columna unitario de dimensión $n \times 1$.

Al construir la matriz de entradas y salidas de energía, se debe tener en cuenta que en la matriz de transformación de los balances energéticos los productos figuran con signo positivo (de transformación) y los insumos figuran con signos negativos. Mayores detalles del procedimiento se encuentran en Alcántara (Alcántara y Roca, 1995a) y Roca et al. Asimismo, el consumo propio de las industrias energéticas, las pérdidas durante la transformación, las pérdidas de transmisión y de otra índole, presentan signo negativo. De igual forma, al definir los componentes que acompañan la demanda final se debe considerar las exportaciones, las transferencias y las diferencias estadísticas. El uso propio de cada industria de energía (valores negativos) de la matriz de transformación pasa a ser la diagonal (en valores positivos) de la matriz de consumo intermedio. Se incluyen asimismo en la matriz de

³³ La *energía secundaria* es aquella que resulta de la transformación (física, química o bioquímica) de los recursos energéticos naturales. El único origen posible es un centro de transformación. Son fuentes secundarias: la electricidad, y toda la cadena de derivados del petróleo, el carbón mineral y el gas.

consumo intermedio como EP la importación de refinados del petróleo y la importación de electricidad. Además, se debe tener presente en cada industria de energía (por columnas): las pérdidas de energía en distribución, la energía usada en transformación o autoproducción, según el caso.

Luego, los autores definen la matriz \mathbf{E} que representa la matriz de coeficientes técnicos, en este caso denominada *matriz de coeficientes de transformación*, acompañada del vector e_{ij} . En términos matriciales, esto es:

$$(1.12) \quad \mathbf{E}\mathbf{e} + \mathbf{q} = \mathbf{e}$$

La matriz de coeficientes de transformación muestra relaciones energéticas directas según la industria energética, y se obtiene de dividir la fila del cuadro de entradas y salidas por el vector de energía total, esto es:

$$(1.13) \quad \mathbf{E} = \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{e}})^{-1}$$

Ahora bien, para calcular los requerimientos directos e indirectos de energía para obtener una unidad de energía de cada tipo se estima la inversa de Leontief, esto se puede escribir matricialmente así:

$$(1.14) \quad \mathbf{e} = (\mathbf{I} - \mathbf{E})^{-1} \mathbf{q}$$

Donde \mathbf{I} es la matriz identidad, \mathbf{q} la demanda energética final y $(\mathbf{I} - \mathbf{E})^{-1}$ muestra la transformación de las formas de energía, y se origina a partir de realizar algunas operaciones algebraicas, a saber:

La inversa $(\mathbf{I} - \mathbf{E})^{-1}$ permite convertir el vector de consumo de energía final \mathbf{q} en un vector de energía total requerida \mathbf{e} . En el caso de Colombia las energías consideradas para estimar la inversa son: carbón y productos del carbón, Crudo, NGL y materias primas, energía hidroeléctrica, gas natural, electricidad, combustibles renovables y residuos, productos derivados del petróleo, e importación de electricidad y refinados del petróleo.

Posteriormente, para evitar la doble contabilidad se tienen en cuenta únicamente las filas de la matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{E})^{-1}$ que corresponde a diferentes fuentes de EP. Por lo tanto, la matriz \mathbf{E} de dimensión $n \times n$ se sustituye por la matriz \mathbf{EP} de dimensión $k \times n$ que contempla sólo las filas que corresponden estrictamente a EP. Esta consideración se hace porque las energías secundarias proceden de energías primarias. En este estudio, por lo tanto, se excluye la electricidad y los derivados del petróleo. La suma de las filas de la matriz \mathbf{EP} señala el consumo final de EP por sector, y por columnas el consumo final de energía secundaria.

Luego, para comprobar que el procedimiento realizado es correcto, se multiplica la matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{E})^{-1}$ por la demanda final de energía, y se debe obtener como resultado que la oferta total primaria es igual a la energía consumida.

De otro lado, los balances energéticos presentan los consumos finales de energía, en columnas las fuentes de energía (industrias energéticas) y en filas los diferentes usos según la rama de actividad económica. Por lo tanto, los datos del consumo final se toman directamente de los balances energéticos. En este sentido, es importante anotar que el uso no específico de la energía (ONONSPEC)³⁴ se agregó al sector comercio y servicios públicos del grupo otros sectores, y los usos de no energía (NETRANS y NEINTREN) referidos al transporte y la industria, se distribuyeron en forma proporcional en el sector de transporte y el sector de química y petroquímica, respectivamente (IEA, 2010b).

Por lo tanto, para estimar la EP que se debe proporcionar para abastecer la demanda final de energía de las ramas de actividad económica, se multiplica la matriz de demanda energética final \mathbf{Q} por la matriz \mathbf{EP} , donde cada elemento q_{ij} indica la cantidad de energía final de la fuente i demandada por la rama de actividad económica j , y de este modo, se obtiene la matriz \mathbf{C} de requerimientos directos e indirectos de \mathbf{EP} según fuente energética, donde cada elemento c_{ij} indica la cantidad de EP consumida de la fuente i demandada para la producción de la rama de actividad económica j . Después, se suman las columnas de la matriz \mathbf{C} , obteniendo como resultado el vector fila \mathbf{v} de consumos de EP total por cada sector (rama de

³⁴ Las abreviaturas corresponden a la descripción metodológica presentada en los documentos de la IEA (2014b).

actividad económica). A continuación, se expone un ejemplo del procedimiento para el año 2010 (ver anexo 1A.3 y anexo 1A.4).

Anexo 1A.3. Redefinición de los balances energéticos de la IEA de forma semejante a un modelo IO. Colombia 2010

Entradas y salidas de energía en Colombia. Colombia 2010

Millones de toneladas equivalentes de petróleo

No.	Producto / Flujo	Carbón y productos del carbón	Crudo, NGL y materias primas	Importación refinados de petróleo	Importación de electricidad	Energía Hidroeléctrica	Combustibles renovables y residuos	Gas Natural	Productos derivados del petróleo	Electricidad	Consumo intermedio	Exportaciones	Transferencias	Diferencias estadísticas	Consumo final de energía	Consumo total de energía
1	Carbón y productos del carbón	0.529234	0	0	0	0	0	0	0	1.043547	1.572781	0	0	0.552716	1.092158	3.21766
2	Crudo, NGL y materias primas	0	0.335998	0	0	0	0	0	15.572975	0	15.90897	0	0.266	1.364174	0.325908	17.865
3	Importación refinados de petróleo	0	0	0	0	0	0	0	2.487951	0	2.487951	0	0	0	0	2.48795
4	Importación de electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0.00086	0.00086	0	0	0	0	0	0.00086
5	Energía Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	3.474486	3.474486	0	0	0	0	0	3.47449
6	Combustibles renovables y n	0	0	0	0	0	0.020092	0	0.137727	0.157819	0	0	0	0.011297	3.144325	3.31344
7	Gas Natural	0	0	0	0	0	0	1.891808	0	2.304158	4.195966	0	0	0.451118	3.580084	8.22717
8	Productos derivados del petr	0	0	0	0	0	0	0	0.545848	0.143908	0.689756	6.13595	-0.26	0.13464	10.167215	16.8716
9	Electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0.882876	0.882876	0.06863	0	-0.173032	4.1065	4.88497	
	Consumos intermedios	0.529234	0.335998	0	0	0	0.020092	1.891808	18.606774	7.987562	29.37147	6.20458	0.01	2.340913	22.41619	60.3432
Usos totales de energía (primaria y secundaria)																
	Producción	48.327145	40.922808	0	0	3.474486	3.313441	9.422376	14.530604	4.884112						124.875
	Saldo importador	-45.109489	-23.074924	2.487951	0.00086	0	0	-1.19521	2.487951	0.00086						-64.402
	Variación de las reservas	0	0.017153	0	0	0	0	0	-0.146965	0						-0.1298
	Necesidades de energía	3.217656	17.865037	2.487951	0.00086	3.474486	3.313441	8.227167	16.87159	4.884972						60.3432

Matriz de relaciones energéticas directas (coeficientes técnicos de energía). Colombia 2010

Millones de toneladas equivalentes de petróleo

Producto / Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Carbón y productos del carbón			0	0	0	0	0	0	0.214
2 Crudo, NGL y materias primas	0	0.018807575	0	0	0	0	0	0.923029374	0
3 Importación refinados de petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0.147463914	0
4 Importación de electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Energía Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0.711
6 Combustibles renovables y n	0	0	0	0	0	0.006063787	0	0	0.028
7 Gas Natural	0	0	0	0	0	0	0.229946	0	0.472
8 Productos derivados del petr	0	0	0	0	0	0	0	0.032353082	0.029
9 Electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0.181
Consumos intermedios	0.164478168	0.018807575	0	0	0	0.006063787	0.229946	1.10284637	1.635

Matriz de relaciones energéticas totales (inversa de Leontief) de energía primaria. Colombia 2010

Millones de toneladas equivalentes de petróleo

Producto / Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Carbón y productos del carbón	1.196856817	0	0	0	0	0	0	0	0.312
2 Crudo, NGL y materias primas	0	1.01916808	0	0	0	0	0	0.97217493	0.035
3 Importación refinados de petróleo	0	0	1	0	0	0	0	0.152394341	0.005
4 Importación de electricidad	0	0	0	1	0	0	0	0	0.000
5 Energía Hidroeléctrica	0	0	0	0	1	0	0	0	0.868
6 Combustibles renovables y n	0	0	0	0	0	1.006100781	0	0	0.035
7 Gas Natural	0	0	0	0	0	0	1.298611	0	0.748
8 Productos derivados del petr	0	0	0	0	0	0	0	1.033434801	0.037
9 Electricidad	0	0	0	0	0	0	0	0	1.221

Matriz de necesidades totales de energía primaria (sin doble contabilidad). Colombia 2010

Millones de toneladas equivalentes de petróleo

Producto / Flujo	1	2	3	4	5	6	7	Energía final	Total*
1 Carbón y productos del carbón	1.196856817	0	0	0	0	0	0	0.312081	4.4
2 Crudo, NGL y materias primas	0	1.01916808	0	0	0	0	0	0.97217493	3.7
3 Importación refinados de petróleo	0	0	1	0	0	0	0	0.152394341	0.5
4 Importación de electricidad	0	0	0	1	0	0	0	0.000215	0
5 Energía Hidroeléctrica	0	0	0	0	1	0	0	0.868167	12.4
6 Combustibles renovables y n	0	0	0	0	0	1.006101	0	0.034624	4.4
7 Gas Natural	0	0	0	0	0	0	1.29861097	0.747659	7
Total Energía Primaria									32

* Prueba de verificación. El total de energía primaria en Balances Energéticos es 32 toe

Nota: Se sigue un procedimiento similar para cada año del periodo 1975-2010.

Fuente: Cálculos propios a partir de los balances energéticos de la IEA, 2014.

Anexo 1A.4. Tabla resumen del vector de energía primaria total. Colombia 1975-2010

Año	Agricultura, silvicultura y pesca	Alimentos y tabaco	Textiles y cueros	Madera y productos de madera	Papele impresión	Química y petroquímica	Minares no metálicos	Hierro, acero y metales no ferros	Industria no específica	Maquinaria y Equipo	Construcción	Otros sectores	Sector transporte terrestre	Sector transporte por agua	Sector transporte aéreo
1975	0.9077	0.9585	0.6292	0.0350	0.4096	0.7048	1.3681	0.2496	0.2722	0.0787	0.0685	1.3334	3.5338	0.0281	0.0450
1976	0.9793	1.0116	0.6867	0.0328	0.4346	0.7747	1.4160	0.2610	0.2254	0.0900	0.0999	1.4256	3.7593	0.0303	0.0412
1977	0.9834	1.0164	0.6677	0.0373	0.4515	1.0320	1.4700	0.2271	0.2178	0.0908	0.1073	1.1507	3.8607	0.0311	0.0431
1978	1.0625	1.0459	0.6889	0.0589	0.4944	1.1157	1.7645	0.2843	0.2332	0.1018	0.0962	1.0503	4.0842	0.0307	0.0426
1979	1.0922	1.1387	0.5841	0.0295	0.5027	1.1438	1.7415	0.2946	0.2529	0.1105	0.1175	1.0885	4.4999	0.0360	0.0437
1980	1.0958	1.1812	0.5158	0.0353	0.5009	1.1621	1.7742	0.3077	0.2619	0.1142	0.1402	1.4954	4.5882	0.0383	0.0448
1981	1.0819	1.1550	0.4886	0.0339	0.5071	1.5537	1.8142	0.2876	0.0257	0.1030	0.1561	1.2220	4.6796	0.0397	0.0476
1982	1.1556	1.1637	0.3977	0.0312	0.4868	1.5230	1.7490	0.3220	0.0250	0.1045	0.1841	1.4406	4.8530	0.0418	0.0459
1983	0.9495	1.2848	0.3872	0.0295	0.5578	1.5452	1.6048	0.4960	0.2020	0.1094	0.1412	1.3768	4.9972	0.0446	0.0427
1984	1.0575	1.1858	0.4305	0.0270	0.5995	1.6056	1.6580	0.5055	0.2124	0.1126	0.1761	1.3242	5.2726	0.0443	0.0336
1985	1.0671	1.4009	0.4559	0.0319	0.6533	1.3897	1.7390	0.5057	0.2239	0.1445	0.1391	1.4863	5.3410	0.0457	0.0317
1986	1.1855	1.3246	0.4348	0.0347	0.6274	1.4734	1.7252	0.5212	0.2078	0.1167	0.1686	1.7161	5.9791	0.0502	0.0348
1987	1.1546	1.4381	0.4431	0.0430	0.5633	1.3500	1.8289	0.4724	0.4123	0.2036	0.1009	2.0265	5.5906	0.0513	0.0254
1988	1.4300	1.3700	0.4534	0.0440	0.6358	1.5362	1.8584	0.4551	0.2127	0.1904	0.1058	1.9008	6.3476	0.0553	0.0407
1989	1.4583	1.3357	0.4272	0.0362	0.6119	1.6844	1.9497	0.5475	0.3219	0.1896	0.0874	1.6764	4.9605	0.0416	0.0402
1990	1.4742	1.5397	0.4516	0.0371	0.6629	1.5849	1.9958	0.4996	0.2183	0.1620	0.1111	1.6744	6.1377	0.1466	0.0267
1991	1.0895	1.6833	0.4748	0.0380	0.6940	1.8185	1.9796	0.5205	0.2854	0.2041	0.1026	1.7734	6.2548	0.1542	0.0260
1992	1.8462	1.3193	0.5901	0.0466	0.7739	1.7028	1.8816	0.5628	0.1966	0.2000	0.0537	2.2362	6.7118	0.1684	0.0324
1993	1.5744	1.4416	0.6129	0.0474	0.8294	2.7618	2.2324	0.5760	0.1763	0.2116	0.0493	2.2267	6.6072	0.1882	0.0234
1994	1.7174	1.4532	0.6090	0.1496	0.7512	2.8636	2.2819	0.6065	0.2411	0.2177	0.1065	2.8989	5.8607	0.1795	0.0201
1995	1.7657	1.4985	0.6990	0.1523	0.7960	2.9217	1.7837	0.9356	0.2770	0.3102	0.1228	2.1822	7.0502	0.2067	0.0236
1996	1.7039	1.5041	0.6985	0.1620	0.8149	3.2772	1.8969	0.9458	0.2917	0.2515	0.1260	2.2701	7.0052	0.2244	0.0229
1997	1.7159	1.6655	0.7883	0.1777	0.8777	3.2012	1.9775	0.9958	0.3157	0.3384	0.1361	2.2121	7.5501	0.1756	0.0472
1998	1.8726	1.6856	0.8009	0.1707	0.8831	3.4998	1.9861	1.0687	0.3251	0.3124	0.1371	2.4269	7.3342	0.1721	0.0457
1999	1.5289	1.4478	0.6570	0.1283	0.8065	3.2995	1.8913	0.8883	0.2677	0.2163	0.0994	2.3171	6.4838	0.1524	0.0443
2000	1.4053	1.4510	0.7531	0.0967	0.9270	3.4297	2.0565	1.0273	0.2580	0.3703	0.0670	2.3615	6.2818	0.1621	0.0422
2001	1.3889	1.4142	0.6743	0.0710	0.9111	3.5571	2.1214	0.9559	0.2216	0.3883	0.0679	1.8101	6.6109	0.1973	0.0417
2002	1.4664	1.3408	0.6810	0.1387	1.6911	3.4369	1.3520	0.8768	0.3158	0.4593	0.0711	1.9618	5.8980	0.1561	0.0404
2003	1.4553	1.4976	0.6441	0.0781	0.8336	3.7418	2.0792	0.9062	0.2886	0.2364	0.0696	2.0700	6.4039	0.2079	0.0431
2004	1.5321	1.3973	0.6272	0.0720	0.7962	3.5433	1.9859	0.8813	0.2741	0.2024	0.0753	1.8194	6.8212	0.1994	0.0410
2005	1.4667	1.4058	0.6280	0.0789	0.8168	3.5339	2.0743	0.8967	0.2688	0.1954	0.1415	1.8658	6.9984	0.2096	0.0394
2006	1.3803	1.4023	0.6054	0.0716	0.7483	3.4501	1.8343	0.8603	0.2764	0.1932	0.0670	1.9352	7.3935	0.2317	0.0398
2007	1.3893	1.5733	0.6506	0.0746	0.7999	3.5004	1.9569	0.9361	0.3084	0.2130	0.0918	2.0477	8.6150	0.2605	0.0435
2008	1.4733	1.6028	0.6445	0.0849	0.8287	3.8119	2.2562	0.9727	0.3349	0.1694	0.0984	1.9518	8.8915	0.2789	0.0449
2009	1.9565	1.5022	0.6529	0.0783	0.8596	3.3059	1.9998	0.9453	0.2164	0.1594	0.0572	2.3613	8.0301	0.2703	0.0383
2010	1.9279	1.4320	0.6264	0.0831	0.7180	3.1493	1.8561	0.8686	0.2497	0.2039	0.0846	2.5702	8.0827	0.2632	0.0370
Tasa de crecimiento promedio anual 1975-2010	2.11	1.12	-0.01	2.43	1.57	4.25	0.85	3.52	-0.24	2.68	0.59	1.84	2.32	6.41	-0.54

Fuente: Cálculos propios a partir de los datos estadísticos de la IEA (2014).

Anexo 1A.5. Tabla de Correspondencia CIU internacional y nacional adaptada para Colombia

Balances energéticos AIE CIU Rec 3.0 Naciones Unidas	Balances energéticos AIE CIU Rev. 4.0 Naciones Unidas	Cuentas Nacionales DANE CIU Rev. 3.1 Adaptada a Colombia	Sectores (Capítulo 1)	Simétrica (capítulo 3)
Agricultura/Silvicultura	Agricultura/Silvicultura/Pesca	01 Productos de café	Agricultura	Agricultura
División 01, 02	División 01 y 02	02 Otros productos agrícolas		
Pesca	Pesca	03 Animales vivos, productos animales y productos de la caza		
División 05	División 03	04 Productos de silvicultura, extracción de madera y actividades conexas		
		05 Productos de la pesca, la acuicultura y servicios relacionados		
Sectores sin asignación	Sectores sin asignación	06 Carbón mineral	Industria	Energía
		07 Petróleo crudo, gas natural y minerales de uranio y torio		
		27 Productos de la refinación del petróleo; combustible nuclear		
		38 Energía eléctrica		
		39 Gas domiciliario		
Alimentos y tabaco	Alimentos y tabaco	10 Carnes y pescados	Industria	Alimentos y tabaco
División 15 y 16	División 10,11 y 12	11 Aceites y grasas animales y vegetales		
		12 Productos lácteos		
		13 Productos de molinería, almidones y sus productos		
		14 Productos de café y trilla		
		15 Azúcar y panela		
		16 Cacao, chocolate y productos de confitería		
		17 Otros bienes manufacturados ncp		
		18 Bebidas		
		19 Productos de tabaco		
Textiles y cueros	Textiles y cueros	20 Fibras textiles naturales, hilazas e hilos; tejidos de fibras textiles, incluso afelpados	Industria	Textiles y cuero
División 17, 18 y 19	División 13, 14 y 15	21 Artículos textiles, excepto prendas de vestir		
		22 Tejidos de punto y ganchillo; prendas de vestir		
		23 Curtido y preparado de cueros, productos de cuero y calzado		
Madera y productos de madera División 20	Madera y productos de madera División 16	24 Productos de madera, corcho, paja y materiales trenzables	Industria	Madera y productos de
Papel, pulpa e impresión	Papel, pulpa e impresión	25 Productos de papel, cartón y sus productos		
División 21 y 22	División 17 y 18	26 Edición, impresión y artículos análogos		
Química y Petroquímica División	Química y Petroquímica División	28 Sustancias y productos químicos		
Minerales no metálicos División	Minerales no metálicos División	30 Productos minerales no metálicos		
Minas y canteras Div. 13	Minas (excluye combustibles)	08 Minerales metálicos		
Minas y Canteras Div. 14)	Minas (excluye combustibles)	09 Minerales no metálicos		
Hierro y Acero Grupo 271 y clase 2731 Metales no ferreos Grupo 272 y Clase 2732	Hierro y Acero Grupo 241 y clase 2431 Metales no ferreos Grupo 242 y Clase 2432	31 Productos metalúrgicos básicos (excepto maquinaria y equipo)		Hierro y metales no ferreos

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la IEA (2014) y el DANE.

<http://www.dane.gov.co/>

Anexo 1A.5. Tabla de correspondencia CIU internacional y nacional adaptada para Colombia (Continuación)

Balances energéticos AIE CIU Rec 3.0 Naciones Unidas	Balances energéticos AIE CIU Rev. 4.0 Naciones Unidas	Cuentas Nacionales DANE CIU Rev. 3.1 Adaptada a Colombia	Sectores (Capítulo 1)	Simétrica (capítulo 3)
Maquinaria y equipo División 28, 29, 30, 31 y 32	Maquinaria División 25, 26, 27, 28	32 Maquinaria y equipo	Industria	Industria no específica
Equipo de transporte División 29 y 30	Equipo de transporte 29 y 30	33 Otra maquinaria y suministro eléctrico 34 Equipo de transporte		
Industria no específica División 25, 33, 36 y 37	Industria no específica División 22, 31 y 32	29 Productos de caucho y de plástico 35 Muebles 36 Otros bienes manufacturados ncp 37 Desperdicios y desechos		
Construcción División 45	Construcción División 41, 42 y 43	41 Trabajos de construcción, construcción y reparación de edificaciones y servicios de arrendamiento de equipo con operario 42 Trabajos de construcción, construcción de obras civiles y servicios de arrendamiento de equipo con operario	Construcción	Construcción
Sector Transporte (incluye 61 Transporte por vía acuática)	Sector Transporte División 49, 50 y 51	46 Servicios de transporte terrestre 47 Servicios de transporte por vía acuática 48 Servicios de transporte por vía aérea	Transporte	Transporte terrestre Transporte por agua Transporte aéreo
Otros sectores Servicios públicos división 40 y 41	Otros sectores División 35 y 36	40 Agua	Otros sectores	Otros sectores
Otros sectores Comercio División 50, 51, y 52	Otros sectores Comercio División 45, 46 y 47	43 Comercio		
Otros sectores	Otros sectores	44 Servicios de reparación de automotores, de artículos personales y domésticos		
Otros sectores	División 55 y 56	45 Servicios de alojamiento, suministro de comidas y bebidas		
Otros sectores División 63	División 52	49 Servicios complementarios y auxiliares al transporte		
Otros sectores División 64	División 53	50 Servicios de correos y telecomunicaciones		
Otros sectores División 65, 66 y 67	División 64, 65 y 77	51 Servicios de intermediación financiera, de seguros y servicios conexos		
Otros sectores 70, 71, 72, 73 y 74	División 68, 69 - 75, 77 - 82	52 Servicios inmobiliarios y de alquiler de vivienda		
	Otros sectores	53 Servicios a las empresas excepto servicios financieros e inmobiliarios		
Otros sectores División 75	División 84	54 Administración pública y defensa; dirección, administración y control del sistema de seguridad social		
Otros sectores División 80	División 85	55 + 56 Servicios de enseñanza de mercado y enseñanza de mercado y no mercado		
Otros sectores División 85	Otros sectores	57 Servicios sociales y de salud de mercado		
Otros sectores División 90	División 86, 87 y 88	58 Servicios de alcantarillado y eliminación de desperdicios, saneamiento y otros servicios de protección del medio ambiente		
Otros sectores División 91, 92 y 93	División 86, 87 y 88	59 + 60 Servicios de asociaciones y esparcimiento, culturales, deportivos y otros servicios de mercado; Servicios de asociaciones y esparcimiento, cultur, deport. y otros servicios de no mercado		
Otros sectores División 95	División 91 División 93 División 94, 95 y 96 División 97, 98 y 99	61 Servicios domésticos		

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la IEA (2014) y el DANE.

<http://www.dane.gov.co/>

Anexo 1A.6. Descomposición en seis factores del crecimiento de las emisiones de CO₂ de Colombia 1971 – 2010

Año	Total Oferta de Energía primaria							Efectos factores Kaya							Efectos factores Kaya (%)							
	CO ₂ Sectoral (Mton CO)	PIB (billones 2005 US\$ PPP)	Energía primaria fosil (Mtep)	Energía primaria (Mtep)	Energía final total (Mtep)	Población (Millones) CO	CO ₂ -t - CO ₂ t-1	Efecto carboniza- ción	Efecto sustitución	Efecto transforma- ción	Efecto intensidad energética	Efecto afluencia	Efecto población	Efecto total factores CO2	Efecto carboni- zación	Efecto sustitu- ción	Efecto transforma- ción	Efecto intensidad energética	Efecto afluencia	Efecto población	Efecto total CO ₂	
	1971	26.68	88.21	8.86	13.85	11.63	23.07															
1972	27.33	94.97	9.43	13.86	11.30	23.62	0.65	-1.06	1.68	0.80	-2.77	1.36	0.64	0.65	-162.3	258.6	123.2	-425.8	208.6	97.8	100	
1973	28.64	101.4	9.86	13.95	11.18	24.17	1.96	-1.01	2.78	1.29	-4.94	2.55	1.29	1.96	-51.6	142.0	65.7	-252.3	130.4	65.7	100	
1974	30.75	107.2	10.69	14.77	11.88	24.73	4.07	-1.32	3.56	1.24	-4.98	3.59	1.99	4.07	-32.4	87.3	30.3	-122.2	88.2	48.9	100	
1975	28.32	109.6	10.34	15.44	12.45	25.30	1.64	-2.62	1.29	1.10	-4.09	3.43	2.54	1.64	-160.0	78.4	67.2	-249.6	209.2	154.7	100	
1976	30.04	114.9	10.91	16.05	12.93	25.89	3.36	-2.56	1.74	1.17	-4.48	4.21	3.27	3.36	-76.2	51.9	34.9	-133.4	125.5	97.3	100	
1977	30.99	119.6	11.24	16.53	13.20	26.49	4.31	-2.54	1.77	1.45	-5.14	4.79	3.98	4.31	-58.9	41.1	33.6	-119.1	111.1	92.2	100	
1978	33.10	129.8	10.87	16.46	13.67	27.11	6.42	0.32	0.96	0.32	-6.68	6.69	4.80	6.42	5.0	14.9	5.0	-104.0	104.2	74.9	100	
1979	33.52	136.8	10.28	16.07	13.84	27.73	6.84	2.36	0.02	-0.76	-7.92	7.63	5.51	6.84	34.5	0.3	-11.1	-115.8	111.5	80.6	100	
1980	35.03	142.4	11.75	17.71	14.38	28.36	8.35	-0.31	1.13	1.02	-8.16	8.34	6.33	8.35	-3.7	13.5	12.2	-97.8	100.0	75.8	100	
1981	35.19	145.6	12.02	17.94	14.27	28.99	8.51	-0.89	1.45	1.65	-9.10	8.38	7.02	8.51	-10.5	17.1	19.4	-107.0	98.5	82.5	100	
1982	35.74	147	12.32	18.45	14.64	29.62	9.06	-1.16	1.34	1.75	-8.69	8.07	7.75	9.06	-12.8	14.8	19.3	-95.9	89.1	85.5	100	
1983	37.63	149.3	12.91	19.05	14.99	30.27	10.95	-1.05	1.86	2.07	-8.67	8.10	8.65	10.95	-9.6	17.0	18.9	-79.2	74.0	79.0	100	
1984	38.00	154.3	13.26	19.69	15.43	30.91	11.32	-1.60	1.67	2.20	-8.84	8.53	9.36	11.32	-14.1	14.7	19.5	-78.1	75.4	82.7	100	
1985	39.57	159.1	13.29	19.99	15.88	31.56	12.89	-0.39	1.28	1.81	-9.10	9.03	10.25	12.89	-3.0	9.9	14.1	-70.6	70.1	79.5	100	
1986	40.26	168.3	14.76	21.76	16.34	32.22	13.58	-3.282	1.95	3.69	-10.11	10.30	11.03	13.58	-24.2	14.3	27.2	-74.5	75.9	81.2	100	
1987	42.63	177.4	15.23	22.50	17.15	32.88	15.95	-2.50	1.95	3.28	-10.55	11.72	12.06	15.95	-15.7	12.2	20.6	-66.1	73.4	75.6	100	
1988	43.42	184.6	15.64	23.18	17.74	33.54	16.74	-2.81	1.85	3.18	-10.86	12.52	12.86	16.74	-16.8	11.1	19.0	-64.9	74.8	76.8	100	
1989	45.22	190.9	15.56	23.37	18.59	34.21	18.54	-1.26	1.43	1.89	-10.64	13.28	13.84	18.54	-6.8	7.7	10.2	-57.4	71.6	74.7	100	
1990	46.23	202.4	16.32	24.22	18.92	34.88	19.55	-2.19	1.86	2.57	-12.24	14.84	14.70	19.55	-11.2	9.5	13.2	-62.6	75.9	75.2	100	
1991	48.02	207	16.71	24.49	19.31	35.55	21.34	-1.70	2.35	2.28	-12.58	15.28	15.70	21.34	-8.0	11.0	10.7	-58.9	71.6	73.6	100	
1992	50.08	217.5	17.73	25.05	19.25	36.22	23.40	-2.40	3.79	3.28	-14.80	16.77	16.76	23.40	-10.3	16.2	14.0	-63.3	71.7	71.6	100	
1993	55.68	222.6	18.43	26.20	20.87	36.90	29.00	0.11	3.77	2.07	-13.44	17.97	18.51	29.00	0.4	13.0	7.1	-46.3	62.0	63.8	100	
1994	56.11	235.6	18.76	27.12	21.93	37.58	29.43	-0.29	3.12	1.50	-13.79	19.57	19.32	29.43	-1.0	10.6	5.1	-46.9	66.5	65.6	100	
1995	58.41	247.9	19.18	27.60	22.50	38.26	31.73	0.43	3.38	1.19	-15.11	21.35	20.48	31.73	1.4	10.7	3.8	-47.6	67.3	64.6	100	
1996	59.26	253	19.76	28.27	23.46	38.95	32.58	-0.19	3.64	0.48	-14.36	21.63	21.38	32.58	-0.6	11.2	1.5	-44.1	66.4	65.6	100	
1997	63.23	261.6	20.81	27.43	22.29	39.63	36.55	0.37	7.24	1.38	-18.49	23.13	22.92	36.55	1.0	19.8	3.8	-50.6	63.3	62.7	100	
1998	64.27	263.1	22.19	28.73	22.14	40.32	37.59	-1.69	8.09	3.66	-19.20	22.85	23.87	37.59	-4.5	21.5	9.7	-51.1	60.8	63.5	100	
1999	56.75	252.1	18.89	25.69	20.90	41.00	30.07	-0.11	5.57	1.27	-18.48	18.92	22.91	30.07	-0.4	18.5	4.2	-61.5	62.9	76.2	100	
2000	59.18	263.2	19.62	25.81	21.13	41.68	32.50	0.04	7.06	1.04	-20.24	20.46	24.13	32.50	0.1	21.7	3.2	-62.3	63.0	74.3	100	
2001	59.35	267.6	19.71	25.71	21.17	42.35	32.67	-0.02	7.42	0.80	-20.88	20.53	24.82	32.67	-0.1	22.7	2.5	-63.9	62.8	76.0	100	
2002	57.22	274.3	18.89	25.20	20.85	43.02	30.54	0.22	6.36	0.59	-22.04	20.47	24.94	30.54	0.7	20.8	1.9	-72.2	67.0	81.7	100	
2003	56.53	285.1	19.04	25.74	21.07	43.68	29.85	-0.57	5.80	1.01	-23.01	21.25	25.38	29.85	-1.9	19.4	3.4	-77.1	71.2	85.0	100	
2004	56.74	300.3	19.48	26.00	21.33	44.32	30.06	-1.34	6.32	0.92	-24.63	22.79	26.01	30.06	-4.5	21.0	3.1	-81.9	75.8	86.5	100	
2005	58.05	314.4	20.56	27.08	21.69	44.95	31.37	-2.62	6.93	1.91	-26.14	24.37	26.92	31.37	-8.4	22.1	6.1	-83.3	77.7	85.8	100	
2006	58.14	335.5	21.53	28.57	22.24	45.56	31.46	-4.42	6.64	3.05	-27.76	26.47	27.48	31.46	-14.0	21.1	9.7	-88.2	84.1	87.4	100	
2007	58.42	358.6	20.68	27.92	22.49	46.12	31.74	-2.60	5.96	1.69	-30.10	28.74	28.05	31.74	-8.2	18.8	5.3	-94.8	90.6	88.4	100	
2008	59.28	371.3	21.80	29.21	23.52	45.01	32.60	-4.17	6.31	1.71	-29.94	31.40	27.29	32.60	-12.8	19.4	5.2	-91.8	96.3	83.7	100	
2009	62.17	377.5	23.85	30.82	22.48	45.65	35.49	-6.07	8.01	5.89	-33.33	32.36	28.63	35.49	-17.1	22.6	16.6	-93.9	91.2	80.7	100	
2010	62.24	392.6	25.51	32.24	22.42	46.30	35.56	-8.86	8.96	7.91	-35.13	33.43	29.24	35.56	-24.9	25.2	22.3	-98.8	94.0	82.2	100	

Fuente: Elaboración propia. Datos estadísticos de la base de la IEA (2014).

Anexo 1A.7. Descomposición en dos factores de la intensidad energética. Colombia 1971 – 2010

Año	Efecto estructura					Efecto intensidad					Efecto estructura Sectores	Efecto intensidad Sectores	Efecto total Sectores
	Agricultura	Industria	Construcción	Otros sectores	Transporte	Agricultura	Industria	Construcción	Otros sectores	Transporte			
1975	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1976	0.999	0.999	1.000	1.000	1.005	1.004	1.003	1.002	1.003	1.001	1.003	1.012	1.015
1977	0.998	0.988	1.001	1.001	1.020	1.001	1.019	1.002	0.973	0.981	1.007	0.976	0.983
1978	0.999	0.994	1.000	1.002	1.034	1.002	1.037	1.002	0.959	0.968	1.029	0.966	0.995
1979	0.999	0.997	0.999	1.002	1.044	1.001	1.015	1.003	0.959	0.977	1.042	0.956	0.996
1980	0.996	0.992	1.000	1.001	1.038	0.997	0.987	1.004	0.981	0.961	1.027	0.932	0.958
1981	0.997	0.960	1.000	1.003	1.043	0.995	1.025	1.004	0.959	0.961	1.002	0.944	0.946
1982	0.994	0.952	1.001	1.004	1.056	1.001	1.010	1.006	0.971	0.952	1.003	0.941	0.944
1983	0.994	0.942	1.001	1.003	1.044	0.984	1.041	1.002	0.966	0.966	0.982	0.957	0.940
1984	0.993	0.956	1.002	1.000	1.041	0.991	1.019	1.003	0.961	0.973	0.990	0.948	0.938
1985	0.991	0.951	1.002	0.998	1.031	0.990	1.022	1.001	0.970	0.975	0.973	0.958	0.932
1986	0.989	0.950	1.002	0.996	1.012	0.996	0.993	1.002	0.981	1.013	0.949	0.984	0.934
1987	0.990	0.954	1.000	0.996	1.006	0.989	0.985	0.999	0.994	0.977	0.947	0.945	0.895
1988	0.987	0.942	1.001	0.997	1.000	1.005	0.980	0.998	0.980	1.011	0.928	0.974	0.904
1989	0.988	0.955	1.000	0.996	1.000	1.002	0.967	0.998	0.963	0.967	0.939	0.900	0.846
1990	0.990	0.963	0.999	0.997	1.002	0.997	0.946	1.000	0.958	0.972	0.952	0.878	0.836
1991	0.992	0.946	1.000	0.998	0.994	0.972	0.978	0.999	0.959	0.975	0.931	0.888	0.826
1992	0.989	0.932	1.000	1.001	1.009	1.013	0.962	0.996	0.978	0.975	0.931	0.925	0.861
1993	0.987	0.898	1.000	1.003	0.998	0.997	1.061	0.995	0.970	0.965	0.887	0.985	0.874
1994	0.984	0.878	1.001	1.007	0.994	1.002	1.072	0.997	0.989	0.918	0.865	0.973	0.842
1995	0.983	0.875	1.000	1.007	0.996	1.001	1.061	0.998	0.953	0.952	0.862	0.961	0.829
1996	0.979	0.860	0.999	1.010	1.002	1.002	1.094	0.999	0.951	0.941	0.851	0.979	0.834
1997	0.976	0.850	0.999	1.012	1.011	1.003	1.115	0.999	0.945	0.943	0.848	0.996	0.845
1998	0.975	0.846	0.999	1.011	1.017	1.009	1.134	1.000	0.954	0.927	0.847	1.011	0.857
1999	0.978	0.830	0.997	1.010	1.027	0.994	1.121	1.000	0.953	0.895	0.841	0.949	0.798
2000	0.981	0.862	0.998	1.010	1.026	0.984	1.107	0.998	0.953	0.883	0.875	0.915	0.801
2001	0.982	0.868	0.998	1.009	1.034	0.982	1.090	0.998	0.929	0.886	0.887	0.879	0.780
2002	0.983	0.865	0.998	1.010	1.033	0.982	1.079	0.997	0.932	0.850	0.885	0.837	0.740
2003	0.982	0.871	0.998	1.009	1.036	0.979	1.054	0.997	0.934	0.859	0.894	0.825	0.737
2004	0.980	0.884	0.999	1.008	1.045	0.981	0.992	0.997	0.919	0.850	0.911	0.758	0.691
2005	0.979	0.883	0.998	1.008	1.056	0.976	0.978	1.000	0.917	0.835	0.919	0.730	0.671
2006	0.977	0.887	0.999	1.008	1.073	0.970	0.930	0.996	0.913	0.817	0.937	0.670	0.627
2007	0.976	0.892	0.999	1.008	1.092	0.969	0.926	0.996	0.914	0.827	0.957	0.675	0.646
2008	0.973	0.880	0.999	1.008	1.096	0.973	0.951	0.996	0.909	0.824	0.944	0.690	0.652
2009	0.967	0.859	1.000	1.010	1.081	0.993	0.930	0.994	0.917	0.803	0.907	0.676	0.613
2010	0.964	0.855	0.999	1.010	1.091	0.992	0.902	0.995	0.918	0.786	0.908	0.642	0.583

Fuente: Elaboración propia. Datos estadísticos de la base de la IEA (2014) y de las cuentas nacionales del DANE (2014).

Capítulo 2: Relación entre energía, emisiones de CO₂ y PIB per cápita en Colombia

Resumen

Este capítulo analiza cómo se relacionan dos indicadores de presión ambiental (emisiones de CO₂ per cápita y energía primaria per cápita) con el PIB per cápita y otras variables relevantes, durante el período 1971-2011, contrastando la hipótesis de la CKA (Grossman y Krueger, 1995). Asimismo, se examina la estabilidad de estas relaciones y se determinan sus respectivas elasticidades de corto y largo plazo. Para lograr estos propósitos, se estiman dos modelos econométricos dinámicos de ajuste parcial (Agras y Chapman, 1999; De Bruyn et al., 1998; Medlock y Soligo, 2001; Pindyck y Rubinfeld, 1998). Se calculan intervalos de confianza para las elasticidades de largo plazo mediante simulaciones usando una metodología alternativa a la convencional. El trabajo cubre necesidades de investigación sugeridas en la literatura en lo referente a estudios a nivel de país (Dijkgraaf y Vollebergh, 2005; Piaggio y Padilla, 2012) y realiza un aporte a la literatura desarrollada para Colombia, porque contrasta la CKA a nivel nacional, usa una serie de tiempo extensa y toma en cuenta la composición de las fuentes de energía, aspectos que no han sido considerados en las publicaciones revisadas del país.

En el estudio se encontró que la relación entre los indicadores de presión ambiental (emisiones de CO₂ per cápita y consumo de energía per cápita) y la actividad económica, representada por el PIB per cápita lineal y el PIB per cápita cuadrático, presentan signo positivo y negativo, respectivamente, sugiriendo la existencia de lo que en la literatura se conoce como una CKA. Los resultados señalan los puntos de inflexión dentro el rango de muestra reflejando una aparente desvinculación absoluta para ambos indicadores.

Entre los hallazgos destacados favorables al medio ambiente sobresalen: i) el cambio en la composición de las fuentes energéticas primarias tanto en el ahorro de energía primaria como en la disminución en la generación de emisiones de CO₂; y ii) el impacto favorable de la regulación llevada a cabo por parte del gobierno, a partir de 1998, orientada a controlar la contaminación ambiental y la generación de emisiones de CO₂ por el uso de energía intensiva en combustibles fósiles en el sector transporte e industria.

2.1. Introducción

La economía colombiana se vio muy afectada por la fuerte crisis energética que hubo en el país entre el 2 de marzo de 1992 y el 1 de abril de 1993, causada por el fenómeno de El Niño. Éste provocó fuertes sequías en todo el país, afectando seriamente a los embalses generadores de energía hidroeléctrica, situación que se agravó debido a los problemas de infraestructura que las hidroeléctricas tenían en ese momento. Estos hechos generaron apagones constantes en todo el país y obligaron al gobierno a desarrollar un Plan de Emergencias Energético y formular periódicamente estrategias nacionales de abastecimiento de energía. Entre las medidas importantes promovidas por el gobierno estuvo la diversificación de la oferta energética, mediante el uso de alternativas compatibles con el desarrollo sostenible (en aspectos ambientales, económicos, y sociales), como el gas natural, la hidroeléctricas y los biocombustibles³⁵. Unido a esta coyuntura, a finales de 1992 se introdujeron las nuevas leyes de Servicios Públicos y Eléctricos de la Constitución Política de 1991. Este nuevo contexto modificó el mercado energético y permitió enfrentar mejor el otro fenómeno de El Niño de 1997 (Jaimes, 1992; MINMINAS, 2007; Nullvalue, 1993; UPME, 2003; UPME, 2009).

En la actualidad, este impulso del desarrollo energético sigue vigente. El Plan de Desarrollo 2015-2018 tiene entre sus propósitos avanzar hacia un crecimiento sostenible y bajo en carbono, mediante el uso de fuentes de energías limpias y no convencionales, en el marco de un crecimiento verde (DNP, 2015).

En Colombia, la evolución de la energía primaria durante el período 1971-2011 presenta un descenso importante después de 1996. Durante este período aumenta la generación de electricidad a partir de gas natural e hidroeléctricas, con tasas de crecimiento del 5.1% y 4.9%, respectivamente, y disminuye el uso de productos del petróleo para la producción de electricidad, con una tasa de crecimiento del -5.1%, elementos que contribuyen conjuntamente al descenso del consumo de energía primaria total. También se redujo la oferta del carbón y de otras energías procedentes de combustibles fósiles y sus derivados. El mayor peso del gas natural, en detrimento de los combustibles fósiles más contaminantes,

³⁵ Ley 693 de 2001 y Ley 939 de 2004

podría explicar el comportamiento de las emisiones de CO₂ que pasaron de 1.67 t CO₂/hab. en 1997 a 1.42 t CO₂/hab. en el 2011. En Latinoamérica, estos valores corresponden a 1.84 t CO₂/hab. y 2.46 t CO₂/hab., respectivamente³⁶. Asimismo, resulta relevante destacar que, en el país, la tasa de crecimiento económico promedio anual del período 1971-2011, fue del 3.8%, revelando un crecimiento importante, excepto para el año 1999 cuyo crecimiento fue negativo, del -4.3%. De acuerdo con Ocampo (1998) y Esguerra-Roa et al. (2005), la economía colombiana presenta cambios en la estructura productiva, hacia una terciarización, siendo importante el surgimiento de nuevas actividades económicas, en especial las relacionadas con la industria manufacturera y de servicios (transporte, sector financiero, comunicaciones y servicios públicos de suministro -electricidad, gas y agua-). Un elemento que ha impedido una mayor disminución de la participación del sector primario en el PIB, ha sido los hallazgos de ferroníquel, carbón y petróleo, y el aumento de las exportaciones de los dos últimos, que corresponden a 12.43% y 53% en el 2014, respectivamente (DANE, 2015). La contribución del petróleo y la minería al PIB equivale al 7.7% en el 2014 (DANE, 2015). Las estadísticas sugieren que sería interesante conocer en mayor detalle qué relación tiene el descenso en el consumo de algunas energías y los cambios en la generación de emisiones, con respecto al comportamiento del PIB per cápita.

El análisis de la relación entre el consumo de energía y el PIB, y la generación de emisiones y el PIB, han sido objeto de una intensa investigación durante las últimas décadas. La revisión de la literatura señala que el debate sobre la relación entre el crecimiento y el medio ambiente tomó mayor relevancia a partir de 1972, con la presentación por parte del Club de Roma del informe “Los Límites del Crecimiento” (Meadows et al., 1972).

El interés por analizar la relación entre economía y energía aumenta a comienzos de la década de los 70's, debido a la crisis del petróleo y su impacto en la economía mundial. En la década de los 80's, la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en el informe “Nuestro Futuro Común”, impulsa la idea sobre la necesidad de un crecimiento económico basado en políticas de sostenibilidad ambiental. Para el caso de la energía, se subraya la necesidad de un crecimiento económico menos intensivo en el consumo de energía, acompañado de políticas de eficiencia energética a nivel nacional (WCED, 1987).

³⁶ Estimaciones realizadas a partir de los datos de IEA (2010).

Posteriormente, a comienzos de la década de los 90's varios estudios encuentran que para algunas sustancias contaminantes se da una desvinculación con el crecimiento económico a partir de cierto nivel de renta per cápita (Grossman y Krueger, 1993, 1995; Panayotou, 1993; Selden y Song, 1994; Shafik y Bandyopadhyay, 1992). Este hallazgo recibe el nombre de hipótesis de la curva de Kuznets ambiental (CKA). Esta hipótesis ha llevado a algunos autores a plantear que la solución a los problemas ambientales pasaría por fomentar el crecimiento (Beckerman, 1992).

La mayoría de los primeros trabajos analizaron la hipótesis para grupos de países con datos de panel o de corte transversal. No obstante, algunos trabajos sugieren realizar estudios a nivel de país con el fin de desarrollar un análisis a mayor profundidad de la relación que se da en cada país (De Bruyn et al., 1998; Piaggio y Padilla, 2012). Además, se ha encontrado evidencia de que la relación entre la degradación ambiental y los ingresos puede ser diferente para distintos países, en aspectos como: la forma funcional, los parámetros y los puntos de inflexión (Dijkgraaf y Vollebergh, 2005; Piaggio y Padilla, 2012). Se han realizado estudios para distintos países, analizados de forma individual, como Austria (Friedl y Getzner, 2003), China (Jalil y Feridun, 2011), Suecia (Kriström y Lundgren, 2005), Malasia (Vincent, 1997), España (Roca y Alcántara, 2001; Roca y Padilla, 2003; Roca et al., 2001).

El análisis del caso de Colombia del presente trabajo permite hacer una contribución a la literatura en este sentido, porque realiza una estimación a nivel de país contrastando la CKA. Se diferencia del trabajo de Colombia elaborado por Correa-Restrepo et al., (2005) en que se utiliza una serie de tiempo más extensa, y se estima un modelo dinámico para la energía y las emisiones de CO₂. El modelo usado permite realizar un análisis más adecuado sobre la complejidad de la relación entre la economía, la energía y las emisiones de CO₂, porque toma en cuenta el comportamiento pasado y la composición de las fuentes energéticas. El trabajo pretende contribuir a que se pueda realizar una mejor planificación del uso de la energía y el control de las emisiones, sin afectar el crecimiento económico. Así se expresa en el Plan Energético Nacional 2006-2025 y en el Plan Visión Colombia 2019. Por las razones expuestas, en el presente capítulo se propone lo siguiente:

i) Conocer cómo se relacionan en Colombia el PIB per cápita con el consumo de energía per cápita y con las emisiones de CO₂ per cápita, durante el período 1971-2011, contrastando la hipótesis de la CKA para el período mencionado; ii) identificar la presencia de estabilidad o

cambio estructural en la relación entre el PIB per cápita y el consumo de energía y la generación de emisiones de CO₂; y iii) Determinar las elasticidades de esta relación, y de otras variables que el análisis determine como relevantes, en la generación de emisiones de CO₂ y el consumo de energía primaria.

Se estiman dos modelos de ajuste parcial (MAP), mediante los cuales se da respuesta a los interrogantes mencionados anteriormente, y se contrasta la hipótesis de la CKA. A diferencia de los trabajos realizados con ecuaciones estáticas, en el presente estudio se utiliza una ecuación dinámica para estimar el modelo MAP y se consideran variables diferentes al ingreso con el fin de evaluar no solo aspectos relacionados con el vínculo entre ingreso y emisiones de CO₂ y el consumo de energía, sino también variables socioeconómicas y cambios estructurales y/o tecnológicos que puedan influir en el comportamiento de las emisiones y el consumo de la energía. Además, se aplica una metodología alternativa a la convencional basada en simulaciones, sugerida por el profesor Raymond-Bara, para estimar los intervalos de confianza de las elasticidades de largo plazo.

La sección 1 presenta una pequeña introducción. La sección 2 presenta un breve marco de referencia conceptual y empírico sobre la relación entre el nivel de actividad económica y la presión ambiental, así como las principales críticas acerca de la hipótesis de la CKA y su evidencia empírica. La sección 3 explica el origen de los datos y la metodología. La sección 4 presenta el modelo y el análisis de resultados. Por último, la sección 5 expone las conclusiones. Se anexa tablas de los cálculos realizados y las pruebas estadísticas aplicadas.

2.2 Marco de referencia

2.2.1. Marco de referencia conceptual

La CKA debe su nombre a su analogía con el planteamiento desarrollado por Kuznets (1955, 1963), que reflejaba la relación encontrada entre el ingreso y su distribución (Stern et al., 1996)³⁷. En cuanto a la hipótesis de la CKA, ésta revelaría una relación entre el ingreso y la degradación ambiental en forma de U invertida.

³⁷ El planteamiento de la curva de Kuznets tiene su origen con Simón Kuznets (1901-1985). El autor advierte cambios en la desigualdad del ingreso, siendo mayor en las primeras fases del crecimiento económico cuando la transición de la etapa preindustrial a la industrial fue más rápida, llegando a ser estable por un tiempo y reduciéndose luego en las últimas fases. El autor indica que no hay evidencia empírica disponible para

La hipótesis de la CKA postula la existencia de una forma de U invertida en la relación entre los diferentes contaminantes y el ingreso per cápita. Existen varios estudios empíricos que parecen apoyar la hipótesis de que en las primeras etapas del crecimiento de la economía se incrementan los problemas ambientales, pero después de alcanzar un cierto nivel de ingreso per cápita, se presenta una mejora de la calidad ambiental (Stern, 1998). Algunos autores (Grossman y Krueger, 1993, 1995; Panayotou, 1993; Selden y Song, 1994; Shafik y Bandyopadhyay, 1992), se encuentran entre los precursores que desarrollaron esta línea de investigación y que encontraron cierta evidencia de una relación en forma de U invertida entre crecimiento económico y algunas sustancias contaminantes. El informe anual del Banco Mundial de 1992 expuso varios gráficos mostrando la relación observada entre PIB y diferentes indicadores de calidad ambiental. Entre los factores que podrían jugar un rol importante en esta relación se encuentran la estructura sectorial, la eficiencia (referida a los insumos usados por unidad de producto), la sustitución de recursos escasos y el manejo de tecnologías limpias (World Bank, 1992). En el informe se menciona la necesidad de acompañar el crecimiento económico con políticas ambientales orientadas a la protección de los recursos.

Siguiendo a algunos autores (Ayres, 2008; Dinda, 2004; Lanegra y Morales, 2007; Nadal, 2007; Stern et al., 1996), la hipótesis se explica así: en la fase inicial de crecimiento de una región, la base productiva es pobre, caracterizándose por el desarrollo de la industria y por la existencia de actividades extractivas altamente contaminantes, de ahí que las emisiones se incrementen a medida que aumenta la producción. En la segunda fase, se logra un cierto umbral (punto de inflexión) donde el crecimiento económico permite adoptar nuevas tecnologías (que disminuyen desperdicios, reducen emisiones contaminantes, aumentan la productividad, etc.), que se traducen en mejoras en la eficiencia, lo que asegura un proceso productivo con menor uso de materiales y energía por unidad de producto. Además, en la economía se da una terciarización, que significa mayor participación del sector servicios (posiblemente menos contaminante)³⁸ e industria intensiva en información. Los mayores ingresos que perciben los agentes económicos se pueden traducir en una mayor preferencia

contrastar su conjetura, ni precisar las fechas de las fases mencionadas (Kuznets, 1955). Este planteamiento es lo que posteriormente se ha interpretado como la curva de Kuznets.

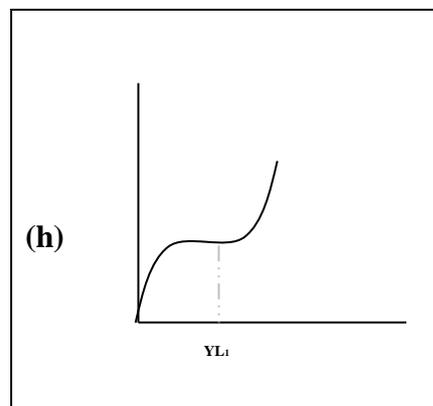
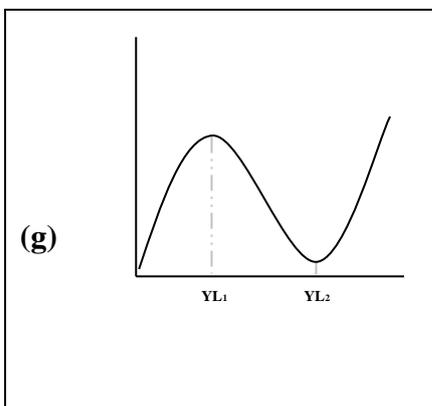
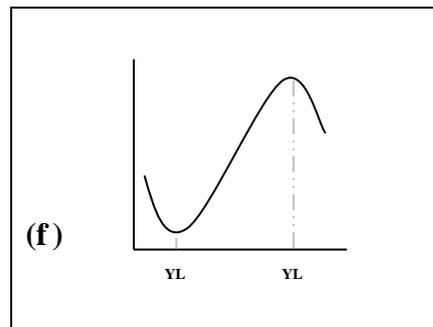
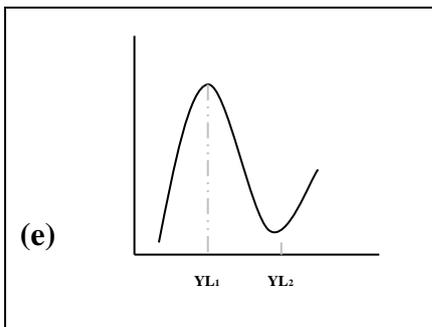
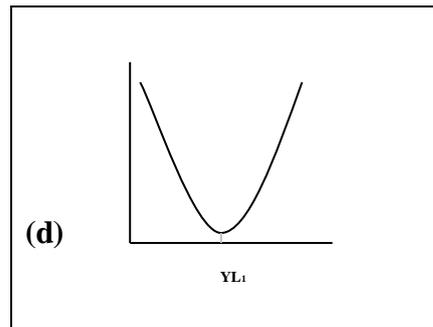
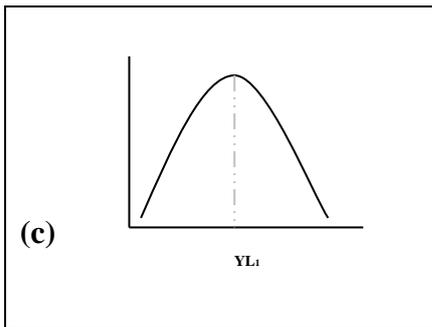
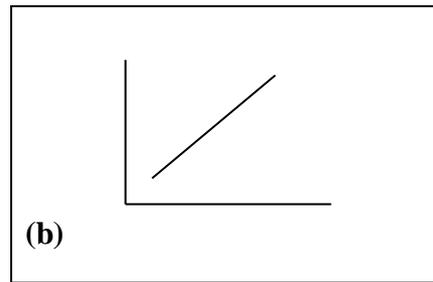
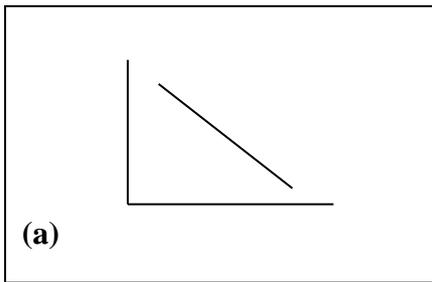
³⁸Alcántara y Padilla (2009) señalan que el sector servicios vincula diversas actividades que presentan fuertes impactos sobre el medio ambiente. Entre estas actividades, los autores subrayan la actividad del transporte como principal actividad responsable de las emisiones directas en España, también señalan las actividades de comercio, hostelería, inmobiliarias y servicios empresariales y la administración pública como responsables de emisiones directas e indirectas.

por la calidad ambiental, esto es que hay mayor disponibilidad para afrontar la degradación ambiental causada por el crecimiento económico (Carson et al., 1997; Grossman y Krueger, 1995; Nadal, 2007). La Figura 1 muestra las posibles formas que puede tomar la relación entre ingreso per cápita y presión ambiental, donde la gráfica c refleja la hipótesis de la CKA. De acuerdo con De Bruyn y Opschoor (1997), la desvinculación de la presión ambiental con respecto al crecimiento económico sugerida por la CKA podría ser una situación temporal, e incluso podría llegar a presentarse un período de revinculación causado por aumento de los costos, y/o agotamiento de las oportunidades de reducción de la presión ambiental, convirtiendo el crecimiento adicional en degradación ambiental. Este caso es el reflejado en el numeral (e) de la Figura 1.

De Bruyn y Opschoor (1997) distinguen dos formas de desvinculación o desmaterialización en una economía en crecimiento: i) desmaterialización débil (relativa), y ii) desmaterialización fuerte (absoluta). Desmaterialización débil, se caracteriza porque la intensidad de los materiales (cantidad de energía consumida por unidad de producto) o la intensidad de la contaminación (emisiones contaminantes generadas por unidad de producto) disminuyen. La desmaterialización fuerte se distingue porque el total de materiales consumidos o contaminantes es menor a lo largo del tiempo.

Para efectos de la conservación del medio ambiente, la desmaterialización fuerte es la relación más relevante porque implica que hay menos impacto total, pues puede haber desmaterialización débil y aumentar de forma importante la presión sobre los recursos naturales.

Figura 2.0. Posibles formas que puede tomar la relación entre la presión ambiental y el ingreso



Fuente: Tomado de De Bruyn y Opschoor (1997), Panayotou (1997) Ekins, (2000) y Gitli (2002) . YL es el punto de inflexión de la curva.

Por otra parte, varios autores (Barret y Graddy, 2000; Boyce, 1994; Ravallion et al., 2000; Saravia, 2002; Scruggs, 1998; Torras y Boyce, 1998) subrayan otros factores que influyen sobre la calidad ambiental, como la desigualdad del poder y la riqueza. Boyce (1994), al relacionar la desigualdad y la degradación ambiental, indica que mayor desigualdad de poder y riqueza conduce a mayor degradación ambiental, a través de tres vías: asimetrías en las reglas de decisión social ponderadas por el poder, evaluaciones de impacto de costo-beneficio de las actividades ambientalmente degradantes, y por la tasa de preferencia temporal aplicada al medio ambiente (mayor desigualdad conduce a tasas más altas de preferencia temporal ambiental). Ravallion et al. (2000) señalan que la disminución de la pobreza (vía mayor crecimiento económico o redistribución) en el corto plazo, tiende a incrementar las emisiones de dióxido de carbono. No obstante, encuentran que, a lo largo del tiempo, las emisiones de CO₂ podrían reducirse cuando hay crecimiento con equidad y podrían aumentar cuando hay crecimiento desigual.

Torras y Boyce (1998) toman la tasa de alfabetismo y las libertades civiles como una medida proxy de la igualdad del poder. Se subraya que mayor alfabetización brinda mayor acceso a la información, de modo que países con una tasa de alfabetización mayor pueden gozar de una distribución más equitativa del poder. Se afirma que en países de bajos ingresos las libertades civiles tienen un fuerte impacto en la calidad ambiental. Encuentran evidencia empírica de que una distribución más equitativa del poder puede contribuir a una mejor calidad ambiental, debilitando el efecto del PIB per cápita sobre la presión ambiental, pero sin desaparecer.

Otro elemento relevante que influye en la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental mencionado por numerosos autores (Bernauer y Koubi, 2009; Carson et al., 1997; De Bruyn y Opschoor, 1997; Dinda, 2004; World Bank, 1992) es la importancia que tienen las políticas públicas locales y nacionales. Al respecto, Panayotou (1997), en su estudio sobre el dióxido de azufre (SO₂), subraya la importancia de la calidad de las políticas y las instituciones para reducir la degradación ambiental. El principal hallazgo en su estudio es que la calidad de las políticas e instituciones puede reducir la degradación ambiental en niveles de bajos ingresos y acelerar las mejoras en los niveles de altos ingresos.

En distintos estudios se ha encontrado que la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental puede tomar diferentes formas, según el tipo de contaminante

investigado, la base de datos, el período analizado, el modelo estimado, las especificaciones y/o los métodos que se utilicen, con lo cual, la evidencia empírica no sería demasiado favorable a la hipótesis de la CKA como una explicación general de la relación entre crecimiento económico y degradación ambiental. En la sección sobre evidencia empírica, se incluye la tabla 2.1 que muestra los resultados de varios estudios e identifica la forma encontrada en relación a las posibilidades indicadas en la Figura 2.0.

2.2.2. Marco de referencia empírico

Esta sección comprende la síntesis de algunos de los estudios más relevantes relacionados con la CKA y sus estimaciones econométricas. De la revisión de la literatura realizada se han seleccionado, para su comparación, los resultados de 12 estudios que realizaron la contrastación empírica de la hipótesis de la CKA. Los trabajos contienen 38 indicadores ambientales (ver tabla 2.1). En varios estudios se encontró que algunos países durante ciertos períodos reflejan la CKA para algunos contaminantes (Cole et al., 1997; Galeotti, M. et al., 2006; Grossman y Krueger, 1995; List y Gallet, 1999). En otro estudio para los mismos contaminantes hay evidencia contradictoria (Gergel et al., 2004; List y Gallet, 1999), pues los indicadores de presión ambiental para determinadas regiones del país presentan evidencia a favor de la CKA, con el modelo cuadrático mostrando una U invertida, y en contra, con el modelo cúbico presentando una N invertida para 17 Estados (por ejemplo para Alabama, Florida, Georgia, Misuri, Texas, Pensilvania, etc.). En Gergel et al. (2004) también se presenta evidencia a favor y en contra (ver tabla 2.1.), pues para algunos contaminantes baja la contaminación e incrementa la riqueza y para otras sustancias incrementa la contaminación e incrementa la riqueza. Y en otros estudios se halló evidencia contraria a la hipótesis de la CKA (De Bruyn, 1997; Friedl y Getzner, 2003; Galeotti, M. et al., 2006; Halkos y Tsionas, 2001; Lindbeck, 2000; Panayotou, 1997; Roca y Alcántara, 2001), pues algunos indicadores de presión ambiental no parecen seguir este patrón de comportamiento. Los autores de estos últimos estudios suelen ser los más críticos con las técnicas econométricas utilizadas en algunos trabajos donde se cumple la CKA, así como con las implicaciones de política que surgen a partir de estos estudios. Una de las críticas más importantes que se ha realizado es el hecho de que las estimaciones de datos de panel o corte transversal asumen homogeneidad en la forma funcional que toma la relación entre emisiones y PIB para distintos países y en los parámetros de la misma y, por tanto, el punto de inflexión en la relación (Dijkgraaf y Vollebergh, 2005; Piaggio y Padilla, 2012).

Tabla 2.1. Resumen de los estudios consultados más representativos sobre la CKA durante el período 1995-2006

Autor y fecha	Indicador de polución	n	Período analizado	Tipo de dato	Técnica de estimación	Región	Punto de inflexión US de 1985 1er. valor estimación logarítmica y valor estimación en niveles	2do valor estimación en niveles	Forma de la curva
Carson et al., 1997	Gases de efecto invernadero, aire tóxico, CO, NOx, SO2, carbón orgánico volátil, partículas de materia (PM)	50	1988-1994	Datos transversales	MCO, MCG y ajuste no paramétrico	50 estados de EEUU	-	-	a diferentes pendientes
Cole et al., 1997	SO2	165	1970-1992	Datos de panel y transversales	MCO, MCG y efectos fijos	11 países de la OCDE	6900 y 5700	-	c
	SO2 transporte	135	1970-1992			9 países de la OCDE	9800 y 9400	-	c
	Partículas suspendidas	105	1970-1992			7 países de la OCDE	7300 y 8100	-	c
	PS transporte	105	1970-1992			7 países de la OCDE	18000 y 15000	-	c
	CO	105	1970-1992			7 países de la OCDE	9900 y 1100	-	c
	NO2	150	1970-1992			10 países de la OCDE	14700 y 15100	-	c
	NO2 transporte	135	1970-1992			9 países de la OCDE	17600 y 15100	-	c
	Nitrato en el agua	120	1975-1990			30 ríos en 15 países de la OCDE	25000 y 15600	-	c
	Metano	88	últimos de los 80's			88 países	No se estimó	-	c
	CO2	224	1960-1991			7 regiones de la OCDE	62700 y 25100	-	c
	Energía total usada	286	1980-1992			22 países de la OCDE	34700 y 22500	-	c
	Energía usada en transpor	96	1970-1990			24 países de la OCDE	4 millones y 400000	-	c
	CFCs y halones	38, 39	1986, 1990			38 países de la OCDE	12600 y 15400	-	c
	Volumen del tráfico	330	1970-1992			22 países de la OCDE	65300 y 108200	-	c
de Bruyn, 1997	SO2	-	1966-1990	Datos transversales	MCO	20 países de la OCDE	-	-	-
Friedl y Getzner, 2003	CO2	40	1960-1999	Datos transversales y de serie temporal	MCO	Austria	-	-	g
Galeotti et al., 2006	CO2	1070	1960-1997	Datos transversales	MCO	23 países de la OCDE	-	-	c
	CO2	2256	1971-1997			Países no OCDE	-	-	c (amplia)
Gergel et al., 2004	Fósforo disuelto reactivo	39	1900-2000 (año base 1999)	Datos de panel y transversales	MCO (3 modelos)	Lago Mendota, Wisconsin en EEUU	-	-	b
	Cadmio	19	1900-2000				-	-	a
	Cromo	19	1900-2000				30000	-	a, c
	Cobre	19	1900-2000				-	-	b
	Plomo	19	1900-2000				-	-	a
	Sulfuro	6	1900-2000				-	-	b, f
	Claridad del agua	63	1900-2000				-	-	a, d, f

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada.

Tabla 2.1. Resumen de los estudios consultados más representativos sobre la CKA durante el período 1995-2006 (Continuación).

Autor y fecha	Indicador de polución	n	Período analizado	Tipo de dato	Técnica de estimación	Región	Punto de inflexión US de 1985	Forma de la curva
Grossman y Krueger, 1995	SO ₂ ,	1352	1977, 1982 y 1988	Datos de panel	MCG	Ciudades de 42 países	4053	g
	Esmog, n.r.	488	1977, 1982 y 1988			Ciudades de 19 países	6151	c
	Nitrato en ríos	1017	1979-1990			Zonas de 58 países	10524	c
	Plomo	610	1979-1991			Zonas de 58 países	1887	e
	Coliformes fecales en ríos	1261	1979-1992			Zonas de 58 países	7955	c
	Coliformes totales en ríos	494	1979-1993			Zonas de 42 países	3043	g
	DBO en el agua	1284	1979-1994			Zonas de 58 países	7623	c
	DQO en el agua	850	1979-1995			Zonas de 58 países	7853	c
	Arsénico en ríos	368	1979-1996			Zonas de 58 países	4900	g
	Cadmio	649	1977, 1982 y 1988			Zonas de 29 países	11632	f
	Niquel	350	1977, 1982 y 1988			Zonas de 29 países	4113	g
	Mercurio en ríos	637	1977, 1982 y 1988			Zonas de 58 países	5047	g
Halkos y Tsionas, 2001	CO ₂	-	1993	Datos transversales	Montecarlo basado en cadenas de Markov	61 países	-	e
	Deforestación	-	1980 y 1990				-	e
List y Gallet, 1999	SO ₂		1929-1994	Datos de serie temporal	Modelo SUR	47 estados de EEUU	20138	c,d
	NO _x		(Año base 1987)		Cuadrático y Cúbico	Presenta curvas según estado y gas contaminante	10778	c,d
Panayotou, 1997	SO ₂	193	1982-1994	Datos de panel	Efectos fijos y efectos aleatorios	30 países desarrollados y 30 en vía de desarrollo	5000	e,d y g según la variable controlada
Roca y Alcántara, 2001	CO ₂	26	1972-1997	Datos de serie temporal	Derivadas parciales	España	-	e
Roca y Padilla, 2003	SO ₂ ,	12	1980-2001	Datos de serie temporal	MCO	España	-	
	CO ₂	12	1980-2001				-	No hay CKA
	NO _x	12	1980-2001				-	
Torras y Boyce (1998)	SO ₂	1297	1977-1991	Datos de serie temporal	MCO		3890 (excluyendo desigualdad)	c
	Smoke	484	1977-1991	de serie temporal	MCO		3360 (incluyendo desigualdad)	c
	partículas pesadas	916	1977-1991		MCO		4350 (excluyendo desigualdad)	a
	Oxígeno disuelto	2054	1977-1991		MCO		___ (incluyendo desigualdad)	b
	Coliformes fecales	1569	1977-1991		MCO			b

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada.

Entre las técnicas econométricas utilizadas en los estudios se encuentra el uso de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), mínimos cuadrados generalizados (MCG), efectos fijos, etc. Así como otras técnicas no econométricas, a saber: cadena de Markov, derivadas parciales, etc. (ver tabla 2.1). En contraste con algunos trabajos importantes realizados antes de 1995, en muchos de los estudios posteriores se corrigen los problemas de autocorrelación y

heterocedasticidad, se calculan los errores estándar para los puntos de inflexión y se realizan las pruebas de consistencia y simultaneidad para evitar errores de sesgo; esto último según la técnica de estimación utilizada. En el caso de los modelos de series de tiempo, se procede a contrastar la hipótesis de no cointegración entre el PIB y las emisiones (Friedl y Getzner, 2003).

Los modelos empíricos utilizados para estimar la relación entre el ingreso y la degradación ambiental generalmente usan ecuaciones que relacionan el PIB y algún indicador de presión ambiental. Los patrones que se presentan en la Figura 2.0 dependen de la estructura económica, del acceso a la tecnología, del uso eficiente de los recursos, de las políticas públicas y de comercio, y de la regulación ambiental durante el período de tiempo analizado para una región determinada. En este sentido, cobra relevancia la forma como la región haya enfrentado las crisis del petróleo y las medidas que haya adoptado para mejorar la eficiencia energética.

2.2.3. Críticas a la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental

La CKA ha sido reexaminada por varios investigadores con una visión crítica, ampliando la serie de tiempo en los mismos países donde se realizaron los primeros estudios y en nuevas regiones (Akboostanci et al., 2009; Bo, 2011; Capó, 2008; Fosten et al., 2012; Halkos y Tzeremes, 2009; He y Wang, 2012; Leitão, 2010), dando lugar a nuevas explicaciones a la relación reflejada entre la degradación ambiental y el nivel de actividad económica. Algunas de las críticas a la hipótesis de la CKA se caracterizan por tener una visión integral de la relación entre la economía y el medio ambiente, pues consideran que esta relación es multidireccional, destacándose entre estos Ekins, (1993; 1997), Arrow et al., (1995), Stern et al., (1996), De Bruyn et al., (1998), Stern (1998), Dasgupta et al. (2002) y (Roca y Padilla, 2003). Los críticos más pesimistas consideran que la curva sólo es una coincidencia fortuita en un proceso dinámico. Algunas críticas destacadas se sintetizan a continuación.

Ekins (1997) resume y compara algunas estimaciones econométricas sobre las relaciones entre indicadores ambientales y niveles de ingreso, y encuentra que la evidencia para la hipótesis de la CKA, aun para indicadores ambientales sencillos, es escasa y no es concluyente: Los indicadores ambientales para los cuales la CKA es más plausible son los

indicadores de contaminación atmosférica con impacto local o regional (SO₂, CO, NO_x, SPM, smoke “humos”). El autor señala que los estudios no arrojan ninguna luz sobre las causas de esta relación (diferente a la correlación). Estos proveen evidencia de crecimiento insustentable, más que de lo contrario. Ekins y otros investigadores sugieren que cualquier mejora en la calidad ambiental como aumento de la renta, probablemente es resultado de la promulgación de una política ambiental, más que de cambios endógenos en la estructura económica o tecnológica. Al respecto, De Bruyn et al. (1998) consideran que la correlación positiva entre crecimiento y reducción de emisiones se explica por cambios tecnológicos y estructurales. No obstante, Ekins (1997) señala que en algunos casos en los que parece haber evidencia favorable a la CKA, la mayoría de la población mundial todavía estaría en la sección de la curva creciente, de modo que el crecimiento en la renta produciría un daño ambiental considerable. Es más, incluso si se cumpliera la hipótesis y los contaminantes se redujesen por el incremento de los ingresos, la industria continuamente genera nuevos contaminantes tóxicos potenciales desregulados (Dasgupta et al., 2002).

En cuanto a los aspectos metodológicos, Stern et al. (1998) señalan que los estudios econométricos podrían proveer bases para proyectar tendencias futuras, en la medida en que adopten la forma de modelos estructurales, y no una relación simple del tipo de la CKA. Asimismo, comentan que un enfoque más fructífero para el análisis de la relación entre el crecimiento económico e impacto ambiental sería examinar la experiencia histórica individual de los países, usando la econometría, y el análisis histórico cualitativo. Varios estudios (Dinda y Coondoo, 2006; Lekakis, 2000; Lindmark, 2002; Perman y Stern, 2003; Roger y David, 2003) han realizado trabajos en esta línea. Otros autores subrayan la relevancia del análisis a nivel de país, mostrando la falta de homogeneidad de la relación entre crecimiento económico y degradación ambiental en los distintos países (Dijkgraaf y Vollebergh, 2005; Piaggio y Padilla, 2012).

2.3. Metodología y datos

La metodología utilizada se centra en dos aspectos: i) Descripción del comportamiento de los datos basado en la elaboración de gráficos, las cuales muestran la relación entre crecimiento económico y degradación ambiental, identificando si se da desvinculación débil y fuerte (Alcántara et al., 2007; De Bruyn et al., 1998), y ii) Estimación de un MAP para

analizar el cambio estructural en la generación de emisiones y el consumo de energía, así como la estimación de las elasticidades de las variables más relevantes³⁹.

Para las estimaciones se utilizan las siguientes variables: *CO₂* representa las emisiones de dióxido de carbono⁴⁰ (medido en miles de millones de toneladas), el gas de efecto invernadero más importante, *TPES* comprende la oferta total de energía primaria medida en millones de toneladas equivalentes de petróleo, *POB* indica la población en millones de habitantes, y el *PIB* señala el producto interno bruto (ingreso o renta) en billones de dólares del año 2000, en valores de paridad de poder adquisitivo. La información de las variables mencionadas proviene de la base de datos de la OCDE, específicamente los publicados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2010, 2012). También se utiliza la variable *EP_RENOV*, que representa el total de energía primaria proveniente de fuentes renovables, *EP_GN*, que se refiere al total de energía primaria de gas natural (producción de gas natural), *EP_CARBON*, que representa el total de energía primaria proveniente del carbón, y *EP_CRUDO*, que comprende el total de energía primaria procedente del petróleo, todas en toneladas equivalentes de petróleo-toe (IEA, 2010, 2012).

Para el análisis de la relación entre crecimiento económico y presión ambiental, se estiman diferentes relaciones orientadas a mostrar el tipo de vinculación entre crecimiento económico, energía y emisiones de CO₂ (Alcántara et al., 2007; Roca y Padilla, 2003; Roca et al., 2001; World Bank, 1992). Las variables seleccionadas para graficar las relaciones son las siguientes:

- i) Emisiones de CO₂ por unidad de PIB y PIB per cápita, y energía primaria por unidad de PIB y PIB per cápita. El estudio de esta relación permite observar la desvinculación débil.
- ii) Emisiones de CO₂ per cápita y PIB per cápita y, energía primaria per cápita y PIB per cápita. El análisis de esta relación permite identificar la desvinculación fuerte.

A partir de las variables mencionadas, se elaboran varios gráficos de dispersión, que ejecutan por defecto una línea de mínimos cuadrados suavizada para el período de análisis. Esto con

³⁹ En Pindyck y Rubinfeld (1998) se realiza una presentación detallada de los modelos de series de tiempo, incluido el MAP.

⁴⁰ Las emisiones de CO₂ fueron calculadas por la Agencia Internacional de Energía con base en los balances energéticos de los países de la OCDE (IEA, 2012).

el fin de mostrar: i) el patrón de comportamiento observado en los datos, e ii) identificar linealidades en la relación entre las variables a lo largo del tiempo (Statacorp, 2007).

En el estudio se utiliza el modelo dinámico de ajuste parcial (MAP), el cual permite con respecto a un modelo estático (que asume ajuste instantáneo), observar de una forma más interactiva la trayectoria de las variables a lo largo del tiempo, así como identificar “cuándo” se presenta el cambio (Ryan y Ploure, 2009). El modelo supone que el nivel de largo plazo de E depende de las variables independientes X . E representa una medida de presión ambiental, en este caso, se trata de las emisiones de CO₂ per cápita o del consumo de energía per cápita, en un año determinado. X puede ser un vector de distintos factores socioeconómicos que influyen en E , α es el término del intercepto, los β_s del vector X son los coeficientes de los factores socioeconómicos, y U_t es el término del error.

Ahora, por simplicidad, se puede considerar que E representa el indicador de presión ambiental (emisiones de CO₂ per cápita o energía per cápita), y X representa el PIB per cápita u otras variables relevantes para el análisis, esto es,

$$(2.1) \quad E_t^* = \alpha + \beta X_t + U_t$$

El proceso de ajuste se puede representar, como:

$$(2.2) \quad \underbrace{E_t - E_{t-1}}_{\text{cambio observado}} = \lambda \underbrace{(E_t^* - E_{t-1})}_{\text{cambio a largo plazo}} \quad 0 < \lambda < 1$$

Considerando el caso de la energía, la ecuación especifica que el cambio observado en la demanda de energía en cualquier momento del tiempo t es una fracción λ del cambio de largo plazo, siendo λ conocida como coeficiente de ajuste. Si $\lambda = 1$ significa que el ajuste es instantáneo y la demanda observada de energía es igual a la demanda de energía de largo plazo; si $\lambda = 0$ significa que nada cambia puesto que la demanda de energía actual en el tiempo t es la misma que la observada en el período de tiempo anterior. Se espera que λ se encuentre dentro de estos extremos, puesto que es probable que el ajuste a largo plazo de la demanda de energía sea parcial debido a la legislación energética existente regida por las instituciones, a las tecnologías utilizadas para la generación de energía, al cambio técnico en

el sector productivo, a la vida útil de la maquinaria, o las preferencias del consumidor, etc. De aquí el nombre de modelo de ajuste parcial. Una reflexión similar se puede hacer para el caso de la generación de emisiones.

El MAP ha sido utilizado para el análisis de flujo de materiales, el total de energía (Kouris, 1981, 1983) y la energía sectorial: industria, transporte, hogares, etc. (Beenstock y Willcocks, 1981; Dilaver y Hunt, 2011; Kouris, 1981, 1983). El MAP asume que la demanda total energía del período t no se da únicamente en función de variables socioeconómicas (actividad económica, ingreso, parque automotor, stock del capital, sustitución de combustibles, precios de los combustibles, etc.), sino que también depende del nivel de demanda de energía del período previo. Se considera que el modelo rezagado (de ajuste gradual) a menudo explica mejor la variación de la demanda de energía que el modelo estático, ya que el nivel de actividad económica y el consumo de energía están altamente correlacionados con los del período anterior. Este modelo se considera de forma reducida porque presenta una ecuación. Se diferencia de los modelos estructurales en que estos últimos están formados por un sistema de ecuaciones y requieren mucha información difícil de disponer (Ryan y Ploure, 2009).

Aunque los modelos de forma reducida se han utilizado ampliamente, los investigadores han desarrollado distintas formulaciones especializadas. Una aplicación mejorada consiste en ampliar la estructura de retardos en distintas variables explicativas. El inconveniente es que un mayor número de períodos rezagados reduce los grados de libertad del modelo y arroja estimaciones imprecisas de los coeficientes rezagados.

Otra variante usual de los modelos econométricos es el enfoque de dos etapas. Éste consiste en analizar la sustitución de combustibles, utilizando la proporción de una serie combustibles, donde la demanda total tiene que sumar 1. Primero se analiza el consumo total y luego se examina la participación de los diferentes combustibles. Sin embargo, Mehra y Bharawaj (2000) indican que estos modelos asumen que los precios y las cantidades son independientes entre sí y que un cambio en el precio del combustible no afectará a la demanda total.

Otros modelos en esta línea usados para analizar la energía (petróleo, electricidad, gas natural, etc.) en el corto plazo, son los modelos de series de tiempo. Considerados una

extrapolación refinada de los modelos usados para pronóstico. Existe un amplio rango de especificaciones: ARMA (autoregresivo de media móvil), ARIMA (integrado autoregresivo de media móvil), Box-Jenkins (Pindyck y Rubinfeld, 1998).

Por último, otro enfoque econométrico utilizado es el análisis de cointegración. En los estudios de energía, la demanda, los precios y los ingresos, suelen tener tendencias que están cambiando estocásticamente con el tiempo. En estos casos, el análisis de regresión de mínimos cuadrados ordinarios arroja resultados inexactos. Por lo tanto, para solucionar este problema Engle y Granger (1987) proponen: examinar la estacionariedad y las propiedades de cointegración de las variables. Si las variables son no estacionarias, pero cointegradas, el efecto de largo plazo se estima usando el análisis de cointegración. Con el modelo de corrección de error, se puede estimar el efecto de corto plazo, el de largo y la velocidad de ajuste (Bentzen y Engsted, 1993). Harvey (1997), argumenta que los mínimos cuadrados ordinarios arrojan resultados superconsistentes, aun en el caso de variables no estacionarias cointegradas. Estos enfoques han afianzado los modelos de una ecuación. Conforme lo recomendado, en el presente trabajo se realiza las pruebas de estacionariedad y de cointegración.

El uso del MAP se ajusta a las limitaciones de información disponible, y a los propósitos del presente trabajo, a saber: i) identificar si ha habido un cambio en los parámetros del modelo y estimar las ecuaciones de equilibrio (Broemeling y Tsurumi, 1987; Carrascal et al., 2001); ii) estimar de forma directa la influencia de los ingresos y algunas variables socioeconómicas (renta per cápita, tipo de energía consumida, regulación, etc.) sobre la variable dependiente, en nuestro caso las emisiones de CO₂ y el consumo de energía; iii) considerar explícitamente la evolución pasada de las emisiones (o de la energía, según el caso) como una posibilidad de su influencia en las emisiones (o del consumo de energía) presentes o que tienen efecto en más de un período. La razón de los retardos puede ser tecnológica, psicológica o institucional (Gujarati y Porter, 2009). Tecnológica por el retraso en la implementación de nuevas tecnologías limpias en los procesos industriales o generación de energías, la maquinaria instalada y un parque automotor que no se puede cambiar instantáneamente, entre otros aspectos —psicológica porque las personas no cambian sus hábitos de consumo de combustibles energéticos por la reducción de los precios o el incremento de la renta, e institucional por la demora con que se negocian los acuerdos

colectivos entre las instituciones, los consumidores y el gobierno—; iv) por último, el modelo permite ver la rapidez con la cual se desarrollan los cambios. Esto significa que es posible calcular las elasticidades de corto y largo plazo. Las de corto plazo capturan el cambio de las tasas de uso del flujo (energía o emisiones) existente y las de largo plazo capturan tanto los cambios de la tasa de uso, como los cambios en la estructura económica. De esta forma, el modelo muestra la forma como los agentes económicos realizan los cambios.

El modelo ha sido utilizado por varios autores que tienen una posición crítica frente a la hipótesis de la CKA respecto a la desvinculación del crecimiento económico y los patrones de ciertos contaminantes (Agras y Chapman, 1999; De Bruyn et al., 1998). En la literatura no se encuentran casos documentados donde se utilice el MAP para el caso colombiano en el análisis de la energía y/o las emisiones de CO₂. Sólo existe un estudio donde se utiliza la ecuación del modelo estático evaluando la influencia del ingreso y la desigualdad para algunas sustancias contaminantes (CO₂, SO₂, DBO) para el período 1971-2000 (Correa-Restrepo et al., 2005).

Para estimar los modelos se utiliza el paquete econométrico E-views 5. Por tratarse de modelos autorregresivos, para determinar la presencia de autocorrelación se usa el contraste de Breush Godfrey y los correlogramas y para detectar la presencia de heterocedasticidad se utiliza el método gráfico y el contraste de White. Asimismo, es importante anotar que se corrigen las regresiones con problemas de autocorrelación. También se aplica la prueba de estabilidad estructural usando el test de Chow y las pruebas de estacionariedad y de series temporales cointegradas (Carrascal et al., 2001; Gujarati, 2006; Gujarati y Porter, 2009; Pindyck y Rubinfeld, 1998; Wooldridge, 2009).

2.3.1. Limitaciones

Metodológicamente, el modelo MAP se considera que es una especificación ad hoc, que asume una elasticidad constante de la demanda, lo que puede no ser consistente con la teoría de la demanda.

Dado que se trata de una especificación uniecuacional, no se descarta una posible retroalimentación de las variables (Piaggio y Padilla, 2012; Verbeek, 2004).

Entre las limitaciones que existen con respecto a los datos, se destaca la imposibilidad de trabajar con microdatos y la dificultad para conseguir los datos consistentes para el período analizado del índice nacional de precios de la energía o series de tiempo de los precios del país para los diferentes tipos de energía, lo que impidió incorporar esta variable en el MAP.

2.4. Evidencia empírica y análisis de resultados

2.4.1. Desmaterialización y desvinculación en Colombia

En esta sección, se realiza un análisis descriptivo de la relación entre consumo de energía, generación de emisiones y PIB per cápita, que permite observar si se da algún tipo de desvinculación (débil/relativa o fuerte/absoluta) con respecto al uso de materiales (consumo de energía) y residuos (contaminación generada por emisiones de CO₂).

La Figura 2.1 presenta la relación entre la energía por unidad de producto y el PIB per cápita. Ésta muestra una correlación negativa entre las variables, indicando que, a medida que aumenta el PIB per cápita, ha habido una disminución de la energía por unidad de producto. Es decir, que existe una desvinculación relativa (desmaterialización débil) aparente entre energía y crecimiento económico. Un comportamiento relativamente similar se puede observar al analizar la relación entre emisiones de CO₂ por unidad de producto y el PIB per cápita (ver figura 2.2).

Figura 2.1.
Relación entre crecimiento económico y energía primaria. Desvinculación relativa. Colombia, 1971-2011

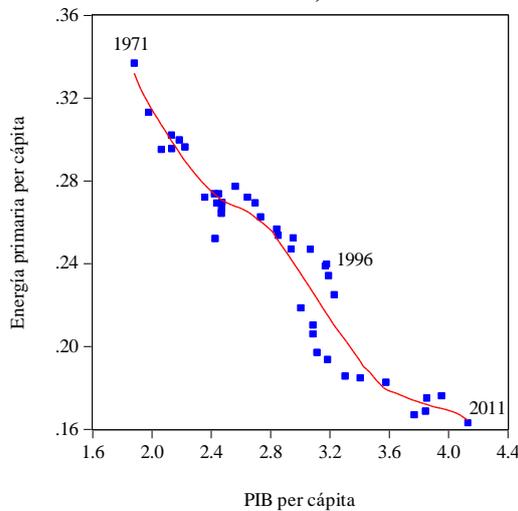
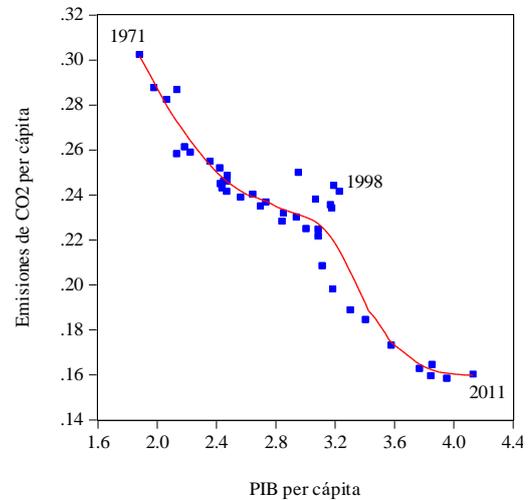


Figura 2.2.
Relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂. Desvinculación relativa. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2012).

La figura 2.3 muestra la relación entre energía primaria per cápita y PIB per cápita para Colombia durante el período 1971-2011. La figura 2.4 refleja la relación entre emisiones de CO₂ per cápita y el PIB per cápita.

Cómo se puede ver en la figura 2.3, la relación entre energía primaria y el PIB per cápita muestra dos transiciones, una mayor y otra de menor escala. En la primera se observa que la relación entre energía per cápita y PIB per cápita cambia de una correlación fuertemente positiva durante el período 1971-1996, a una correlación negativa durante el período 1996–2006, y después del año 2007, la correlación vuelve a ser positiva hasta el 2011.

Un comportamiento parecido se observa en la figura 2.4 para la relación entre las emisiones de CO₂ per cápita y el PIB per cápita, sólo que, en este caso, los períodos de transición se presentan un tiempo después, de modo que el primer cambio en la correlación se presenta en 1998 y el segundo hacia el año 2007.

Figura 2.3.
Relación entre crecimiento económico y energía primaria. Desvinculación absoluta. Colombia, 1971-2011

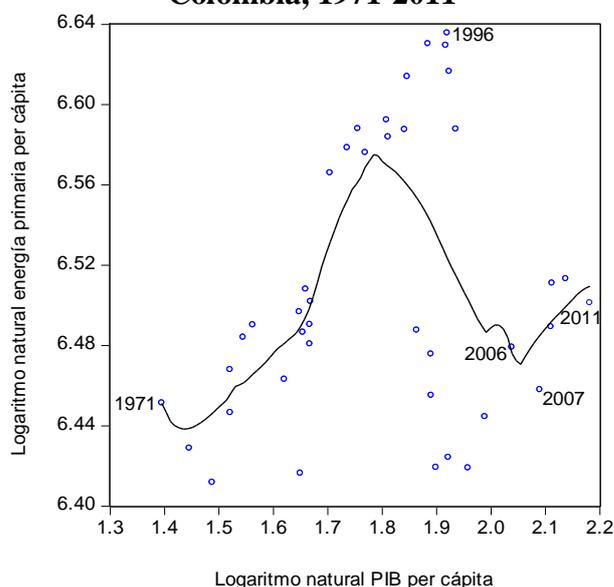
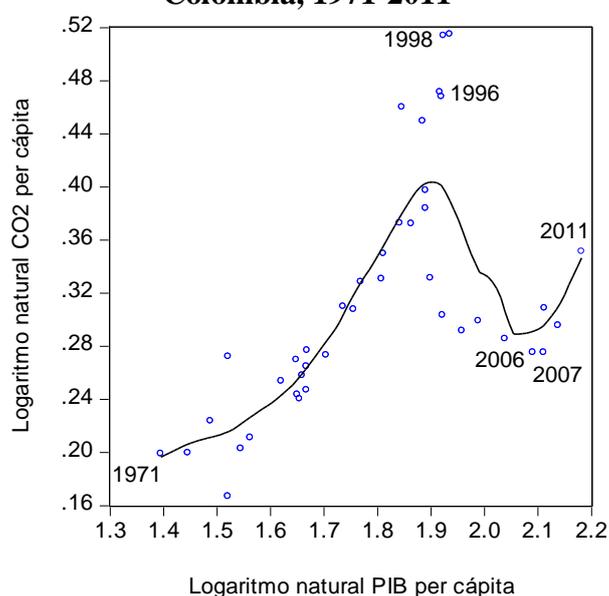


Figura 2.4.
Relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂. Desvinculación absoluta. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2012).

Tanto en la figura 2.3 como en la figura 2.4 se observa durante la primera gran transición la formación de una U invertida similar a la descrita por la hipótesis de la CKA. Siguiendo el planteamiento de De Bruyn et al. (1997), esto significa que, a partir de 1996 y 1998, el consumo de energía y la generación de emisiones, respectivamente, presentan una aparente desvinculación absoluta con el crecimiento económico (desmaterialización), pues el aumento del PIB no parece implicar mayores emisiones de CO₂, ni mayor consumo de energía. En las mismas figuras se observa una revinculación en el año 2006-2007 de la relación del PIB con el consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂.

De acuerdo con De Bruyn et al. (1997), las razones por las cuales se presenta tanto la desvinculación relativa como absoluta podrían ser: cambios tecnológicos y cambios estructurales. En el caso de Colombia estos cambios podrían haberse presentado e interactuado con otros factores, generando modificaciones en la composición de las fuentes energéticas e intensidad de uso de materiales. Para comprobar la veracidad de estos cambios

y conocer algunos de los factores que más han influido, se propone estimar un modelo de ajuste parcial (MAP).

2.4.2. Análisis del modelo de ajuste parcial

Para identificar el cambio estructural y profundizar en el análisis de los factores explicativos que están detrás de las emisiones de CO₂ y el consumo de energía primaria, se realizan dos estimaciones econométricas tomando las series en logaritmos, de modo que los coeficientes se interpretan en términos de elasticidades de corto y largo plazo.⁴¹ Para ello se consideran distintas variables que, de acuerdo con la revisión de trabajos empíricos, influyen sobre los indicadores de presión ambiental mencionados. Luego, se realizan varios contrastes relacionados con los supuestos del modelo de regresión.

Los modelos econométricos están orientados a responder varios interrogantes implícitos en los objetivos planteados: i) ¿Cómo se relacionan la generación de emisiones per cápita y el PIB per cápita, y el consumo de energía per cápita y el PIB per cápita? ¿Cuál es el efecto del cambio tanto para las emisiones como para el consumo de energía? ii) ¿Cuáles son las elasticidades de corto y largo plazo?, y iii) ¿Existe cambio estructural?, Y, por último, iv) ¿se cumple la hipótesis de la CKA en Colombia para el caso del consumo de energía y las emisiones de CO₂?

2.4.2.1. Especificación del modelo aplicado

En los modelos se incluyen las variables más relevantes de la literatura para las que fue posible conseguir información fiable para el período 1971-2011. Las variables dependientes usadas como indicadores de presión ambiental son: i) las emisiones de CO₂ per cápita y ii) el consumo de energía per cápita. Las variables explicativas usadas para estimar la magnitud de su influencia sobre la presión ambiental son las siguientes: el PIB per cápita en niveles y el PIB per cápita al cuadrado. En el caso de la energía, también se incluye como variable explicativa la proporción conjunta de gas natural y energías renovables con respecto al total de energía primaria. En el caso de las emisiones, se incluyen como variables explicativas la proporción de energías renovables con respecto al total de energía primaria y la variable

⁴¹En este caso el coeficiente asociado a cada variable explicativa indica el % en que cambiarían las emisiones per cápita y/o energía per cápita cuando cambia la variable explicativa en un 1%.

dicotómica G que hace referencia a la regulación relacionada con el control de la contaminación y el consumo de energía. A continuación, se expone una breve explicación de las variables.

i) El PIB per cápita ($LNPIB_POB$) en niveles se usa como reflejo de la escala de la producción, mientras que, siguiendo su empleo habitual en la literatura sobre la CKA, la variable al cuadrado mostraría el cambio endógeno en la relación conforme aumenta el nivel de renta por cambios en la estructura productiva, los patrones de consumo y la tecnología, entre otros. En caso de cumplirse la hipótesis de la CKA, la variable en niveles tendría un valor positivo, mientras que la variable al cuadrado tendría un valor negativo (Grossman y Krueger, 1991; Grossman y Krueger, 1995);

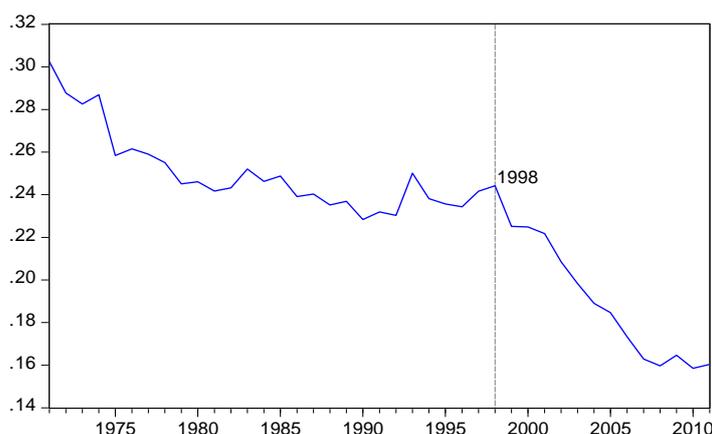
ii) la variable dicotómica G , se utiliza como una variable proxy de la regulación, pues factores relacionados con los cambios en la legislación pueden afectar directamente la calidad ambiental (Apergis y Ozturk, 2015). Algunas normas del gobierno colombiano relacionadas con el control de la contaminación ambiental comprenden: i) El decreto 948 del 1995 que establece normas para la protección y control de la calidad del aire. Se establecen distintas cuotas progresivas especialmente a partir de 1998 (Decreto 948, 1995). ii) El Decreto 1228 de 1997 que determina normativas de emisión para vehículos automotores y certificación obligatoria de los mismos (Decreto 1228, 1997). iii) Resolución 619 de 1997 que establece permisos de emisión atmosférica para determinadas industrias y actividades con fuentes fijas de emisión (Resolución 619, 1997). iv) La promulgación de la Ley 142 y 143 de 1994 que libero el mercado eléctrico (Ley 142, 1994; Ley 143, 1994). Este último incentivó la creación de plantas de generación térmica, especialmente de gas natural. La capacidad instalada pasó del 20% al 35% en el 2012. v) La ley 697 del 2001 que fomenta el uso racional de energía y promueve las energías alternativas (Ley 697, 2001). vi) La Ley 693 de 2001 que crea estímulos para la producción, comercialización y consumo de biocombustibles⁴², entre otros aspectos (Ley 693, 2001). Las dos últimas leyes se ajustan a las regulaciones promovidas en el contexto internacional para disminuir las emisiones.

Al graficar el comportamiento de las emisiones por unidad de producto, se observa una mejora, posiblemente debido a la aplicación de normas regulatorias orientadas a controlar la

⁴²La Ley 788 de 2002 declaró exento del IVA al alcohol carburante utilizado en combinación con el combustible de motor. Además, se exime de pago de sobretasa y pago de impuesto global (Ley 788, 2002).

contaminación ambiental. Se aprecian dos tendencias: la primera durante el período 1971-1998, y la segunda, a partir de 1998, siendo esta última, un cambio de tendencia favorable al medio ambiente⁴³ (ver figura 2.5). Un signo negativo indica un impacto favorable sobre el medio ambiente del paso del tiempo. En este sentido, se espera que la regulación controle la generación de emisiones de CO₂, y de este modo, la estructura productiva sea menos contaminante.

Figura 2.5. Emisiones por unidad de PIB. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2012).

iii) La proporción de gas natural más hidroenergía con respecto al total de energía primaria ($Ln((EP_GN+EP_HIDRO)/EP_TOTAL)$), refleja un cambio en la composición de las fuentes de energía hacia fuentes que son más eficientes en su transformación en energía final. Estas son las dos principales fuentes primarias de la generación de electricidad en el país (ver figura 2.6).

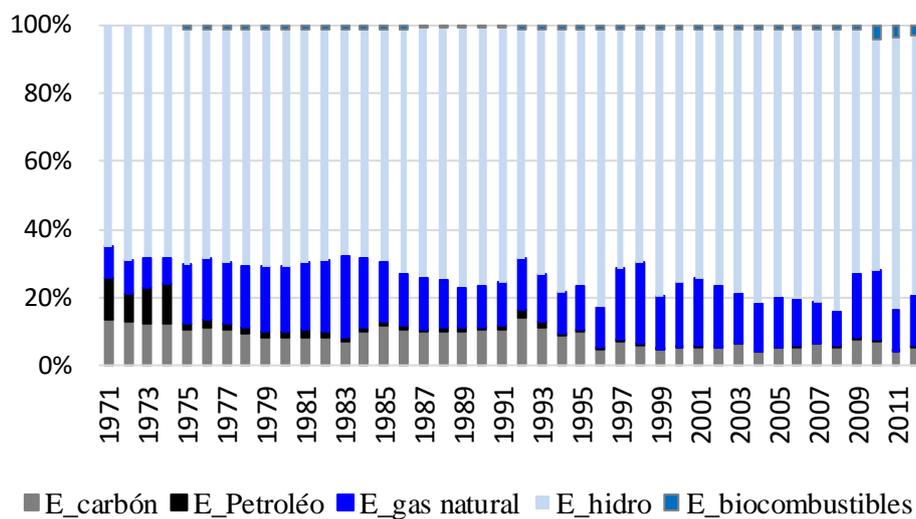
El uso de una mayor proporción del gas natural y energías renovables contribuyen a un menor consumo de energía primaria, por su alta eficiencia y rendimiento en la transformación de energía primaria a energía final (UPME, 2014).

La mayor eficiencia del gas natural se observa en los procesos de la generación de electricidad en centrales de ciclo combinado, cogeneración y autogeneración, pues se logra una eficiencia térmica muy superior a la lograda en las centrales térmicas convencionales

⁴³ Al estimar un modelo donde la variable emisiones por unidad de producto funge como variable dependiente y como explicativas dos variables representando tendencia: i) la primera representando el período 1971-2011, y ii) la segunda referenciando el período a partir de 1998. Se obtiene como resultado que ambas variables son significativas al 99%, verificando la tendencia observada en el gráfico.

(FENOSA, 2003). Además, la generación se da en el mismo lugar donde se consume evitando pérdidas de transformación y distribución (ANDI-UPME, 2011) (ANDI, 2011; UPME, 2014). La tecnología del ciclo combinado con una eficiencia del 60% puede disminuir el consumo de gas natural en aproximadamente un 40% para un factor de utilización de 2000 horas (Amell y Cadavid, 2000).

Figura 2.6. Electricidad según fuentes energéticas primarias. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la IEA (2012).

La mayor eficiencia de las energías renovables se refleja en el mayor rendimiento en los procesos de transformación, la descentralización de la generación de energía y el incremento de I+D, que conjuntamente favorecen el ahorro de energía primaria. De acuerdo con la directiva europea las energías renovables, constituyen un ahorro de energía y de forma implícita de emisiones (IPCC, 2011; UPME, 2007). A futuro, en el país se proyecta la cogeneración moderna integrando energías renovables no convencionales (UPME, 2015).

iv) La proporción de energías renovables con respecto a la energía primaria total (EP_RENOV/EP_TOTAL), conformadas especialmente por hidroelectricidad, bioenergías (biocombustibles), solar y viento, contribuyen a una menor generación de emisiones de CO₂ per cápita, porque son energías limpias con alta tecnología. En relación con la tecnología utilizada, actualmente las hidroeléctricas se destacan por usar tecnologías probadas y avanzadas, y en el caso de bioenergía se destacan la cogeneración de calor y electricidad y turbinas de vapor. La tecnología utilizada en los biocombustibles favorece la disminución

de emisiones; por ejemplo, en Colombia, el etanol de caña de azúcar se asocia a un ahorro de emisiones del 71% y el biodiesel de aceite de palma se vincula con una reducción de emisiones de 19%, sin captura de metano (IPCC, 2011; UPME, 2007).

La relación que se establece entre las emisiones per cápita o la energía per cápita con respecto a las diferentes variables mencionadas varía según los datos, el período analizado, el marco regulatorio y, en general, el contexto de cada región, como se reflejó en la revisión de estudios empíricos.

En el modelo 1, la ecuación estimada es:

$$(2.3) \quad \ln(TPES / POB) = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIB / POB) + \beta_2 (\ln(PIB / POB))^2 + \beta_3 \ln((EP_GN + EP_HIDRO) / EP_TOTAL) + (1 - \lambda) \ln(TPES / POB)_{t-1}$$

Donde $\ln(TPES/POB)$ es el logaritmo natural del consumo de energía primaria per cápita; $\ln(PIB/POB)$ se refiere al logaritmo natural del PIB per cápita (lineal y cuadrático, recogiendo el efecto escala y estructural, respectivamente); $\ln((EP_GN+EP_RENOV)/EP_TOTAL)$ señala el logaritmo natural de la participación del gas natural y la hidroenergía en el total de energía primaria. Estos dos tipos de energía, conjuntamente, generan la mayor parte de la electricidad del país. Por último, aparece la variable dependiente rezagada que indica la relación que tiene el consumo de energía con el período anterior y convierte el modelo en dinámico.

En el modelo 2, la ecuación estimada es:

$$(2.4) \quad \ln(CO_2 / POB) = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIB / POB) + \beta_2 (\ln(PIB / POB))^2 + \beta_3 \ln(EP_RENOV / EP_TOTAL) + \beta_4 G + (1 - \lambda) \ln(TPES / POB)_{t-1}$$

Ahora $\ln(CO_2/POB)$ es el logaritmo natural de las emisiones de CO₂ per cápita. $\ln(PIB/POB)$ se refiere al logaritmo natural del PIB per cápita (lineal y cuadrático); $\ln((EP_RENOV)/EP_TOTAL)$ señala el logaritmo natural de la participación de las energías renovables en la generación de emisiones; G presenta la variable dicotómica que corresponde a cero antes de 1998 y a uno después de 1998 e incorpora el efecto de la regulación. Finalmente, se encuentra la variable dependiente rezagada, que convierte el modelo en dinámico y muestra la relación de la generación de emisiones con el período anterior.

La estimación de la elasticidad de corto plazo de las emisiones de CO₂ per cápita con respecto al PIB per cápita se calcula usando la siguiente expresión:

$$(2.5) \quad \eta = \frac{dy}{dx} = \beta_0 + 2\beta_1 X$$

Si $\eta > 1$ indica una alta capacidad de respuesta de las emisiones de CO₂ per cápita a los cambios en los ingresos. Un aumento del PIB per cápita conduce a un aumento más que proporcional de CO₂ per cápita. Las emisiones de CO₂ son consideradas un bien de lujo.

Si $0 < \eta < 1$ señala que mayores ingresos conducen a un aumento de las emisiones de CO₂ per cápita menos que proporcionalmente. Se darían cambios que reducirían el impacto del PIB en las emisiones con respecto a lo que diría el efecto escala.

Si $\eta < 0$ muestra una relación negativa entre las emisiones de CO₂ per cápita y el PIB real per cápita. Esto podría sugerir una amplia utilización de tecnología verde en los procesos de producción posiblemente promovida mediante instrumentos regulatorios, por ejemplo, en la generación de electricidad. También podría mostrar una preocupación por la degradación del medio ambiente, de forma que un aumento del PIB real per cápita se asociara con una caída de la elasticidad ingreso de la demanda de productos intensivos en contaminación. Este resultado sería consistente con la hipótesis de la CKA.

Un procedimiento similar se sigue para estimar la elasticidad ingreso de la energía per cápita.

En el largo plazo, las elasticidades del indicador de presión ambiental con respecto al PIB per cápita se estiman mediante simulaciones (ver anexo 2A.1), y aplicando la siguiente ecuación:

$$(2.6) \quad \eta = \frac{d\bar{y}}{dx} = \frac{\beta_0}{1-\lambda} + 2 \frac{\beta_1}{1-\lambda} X$$

El intervalo de confianza de la elasticidad al 68%, bajo el supuesto de normalidad, se obtiene a partir de $\mu \pm \sigma$, en poblaciones simétricas. Mientras que, en poblaciones asimétricas, dada la forma de la función, se considera la moda más representativa del valor puntual de la elasticidad que la media. Por lo tanto, en este último caso, el intervalo de confianza se obtiene dejando 70000 observaciones dentro del intervalo (ver anexo 2A.1).

2.4.2.2. Resultados estadísticos e interpretación de resultados

Los resultados de la estimación de los modelos, ecuación 2.3 y 2.4, por MCO, para las emisiones de dióxido de carbono per cápita y consumo de energía primaria per cápita (ver anexo 2A.2), se presentan en las tablas 2.2 y 2.3. Los modelos estimados no presentan problemas de autocorrelación y ni de heterocedasticidad. En el caso del modelo de emisiones, se corrige el problema de autocorrelación identificado (ver anexo 2A.2 y anexo 2A.3). Asimismo, la capacidad explicativa conjunta de las variables incluidas en los modelos es alta puesto que, éstos presentan una bondad de ajuste elevada. Al aplicar el test de estacionariedad, las variables individuales son no estacionarias, pero su combinación lineal (sus residuos U_t) si lo son (ver anexo 2A.2)⁴⁴.

Los modelos fueron estimados usando una estructura dinámica, siguiendo el MAP, donde la variable dependiente rezagada resultó muy significativa en todos los casos. Conforme a lo previsible en este tipo de modelos, las elasticidades de largo plazo son mayores que las de corto plazo y tienen una interpretación similar (ver tablas 2.2 y 2.3).

En los modelos de las tablas 2.2 y 2.3, todas las variables explicativas son significativas al 99%, excepto el PIB per cápita lineal y cuadrático que en ambos modelos son significativas al 95%.

La estimación de las elasticidades del PIB per cápita con respecto al indicador ambiental para el período 1971-2011, se calcula tomando en cuenta los coeficientes estimados en los modelos reflejados en las ecuaciones (2.3) y (2.4) y aplicando las ecuaciones (2.5) y (2.6).

⁴⁴ En las variables (PIB per cápita, emisiones per cápita, energía per cápita, proporción de energías renovables con respecto al total de energía primaria, proporción de gas natural e hidroenergía con respecto al total de energía primaria, etc.) los datos no proporcionan suficiente evidencia en contra de H_0 sugiriendo que presentan raíz unitaria $I(1)$. Es decir, individualmente son no estacionarias. Sin embargo, su combinación lineal es $I(0)$ o estacionaria. Esto significa que las series están cointegradas. Al aplicar los test formales de cointegración, no permiten rechazar la hipótesis nula de ausencia de cointegración porque las series temporales son muy cortas debido al reducido tamaño de la muestra. El problema de la regresión espuria es poco probable, dado que en todos los modelos la variable dependiente rezagada presenta un valor estadístico t alto y su coeficiente es diferente de 1.

Para la descripción de resultados, primero se presentan las elasticidades relacionadas con la composición de la energía y la variable dicotómica y, en segundo lugar, se explican las elasticidades relacionadas con la actividad económica.

En el caso del modelo de la energía, el coeficiente relacionado con la composición de las fuentes primarias de energía más usadas en el país en la generación de electricidad corresponde a -0.17. Es decir que, si aumenta en un 1% la proporción de producción de energía a partir de gas natural e hidroeléctricas, disminuye el consumo de energía primaria en 0.17% en el corto plazo y un 0.47% en el largo plazo, *ceteris paribus* (ver tablas 2.2 y 2.3). Es probable que el descenso en el consumo de energía sea debido a la mayor eficiencia que tienen estas fuentes energéticas en los procesos de transformación, lo que, entre otras cosas, puede estar asociado a la cogeneración, mayor I+D, mejor rendimiento de las nuevas tecnologías, y a la descentralización en la generación de energía y la consiguiente disminución de pérdidas, contribuyendo al ahorro de energía primaria (UPME, 2014).

En relación con el coeficiente de la proporción energía renovable del modelo de emisiones de CO₂, se observa que la elasticidad del consumo de energía renovable con respecto a la generación de emisiones de CO₂ corresponde a -0.31 en el corto plazo y -0.93 en el largo plazo, mostrando un impacto favorable para el medio ambiente. En el largo plazo, esto significa que un aumento del 1% en la proporción de uso de energías renovables contribuye a una disminución en la generación de emisiones per cápita del -0.93%. Las estimaciones obtenidas son ligeramente altas con respecto a la literatura. Bilgili et al. (2016) encuentran elasticidades negativas para las energías renovables con respecto a las emisiones de CO₂ en cinco países (Austria, Bélgica, Grecia, Portugal y Turquía) para el período 1977-2010⁴⁵. En Colombia dos elementos que pueden haber favorecido la disminución de emisiones son: i) el impulso de la política nacional de biocombustibles promovida en la Ley 693 de 2001 a la luz de las Leyes 142 y 143 de 1994; y ii) el Plan de Acción indicativo 2010-2015 de uso racional de la energía.

La variable dicotómica *G* del modelo de emisiones de CO₂ relacionada con instrumentos de regulación resulta ser negativa y significativa al 1%, indicando que las medidas tomadas por el gobierno (después de 1998) relacionadas con el control de emisiones y calidad del aire

⁴⁵ Las elasticidades de largo plazo por país son: Austria (-0.22), Bélgica (-0.26), Grecia (-0.34), Portugal (-0.63) y Turquía (-0.38).

(Decreto 948, 1995; Decreto 1228, 1997; Ley 697, 2001; Resolución 619, 1997), han tenido un impacto favorable en la conservación del medio ambiente. El coeficiente de la variable corresponde a -0.12 en el corto plazo y -0.37 en el largo plazo (ver tablas 2.2 y 2.3). En el último caso significa que, manteniendo fijos los demás factores, las emisiones de CO₂ per cápita disminuyen durante el período de la regulación (con respecto a si no existiera regulación), pues cuando se establecen instrumentos de control sobre las emisiones de CO₂ de la industria y el sector transporte, las emisiones per cápita disminuyen un 0.37% después de 1998. Apergis y Ozturk (2015) también obtienen en el largo plazo coeficiente negativos (-0.186 a -0.168) para esta variable. Colombia sobresale a nivel internacional por presentar factores de emisión de CO₂ bajos, por ejemplo, en la generación de electricidad con 106 gramos de CO₂ / kilovatio hora en 2011⁴⁶ (IEA, 2013).

Tabla 2.2. Resultados de las estimaciones de corto plazo del modelo logarítmico lineal de las emisiones de CO₂ per cápita y del consumo de energía per cápita. 1971-2007. Colombia

Descripción	Coefficiente	Error	Valor	Valor P
	Corto Plazo	estándar	estadístico	
Modelo de la energía				
INTERCEPTO	-2.14	0.74	-2.90	0.0064 ***
LNPIB_POB	1.70	0.67	2.52	0.0166 **
LNPIB_POB^2	-0.39	0.17	-2.30	0.0278 **
LN(EP_GN+EP_HIDRO)/EP_TOTAL	-0.17	0.05	-3.29	0.0023 ***
LNTPES_POB(-1)	0.64	0.10	6.23	0.0000 ***
Modelo de las emisiones de CO₂				
INTERCEPTO	-1.44	0.43	-3.31	0.0023 ***
LNPIB_POB	1.20	0.44	2.72	0.0104 **
LNPIB_POB^2	-0.29	0.12	-2.44	0.0206 **
LN(EP_RENOV/EP_TOTAL)	-0.31	0.06	-4.88	0.0000 ***
G	-0.12	0.02	-7.97	0.0000 ***
LNCO2_POB(-1)	0.67	0.06	10.42	0.0000 ***
AR(1)	-0.51	0.17	-3.06	0.0044 ***
Descripción	Modelo energía	Modelo Emisiones		
R ² Ajustado	0.80	0.92		
DW	1.8	1.95		
F significación conjunta	40.29 ***	73.97 ***		
Test de White	1.2	1.5		
P-valor White	0.32	0.20		
Test del Multiplicador de Lagrange	2.5	0.4		
P-valor ML	0.9	0.67		
Punto de inflexión (Miles de US\$ 2000)	8573	7713		
Chow Breakpoint test 1996	3.0			
p--Valor Chow Breakpoint test 1996	0.02 **			
N	40	39		

Nota: ***, ** denota el nivel de significancia al 1% y 5%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de la IEA (2012)

⁴⁶ Los factores de emisión de gramos de CO₂ / kilovatio hora en la generación de electricidad en el año 2011 para otros países son: China (764), Estados Unidos (503), México (450), Chile (441) y Brasil (68).

Tabla 2.3. Resultados de las estimaciones de largo plazo del modelo logarítmico lineal de las emisiones de CO₂ per cápita y del consumo de energía per cápita. 1971-2007.

Descripción	Coefficiente Largo Plazo	Error estándar	Valor estadístico	Valor P
Modelo de la energía				
INTERCEPTO	-5.95	1.4059	-4.2331	0.0002 ***
LNPIB_POB	4.72	1.3775	3.4259	0.0016 ***
LNPIB_POB^2	-1.10	0.3629	-3.0261	0.0046 ***
LN(EP_GN+EP_HIDRO)/EP_TOT	-0.47	0.1229	-3.7881	0.0006 ***
Modelo de las emisiones de CO ₂				
INTERCEPTO	-4.35	0.798	-5.446	0.0000 ***
LNPIB_POB	3.64	0.891	4.088	0.0003 ***
LNPIB_POB^2	-0.89	0.256	-3.484	0.0015 ***
LN(EP_RENOV)/EP_TOTAL	-0.93	0.145	-6.431	0.0000 ***
G	-0.37	0.058	-6.324	0.0000 ***

Nota: ***,** denota el nivel de significancia al 1% y 5%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de la IEA (2012)

En el modelo de la energía, las estimaciones de la elasticidad del consumo de energía primaria per cápita con respecto al PIB per cápita, durante el período 1971-2011, presentan una tendencia descendente hasta llegar a ser cero (ver figura 2.7, 2.8 y anexo 2A.4). En el corto plazo, la elasticidad tiene signos positivos y oscila entre 0 y 0.59 con un intervalo de confianza entre -0.13 y 0.80 (ver figura 2.7). Los valores resultan relativamente similares a estudios anteriores hechos para Colombia (Espinoza-Acuña et al., 2013; Medina y Morales, 2007; Mendoza-Gutiérrez, 2010; Ramírez, 1991; Vélez et al., 1991) y otros países (Agras y Chapman, 1999; Bentzen y Engsted, 1993; Dahl, 1991; Narayan y Smyth, 2005; Pourazarm y Cooray, 2013; Sene, 2012; Taghvaei y Hajjani, 2014). La elasticidad de largo plazo durante el mismo período, se encuentra entre 0 y 1.5 con un intervalo de confianza que varía entre -0.9 y 3.2 (ver figura 2.8). De acuerdo con la tabla 2.4, la elasticidad de largo plazos está en los rangos de otros estudios para Colombia (APEX, 1985; Espinoza-Acuña et al., 2013) y otros países (Agras y Chapman, 1999; Bentzen y Engsted, 1993; Dahl, 1991; Narayan y Smyth, 2005; Pourazarm y Cooray, 2013; Sene, 2012; Taghvaei y Hajjani, 2014).

Figura 2.7. Elasticidad ingreso de la energía a corto plazo. Colombia, 1971-2011

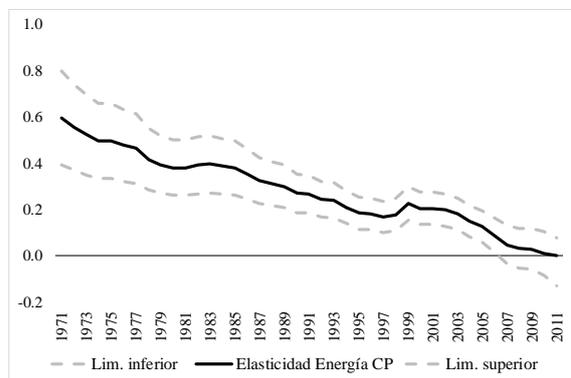
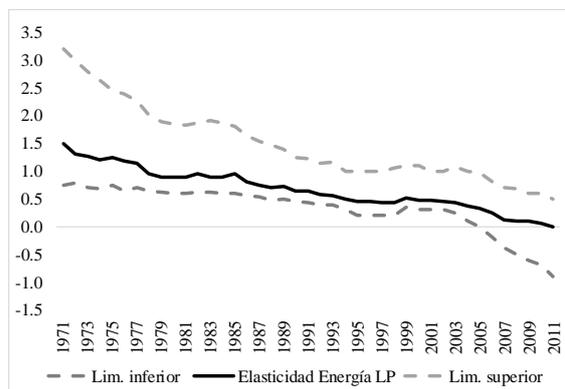


Figura 2.8. Elasticidad ingreso de la energía a largo plazo. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2012).

Por otro lado, en el modelo de las emisiones de CO₂, la elasticidad de las emisiones per cápita y el PIB per cápita durante el período 1971-2011 presenta en los primeros años una relación positiva que desciende con el paso del tiempo, hasta llegar a ser negativa (ver figuras 2.9, 2.10 y anexo 2A.4).

Particularmente, en el corto plazo la elasticidad ingreso de las emisiones de CO₂ per cápita oscila entre 0.38 y -0.08 con un intervalo de confianza entre -0.17 y 0.49 (ver figura 2.9). Las elasticidades de largo plazo, se encuentran en un rango entre -0.25 y 1.16 con un intervalo de confianza -0.54 y 1.49 (ver figura 2.10). Esto significa que el país ha disminuido sus emisiones de CO₂ per cápita con el aumento del PIB per cápita, a medida que pasan los años (ver anexo 2A.4). Según la tabla 2.4, entre los estudios con elasticidades similares de corto y largo plazos se destacan Kumar-Narayan et al., (2010) y Jaunki (2011)

Las elasticidades negativas se presentan después del 2007, variando entre -0.25 y -0.09. En este sentido, Jaunki (2011) para el período 1980-2005, encuentra elasticidades negativas que oscilan entre -5.14 y -0.13 para 5 países: Malta, Omán, Portugal, Reino Unido y Grecia.

Figura 2.9. Elasticidad ingreso de las emisiones de CO₂ a corto plazo. Colombia, 1971-2011

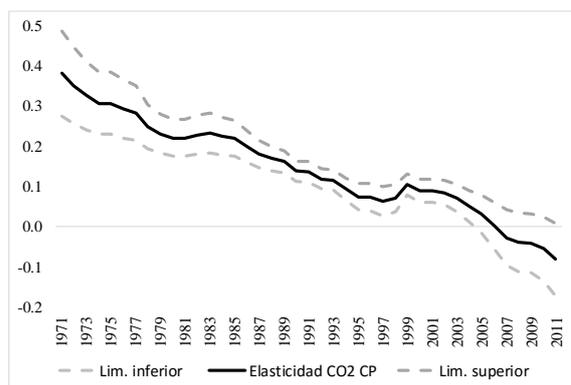
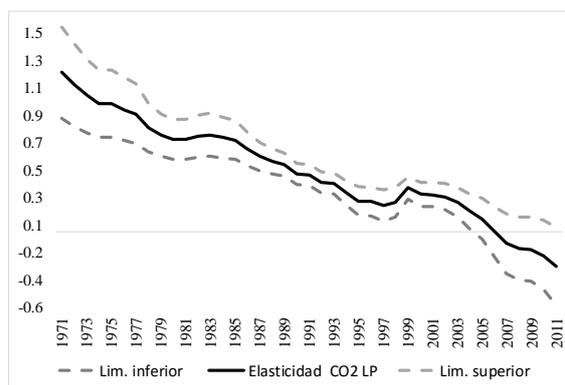


Figura 2.10. Elasticidad ingreso de las emisiones de CO₂ a largo plazo. Colombia, 1971-2011



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2012).

Después de analizar la relación positiva y significativa entre la variable presión ambiental y la actividad económica, se observa en las tablas 2.2 y 2.3 que el valor del coeficiente del PIB per cápita al cuadrado con respecto a la variable presión ambiental, en el corto y largo plazo, presenta una relación negativa y significativa, sugiriendo que, después de un nivel particular de PIB per cápita, existe posiblemente una desvinculación. Esto se observa tanto para el modelo de la energía como para las emisiones de CO₂. La diferencia en el valor de la elasticidad del indicador de presión ambiental (emisiones y/o energía respecto al PIB, en el corto y el largo plazo, puede ser reflejo del cambio estructural y tecnológico del país en los sectores productivos, y la composición de las fuentes energéticas más utilizadas. En este sentido, Stern (2004) señala que la relación entre el consumo de energía per cápita y el PIB per cápita está afectada por: la sustitución entre energía y otros insumos, el cambio tecnológico, el cambio en la composición en los insumos de la energía y el cambio en la composición del producto. Dada la fuerte conexión entre energía y emisiones de CO₂, los factores mencionados también afectan el comportamiento de las emisiones.

Se aplicó el test de Chow al modelo de la energía y se encontró que hay cambio estructural a partir del año 1996 para la energía, con un nivel de confianza del 95% (ver anexo 2A.2). Algunas circunstancias que pueden haber promovido este cambio son: i) el inicio del proceso de liberación de precios del petróleo, según resolución 8-2439 del Ministerio de Minas y Energía, de finales de 1998 (Resolución 8-2438, 1998); ii) el impulso promovido por el gobierno por el cambio en la composición de las fuentes energéticas, a través del Plan de

masificación de Gas Natural, ya que aunque este proceso se inició en 1986, sólo a finales de la década de los 90's se contó con la infraestructura que conectaba los centros de producción con los mayores mercados (UPME, 2010); iii) el programa de gasificación vehicular desarrollado por el gobierno (UPME, 2005); y iv) el establecimiento de una política plena de sustitución de combustibles a partir del año 1999, especialmente en lo referente al gas natural como combustible vehicular (UPME, 2015).

2.4.2.3. Discusión

En los modelos econométricos presentados en las tablas 2.2 y 2.3, en el corto y largo plazo, los coeficientes del ingreso per cápita en niveles y del ingreso per cápita al cuadrado producen una estimación positiva y negativa, respectivamente, mostrando una relación entre la generación de emisiones de CO₂ per cápita y el PIB per cápita, y entre la energía primaria per cápita y el PIB per cápita en forma de U invertida, conocida como CKA. Otros estudios también han encontrado evidencia favorable a la hipótesis de la CKA para el CO₂ para otros países o grupos de países (Apergis y Ozturk, 2015; Bilgili et al., 2016; Cole, 2003; Cole, 2004; Cole et al., 1997; Medlock y Soligo, 2001; Saboori y Sulaiman, 2013), si bien, muchos otros estudios encuentran evidencia contraria a la hipótesis en el caso del CO₂ (Friedl y Getzner, 2003; Roca y Padilla, 2003; Roca et al., 2001).

En el caso de Colombia, al estimar el punto de inflexión para el modelo de las emisiones de CO₂ per cápita y el consumo de energía primaria per cápita, los resultados reportan que este punto se encuentra en el año 2007 para las emisiones per cápita y 2011 para el consumo de energía per cápita. Estos años serían entonces el momento de desvinculación entre el crecimiento económico y las presiones ambientales analizadas. Este hallazgo es consistente con resultados encontrados por distintos autores (Apergis y Ozturk, 2015; Bilgili et al., 2016; Cole, 2003; Cole et al., 1997; Medlock y Soligo, 2001; Saboori y Sulaiman, 2013; Saboori et al., 2012) que reportan un punto de inflexión de la CKA dentro del período de muestra observado. En el caso colombiano, el punto de inflexión se estima aproximadamente en 8573 dólares per cápita (de PPA de US del año 2000) para el modelo de la energía y 7713 dólares per cápita (de PPA de US del año 2000) para el modelo de emisiones de CO₂. Este monto del punto de inflexión es relativamente comparable al obtenido en estudios previos para las emisiones de CO₂ por Saboori y Sulaiman (2013) en Malasia con 8267 (U\$ de 2005).

En general, los estudios de referencia para contrastar la actividad económica con el indicador de presión ambiental (energía o emisiones), si bien presentan elasticidades relativamente parecidas, difieren en el método, la temporalidad, la cobertura regional o sectorial, el tipo de energía, etc. (ver tabla 2.4). Además, la literatura que contrasta CKA de la energía es escasa, y no se encontraron estudios a nivel de país o regional para Colombia (APEX, 1985; Espinoza-Acuña et al., 2013; Laverde-Gaviria y Ruíz-Guzmán, 2014; Medina y Morales, 2007; Mendoza-Gutiérrez, 2010; Ramírez, 1991; Vélez et al., 1991).

En contraste, la literatura relacionada con los modelos que analizan las emisiones de CO₂ es abundante. Las técnicas de estimación que se suelen utilizar son: GLS, efectos fijos, efectos aleatorios, modelo de corrección de error, cointegración, etc., series de tiempo, datos de panel o datos transversales; temporalidades diversas, coberturas regionales o sectoriales diferentes, etc. (Acaravci y Ozturk, 2010; Agras y Chapman, 1999; Apergis y Ozturk, 2015; Bilgili et al., 2016; Cole, 2003; Cole, 2004; Cole et al., 1997; Galeotti, Marzio et al., 2006; Halicioglu, 2009; Medlock y Soligo, 2001; Piaggio y Padilla, 2012; Roca et al., 2001; Saboori y Sulaiman, 2013; Saboori et al., 2012).

La velocidad de ajuste es menor para el consumo de energía que para la generación de emisiones. En el caso de la energía, una velocidad de ajuste de 0.64 implica que el 64% del ajuste del consumo de energía se produce durante el primer año. Para las emisiones de CO₂ esta velocidad es de 0.67, o sea, que el 67% del ajuste se lleva a cabo durante el primer año. Por lo tanto, las emisiones requieren menos tiempo que la energía para alcanzar el equilibrio en el largo plazo.

En las estimaciones realizadas se encontró que las variables relacionadas con composición del PIB per cápita no fueron significativas para ninguno de los modelos. Lo que sugiere que han sido más los componentes relacionados con la tecnología los que han ejercido mayor influencia en la disminución de la presión ambiental.

Un resultado singular en las estimaciones probadas, previas a definir los modelos principales, fue la no significancia de la variable internacional de precios promedio del petróleo, a pesar de tener una correlación negativa con las variables de presión ambiental.

Tabla 2.4. Resumen sobre la literatura empírica relacionada con la elasticidad ingreso de la energía y las emisiones de CO2

Autor	Método	Período de tiempo	Cobertura	Elasticidad CO2/PIB CP	Elasticidad CO2/PIB LP	Elasticidad Energía/PIB CP	Elasticidad Energía/PIB LP	Punto de
Apex (1985)	Serie de tiempo	ND	CO Sectorial			0.433	1.25	No contrasta EKC
Dahl (1991)	AD	ND	Países en desarrollo			0.46	1.03	No contrasta EKC
Dahl (1991)	AD	ND	Países desarrollados			0.74	1.35	No contrasta EKC
Ramirez (1991)	Efectos fijos y aleatorios	No se indica	CO sectorial electricidad			0.021 - 0.484	-	No contrasta EKC
Ramirez (1991)	MCO	ND	CO Sect. alto consumo			0.059		No contrasta EKC
Ramirez (1991)	MCO	ND	CO Sect. bajo consumo			0.64		No contrasta EKC
Vélez et al. (1991)	Minimos cuadrados no	ND	CO (Medellin y Bogotá)			0.23		No contrasta EKC
Bentzen y Engsted (1993)	Series de tiempo	1948-1990	Dinamarca			0.66	1.21	No contrasta EKC
Cole et al. (1997)	MCG	1980-1992	22 países			3.88		9719 (US \$ 1985)
Cole et al. (1997)	MCG	1960-1991	7 regiones	3.2				27247 (US\$1985)
Agras y Chapman (1999)	AD	1971-1989	Países desarrollados y en desarrollo	0.07	0.41	0.17	0.7	62000 energía 13630 CO2
Friedl Getzner (2003)	Serie de tiempo	1960-1999	Austria	1.63				No se estima
Roca y Padilla (2003)	MCO	1980-2001	España	1.37				No se estima
Cole (2004)	MCG	1980-1997	21 países	2.5				63771 (US \$1995)
Narayan y Smith (2005)	ARDL y test de Bound	ND	Australia			0.32-0.41	4.4	No contrasta EKC
Medina y Morales (2007)	Montecarlo	2003	CO (Medellin. Cali. Bucaramanga. Pasto. Pereira. Cartagena y Barranquilla)			0.31		No contrasta EKC
Kumar-Naryan et al. (2010)	Panel	1980-2006	93 países		-2.58 - 1.43			No contrasta EKC
Chien-Chiang y Jun-De (2010)	Panel	1978-2004	25 países OCDE			0.52		No contrasta EKC
Mendoza (2010)	Panel	1998-2006	CO (Santa Marta)			0.52		No contrasta EKC
Jaunki (2011)	Cointegración	1980-2005	36 países	- 0.47-1.56	-5.74 - 4.19		-2.58 - 1.43	No contrasta EKC
Sene (2012)	Log lineal		Senegal			0.45	1.13	
Pourazarm y Cooray (2013)	ARDL	1967-2009	Iran			0.04	0.58	No contrasta EKC
Espinoza-Acuña. et al.	VARX Bayesiano. VARX frecuentista	2000-2011	Colombia			0.002	0.008	No contrasta EKC
Taghvaei y Hajjani (2014)	MEC	1976-2010	Iran			0.3581	0.73	No contrasta EKC
Mohamad y Hajjani (2014)	MCE	1976-2010	Irán			0.23- 0.34	0.73	No contrasta EKC
Laverde-Gaviria y Ruiz-Guzman (2014)	VEC	2003-2013	CO (Medellin)			0.063		No contrasta EKC
Apergis y Ozturk (2015)	MCO modificado	1990-2011	14 países de Asia		3.8			9496.2 (US \$ 2005)
Apergis y Ozturk (2015)	MCO en diferencias	1990-2011	14 países de Asia		3.4			9126.5 (US \$ 2005)
Bilgili et al. (2016)	Panel MCO modificado	1977-2010	17 países		1.59			No se estima

* Usa el gasto de los hogares como proxy del ingreso.

Nota: la abreviatura CO hace referencia a Colombia y ND indica no disponible dentro del estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada

2.5. Conclusiones

Este capítulo permite lograr una mejor comprensión de la relación que existe entre el PIB per cápita y las emisiones de CO₂ per cápita y entre el PIB per cápita y el consumo de energía per cápita, durante el período 1971-2011. Los resultados contribuyen a la literatura sobre la CKA, en tanto se encuentra que el incremento del PIB per cápita aumenta las emisiones y el consumo de energía, mientras que el coeficiente negativo estimado para el PIB per cápita al cuadrado mostraría que después de un nivel particular de ingreso tendería a reducirse la presión ambiental. El punto de inflexión se encontró dentro del rango muestral, por lo que Colombia muestra desvinculación entre la actividad económica y la presión ambiental, específicamente, las emisiones per cápita y el consumo de energía per cápita, a partir de 2007 y 2011, respectivamente. Esto no significa que las presiones ambientales analizadas desaparezcan gracias al crecimiento económico, pues un aumento en el ingreso no conduce automáticamente a menor presión ambiental si no se ve acompañado por cambios estructurales y tecnológicos. Para ello se debe cumplir la normatividad existente y poner en marcha políticas energéticas y de control de la contaminación, a nivel nacional y local. Además, es necesario impulsar políticas de concientización orientadas a sensibilizar a la población, modificar hábitos y mejorar el medio ambiente, independientemente del nivel de ingreso per cápita.

En el estudio se encuentra que existe una relación entre las emisiones de CO₂ y la composición de las fuentes de energía: las emisiones de CO₂ se reducen cuando aumenta la proporción del consumo de energías renovables sobre el total de energía primaria y su impacto es mayor en el largo plazo. Esta relación entre las energías renovables y las emisiones de CO₂ no parece depender del PIB per cápita, sino de los cambios tecnológicos (por ejemplo, mejoras asociadas con el proceso de producción de la energía, la composición de las fuentes energéticas, la sustitución de combustibles, la eficiencia energética, etc.). Por lo tanto, se requiere políticas de regulación e incentivos que apoyen el desarrollo tecnológico limpio e innovaciones orientadas al desarrollo sostenible, especialmente en lo relacionado con las energías renovables no convencionales.

Las estimaciones econométricas realizadas para Colombia arrojan pruebas del cambio estructural para el consumo de energía primaria, con un nivel de confianza del 95%, a partir

del año 1996, según el Test de Chow. De otro lado, estas estimaciones sugieren cambios importantes en la generación de emisiones de CO₂ a partir de 1998 debido en buena medida a la incorporación de diversos mecanismos regulatorios.

Del modelo de la energía, se puede inferir que el gas natural y las energías renovables desempeñan un rol importante en el comportamiento de la energía, afectando favorablemente la disminución en el consumo de la energía, debido en parte, al cambio técnico y a la ventaja comparativa que tiene el país con estas fuentes energéticas durante el período 1971-2011.

Además, de forma complementaria, en el país se ha intensificado el uso del gas, especialmente en el sector transporte y los hogares, evidenciando el interés por la sustitución por combustibles con menor contenido de carbono. Aunque no se demostró en este análisis el impacto logrado por cada una de las distintas políticas energéticas y ambientales puestas en marcha, es importante tener presente que la política de gobierno de desarrollo de hidroeléctricas, el impulso en la identificación de yacimientos de gas y la liberación de precios de los derivados del petróleo, iniciada a partir de 1998, han influido seguramente en la sustitución de algunos combustibles energéticos utilizados, favoreciendo en parte la eficiencia energética en el país y promoviendo el cambio estructural energético.

Entre las observaciones relevantes en la revisión de los datos de Colombia, se encuentra la disminución a largo plazo de las emisiones de CO₂ per cápita y las emisiones por unidad de energía suministrada, que coincide con la tendencia mundial, que según el IPCC (2007) se invirtió a partir del año 2000. Las emisiones per cápita disminuyeron en varios países en los últimos 5 años hasta 2012 (Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia, Unión Europea, Gran Bretaña, Alemania, México, Italia) y continúan aumentando en las naciones más pobladas como: China e India (Doyle, 2015).

Desde el punto de vista de la política, continuar con la mejora en la eficiencia energética y la disminución de las emisiones de CO₂ supone un importante desafío. Esto, ante la posibilidad de re-vinculación que podría darse después de una mejora en la intensidad energética, como se ha visto en varios países desarrollados (De Bruyn et al., 1998).

En relación con las futuras investigaciones, sería conveniente aumentar la serie de tiempo e incorporar en el modelo otras variables responsables de la evolución de las emisiones como los precios de referencia históricos del gas natural, los precios de la gasolina, la electricidad,

etc. Así como conocer en mayor detalle la generación de emisiones sectorial, esto con el fin de identificar los sectores que más han contribuido a los cambios en las emisiones de CO₂ a lo largo del período 1971-2011 e investigar el rol que cumplirá la nueva política de precios en el desarrollo del sector energético y/o los sectores económicos más consumidores de energía. Además, sería importante estudiar el rol que desempeñan las importaciones y/o las exportaciones en el consumo de energía y la generación de emisiones en el país.

También sería interesante identificar de una forma más precisa cuál es el efecto de la composición de la actividad económica, de la magnitud de la demanda y de la tecnología sobre el consumo de energía y la generación de emisiones. Un modelo que permite tener una visión más detallada del comportamiento de estos indicadores de presión ambiental es el modelo insumo-producto, el cual se presenta en el siguiente capítulo aplicado a la energía.

2.6. Bibliografía

- Acaravci, A., y Ozturk, I. (2010). On the relationship between energy consumption, CO2 emissions and economic growth in Europe. *Energy*, 35(12), 5412-5420. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.009>
- Agras, J., y Chapman, D. (1999). A dynamic approach to the Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Ecological Economics*, 28(2), 267-277.
- Akbostanci, E., Türüt-Aşik, S., y G. İpek, T. (2009). The relationship between income and environment in Turkey: Is there an environmental Kuznets curve? *Energy Policy*, 37(3), 861-867.
- Alcántara, V., y Padilla, E. (2009). Input–output subsystems and pollution: An application to the service sector and CO2 emissions in Spain. *Ecological Economics*, 68, 905-914.
- Alcántara, V., Padilla, E., y Roca, J. (2007). Actividad económica y emisiones de CO2 derivadas del consumo de energía en Cataluña, 1990-2005. Análisis mediante el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input output. In 07.10 (Ed.), *Document de treball*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Amell, A. A., y Cadavid, J. F. (2000). Implicaciones de la Eficiencia Energética en la Atenuación de Impactos Ambientales y la Conservación de la Energía: El Caso de las Centrales Térmicas a Gas en Colombia. . Disponible en <http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/revista/revistas/nro018/articulos.html#6>
- ANDI -Asociación Nacional de empresario de Colombia, y UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2011). *La cogeneracion: una alternativa para la industria de la climatizacion y el uso racional de la energia*. Bogotá: ANDI - UPME.
- Apergis, N., y Ozturk, I. (2015). Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators*, 52, 16-22. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026>
- APEX Consultores. (1985). Estudio de proyección de demanda de Energía Eléctrica (pp. 68). Bogotá.
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., . . . Pimentel, D. (1995). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological Economics*, 15(2), 91-95.
- Ayres, R. U. (2008). Sustainability economics: Where do we stand? *Ecological Economics*, 67(2), 281-310.
- Barret, S., y Graddy, K. (2000). Freedom, growth and the environment. *Environment and Development Economics*, 5(4), 433-456.
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment? . *World Development*, 20(4), 481–496.
- Beenstock, M., y Willcocks, P. (1981). Energy consumption and economic activity in industrialized countries: The dynamic aggregate time series relationship. *Energy Economics*, 3(4), 225-232. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883\(81\)90023-2](http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883(81)90023-2)
- Bentzen, J., y Engsted, T. (1993). Short- and long-run elasticities in energy demand : A cointegration approach. *Energy Economics*, 15(1), 9-16.
- Bernauer, T., y Koubi, V. (2009). Effects of political institutions on air quality. *Ecological Economics*, 68(5), 1355-1365.
- Bilgili, F., Koçak, E., y Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve

- approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-845. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>
- Bo, S. (2011). A Literature Survey on Environmental Kuznets Curve. *Energy Procedia*, 5(0), 1322-1325.
- Boyce, J. K. (1994). Inequality as a cause of environmental degradation. *Ecological Economics*, 11(3), 169-178. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0921-8009\(94\)90198-8](http://dx.doi.org/10.1016/0921-8009(94)90198-8)
- Broemeling, L. D., y Tsurumi, H. (1987). *Econometrics and structural change*. New York: Marcel Dekker.
- Capó, P. J. (2008). *Crecimiento Económico y contaminación atmosférica: nueva evidencia a favor de la curva de kuznets ambiental*. Paper presented at the III Congreso de la Asociación Hispano-Portuguesa de Economía de los Recursos Naturales y Ambientales, Palma de Mallorca.
- Carrascal, A. U., González, G. Y., y Rodríguez, P. B. (2001). *Análisis econométrico con EViews*. Madrid: Ra-Ma.
- Carson, R. T., Jeon, Y., y McCubbin, D. R. (1997). The relationship between air pollution emissions and income: US Data. *Environment and Development Economics*, 2(04), 433-450. doi: doi:10.1017/S1355770X97000235
- Cole, M. A. (2003). Development, trade, and the environment: how robust is the Environmental Kuznets Curve? *Environment and Development Economics*, 8(04), 557-580. doi: doi:10.1017/S1355770X0300305
- Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics*, 48(1), 71-81.
- Cole, M. A., Rayner, A. J., y Bates, J. M. (1997). The environmental Kuznets curve: an empirical analysis. *Environment and Development Economics*, 2(04), 401-416.
- Correa-Restrepo, F., Vasco-Ramírez, A. F., y Pérez-Montoya, C. (2005). La curva medioambiental de Kuznets: Evidencia empírica para Colombia. *Semestre Económico*, 8(15), 13-30. Disponible en <http://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1104/1076>
- Dahl, C. (1991). A survey of oil demand elasticities for developing countries. *Opec Energy Review*, 17(4), 399-420.
- DANE -Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015). Colombia, exportaciones de café, carbón, petróleo y sus derivados, ferróníquel y no tradicionales. 1992- 2015 (abril). Bogotá. D.C.: Dane.
- Dasgupta, S., Benoit, L., Hua, W., y David, W. (2002). Confronting the Environmental Kuznets Curve. *The Journal of Economic Perspectives*, 16(1), 147-168. .
- De Bruyn, S. M. (1997). Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing sulphur emissions. *Environment and Development Economics*, 2(04), 485-503. doi: doi:10.1017/S1355770X97000260
- De Bruyn, S. M., y Opschoor, J. B. (1997). Developments in the throughput-income relationship: theoretical and empirical observations. *Ecological Economics*, 20(3), 255-268.
- De Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C. J. M., y Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161-175.
- Decreto 948. (1995). Diario Oficial No. 41876 de la Republica de Colombia. Bogota, Colombia, 5 de Junio de 1995. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=1479>
- Decreto 1228. (1997). Diario Oficial Ministerio del Interior de la Republica de Colombia. Bogota, Colombia, 6 de mayo de 1997. Disponible en

- https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Decretos/dec_1228_060597.pdf
- Dijkgraaf, E., y Vollebergh, H. J. (2005). A Test for Parameter Homogeneity in CO₂ Panel EKC Estimations. *Environmental and Resource Economics*, 32(2), 229-239. doi: 10.1007/s10640-005-2776-0
- Dilaver, Z., y Hunt, L. C. (2011). Industrial electricity demand for Turkey: A structural time series analysis. *Energy Economics*, 33(3), 426-436. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2010.10.001>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455.
- Dinda, S., y Coondoo, D. (2006). Income and emission: A panel data-based cointegration analysis. *Ecological Economics*, 57(2), 167-181.
- DNP- Departamenteo Nacional de Planeación. (2015). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. Todos por un nuevo país*. Bogotá, D.C.: DNP.
- Doyle, A. (2015). Carbon emissions fall in 11 of G20 members, in turning point. *Environment*. Disponible en <http://uk.reuters.com/article/us-climatechange-g-idUKKCN0SZ1G720151110>
- Ekins, P. (1993). 'Limits to growth' and 'sustainable development': grappling with ecological realities. *Ecological Economics*, 8(3), 269-288.
- Ekins, P. (1997). The Kuznets curve for the environment and economic growth: examining the evidence. *Environment and Planning*, 29(5), 805-830.
- Ekins, P. (2000). Wealth creation: distinguishing between production, welfare, growth and development *Economic growth and environmental sustainability: the prospects for green growth*. London: Routledge.
- Engle, R. F., y Granger, C. W. J. (1987). Cointegration and error-correction: representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55(2), 251-276.
- Esguerra Roa, C., Castro Fernández, J. C., y González Quintero, N. I. (2005). Cambio estructural y competitividad: el caso colombiano. Bogotá: DANE.
- Espinoza-Acuña, O. A., Vaca Gonzalez, P. A., y Ávila Forero, R. A. (2013). Elasticidades de demanda por electricidad e impactos macroeconómicos del precio de la energía eléctrica en Colombia. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa*, 16, 216-249. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=233129568010>
- FENOSA-Gas Natural Fenosa. (2003). Manual de eficiencia energética de la Escuela de Organización Industrial y Gas Natural Fenosa. Disponible en https://www.gasnaturalfenosa.es/servlet/ficheros/1297092541194/181%5C968%5CManualEE_España_GrandesClientes_ES.2.pdf
- Fosten, J., Morley, B., y Taylor, T. (2012). Dynamic misspecification in the environmental Kuznets curve: Evidence from CO₂ and SO₂ emissions in the United Kingdom. *Ecological Economics*, 76(0), 25-33.
- Friedl, B., y Getzner, M. (2003). Determinants of CO₂ emissions in a small open economy. *Ecological Economics*, 45(1), 133-148.
- Galeotti, M., Lanza, A., y Pauli, F. (2006). Reassessing the environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: A robustness exercise. *Ecological Economics*, 57(1), 152-163.
- Galeotti, M., Lanza, A., y Pauli, F. (2006). Reassessing the environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: A robustness exercise. *Ecological Economics*, 57(1), 152-163.
- Gergel, S. E., Bennett, E. M., Greenfield, B. K., King, S., Overdeest, C. A., y Stumborg, B. (2004). A Test of the Environmental Kuznets Curve Using Long-Term Watershed Inputs. *Ecological Applications*, 14(2), 555-570.

- Gitli, E. (2002). La existencia de la curva ambiental de Kuznets y su impacto sobre las negociaciones internacionales. *Serie documentos de trabajo 009*. Costa Rica: CINPE- Universidad Nacional de Costa Rica.
- Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American free trade agreement*. NBER working paper No. 3914.
- Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1993). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. In P. Garber (Ed.), *The U.S.-Mexico Free Trade Agreement* (pp. 13-56). Cambridge: MIT Press.
- Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Gujarati, D. N. (2006). *Principios de Econometría*. Madrid: McGraw-Hill - Interamericana de España, S.A.U.
- Gujarati, D. N., y Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics*. Boston: McGraw-Hill.
- Halicioglu, F. (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy*, 37(3), 1156-1164. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.012>
- Halkos, G. E., y Tsonas, E. G. (2001). Environmental Kuznets curves: Bayesian evidence from switching regime models. *Energy Economics*, 23(2), 191-210.
- Halkos, G. E., y Tzeremes, N. G. (2009). Exploring the existence of Kuznets curve in countries' environmental efficiency using DEA window analysis. *Ecological Economics*, 68(7), 2168-2176.
- Harvey, A. (1997). Trends, Cycles and Autoregressions. *The Economic Journal*, 107(440), 192-201. doi: 10.2307/2235281
- He, J., y Wang, H. (2012). Economic structure, development policy and environmental quality: An empirical analysis of environmental Kuznets curves with Chinese municipal data. *Ecological Economics*, 76(0), 49-59.
- IEA -International Energy Agency. (2010). *Energy Balances of non - OECD countries. Documentation for beyond 2020 files*. Paris: OECD/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2012). *CO2 Emissions from fuel combustion 1971-2010*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2013). *CO2 Emissions from fuel combustion 1971-2011*. Paris: OCDE/IEA.
- IPCC-Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Abu Dhabi: Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Jaimes, A. (1992, 1 Mayo). A adelantar los relojes, *El tiempo*. Retrieved from Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-104700/> (Consulta 21 Abril 2013)
- Jalil, A., y Feridun, M. (2011). The impact of growth, energy and financial development on the environment in China: A cointegration analysis. *Energy Economics*, 33(2), 284-291. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2010.10.003>
- Jaunky, V. C. (2011). The CO2 emissions-income nexus: Evidence from rich countries. *Energy Policy*, 39(3), 1228-1240. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.050>
- Kouris, G. (1981). Elasticities - science or fiction? *Energy Economics*, 3(2), 66-70. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883\(81\)90010-4](http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883(81)90010-4)

- Kouris, G. (1983). Energy consumption and economic activity in industrialized economies: a note. *Energy Economics*, 5(3), 207-212. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883\(83\)90063-4](http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883(83)90063-4)
- Kriström, B., y Lundgren, T. (2005). Swedish CO₂-emissions 1900 - 2010: an exploratory note. *Energy Policy*, 33(9), 1223-1230. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2003.11.020>
- Kumar-Narayan, P., Narayan, S., y Popp, S. (2010). A note on the long-run elasticities from the energy consumption–GDP relationship. *Applied Energy*, 87, 1054-1057.
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1-28.
- kuznets, S. (1963). Quantitative Aspects of the Economic Growth of Nations: VIII. Distribution of Income by Size. *Economic Development and Cultural Change*, 11(2), 1-92.
- Lanegra, I., y Morales, R. (2007). Competitividad y responsabilidad ambiental: Objetivos indescifrables *Dossier ensayo*. Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Laverde-Gaviria, N., y Ruíz-Guzmán, J. C. (2014). *Elasticidades de la demanda residencial de energía eléctrica del estrato dos en el valle de Aburrá: un caso de estudio 2003-2013*. Maestría en Economía, Universidad EAFIT, Medellín.
- Leitão, A. (2010). Corruption and the environmental Kuznets Curve: Empirical evidence for sulfur. *Ecological Economics*, 69(11), 2191-2201.
- Lekakis, J. N. (2000). Environment and development in a Southern European country: which environmental Kuznets curves. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43, 139-156.
- Ley 142. (1994). Diario oficial No. 41.433 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 11 de julio de 1994. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=2752>
- Ley 143. (1994). Diario Oficial No. 41.434 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 12 de julio de 1994. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180//23517//21443-3668.pdf>
- Ley 693. (2001). Diario Oficial No. 44.564 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 27 de septiembre de 2001. Disponible en <http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/Ley%20693%20de%202001.pdf>
- Ley 697. (2001). Diario Oficial No. 44.573 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 5 Octubre 2001. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180//23517//20858-3677.pdf>
- Ley 788. (2002). Diario Oficial 45.046 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 27 de diciembre de 2002. Disponible en <http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/Ley%20788%20de%202002.pdf>
- Ley 939. (2004). Diario Oficial No. 45.778 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 31 de diciembre de 2004. Disponible en https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2004/ley_0939_2004.pdf
- Lindbeck. (2000). The Sveriges Riksbank (Bank of Sweden) *Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 1969-1998*. Estocolmo: The Nobel Foundation.
- Lindmark, M. (2002). An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870-1997. *Ecological Economics*, 42(1-2), 333-347.
- List, J. A., y Gallet, C. A. (1999). The environmental Kuznets curve: does one size fit all? *Ecological Economics*, 31(3), 409-423.

- Meadows, H. D., Meadows, L. D., y Randers, J. (1972). *The Limits to Growth*. New York: University Books.
- Medina, C., y Morales, L. F. (2007). Demanda por servicios públicos domiciliarios en Colombia y subsidios: Implicaciones sobre el bienestar. *Borradores de Economía, Banco de la República* (467), 350-354. Disponible en <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/pdfs/borra467.pdf>
- Medlock, K. B., y Soligo, R. (2001). Economic Development and End-Use Energy Demand. *The Energy Journal*, 22(2), 77-105.
- Mehra, M., y Bharadwaj, A. (2000). *Demand forecasting for electricity*. New Delhi: The Energy Resources Institute.
- Mendoza-Gutiérrez, J. F. (2010). *Estimación de la demanda de energía eléctrica de la empresa Electricaribe S.A. de la ciudad de Santa Marta, durante el periodo comprendido entre 1998-2006*. Maestría en Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/6801/1/08407398.2010.pdf>
- MINMINAS -Ministerio de Minas y Energía. (2007). *Plan Energético Nacional 2006-2025*. Bogotá, D.C.: UPME.
- Nadal, A. (2007). *De los límites del crecimiento al desarrollo sustentable. Programa sobre ciencia, tecnología y desarrollo*. México: El Colegio de México.
- Narayan, P. K., y Smyth, R. (2005). The residential demand for electricity in Australia: an application of the bounds testing approach to cointegration. *Energy Policy*, 33(4), 467-474. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2003.08.011>
- Nullvalue. (1993, 4 febrero). La hora se pone al día, *El tiempo*. Retrieved from Recuperado <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-32922/> (Consulta 21 Abril 2013)
- Ocampo, J. A. (1998). El desarrollo Económico In E. Lora, J. A. Ocampo & R. Steiner (Eds.), *Introducción a la macroeconomía colombiana* (pp. 347-436). Bogotá: FEDESARROLLO.
- Panayotou, T. (1993). Empirical Tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development *Working Paper WP238*. Geneva: Technology and Employment Programme International Labor Office. .
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465-484.
- Perman, R. J., y stern, D. (2003). Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47(3), 325-347.
- Piaggio, M., y Padilla, E. (2012). CO₂ emissions and economic activity: Heterogeneity across countries and non-stationary series. *Energy Policy*, 46(0), 370-381. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.074>
- Pindyck, S. R., y Rubinfeld, L. D. (1998). *Econometric Models and Economic Forecasts* (Fourth edition ed.). New York: McGraw-Hill.
- Pourazarm, E., y Cooray, A. (2013). Estimating and forecasting residential electricity demand in Iran. *Economic Modelling*, 35, 546-558. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.econmod.2013.08.006>
- Ramírez, G. A. (1991). La demada de energía eléctrica en la industria Colombiana. *Desarrollo y Sociedad*, 27, 121-139.
- Ravallion, M., Heil, M., y Jalan, J. (2000). Carbon Emissions and Income Inequality. *Oxford Economic Papers*, 52(4), 651-669.

- Resolucion 8-2438. (1998). Diario oficial No.43.463 de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, del 23 de Diciembre de 1998. Disponible en <http://www.esu.com.co/esu/images/Descargables/PDF/Resolucion%2082438%20de%20diciembre%2023%20de%201998.pdf>
- Resolucion 619. (1997). Diario de la República de Colombia. Bogotá, Colombia, 7 de Julio de 1997. Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/resoluciones>
- Roca, J., y Alcántara, V. (2001). Energy intensity, CO2 emissions and the environmental Kuznets curve. The Spanish case. *Energy Policy*, 29(7), 553-556.
- Roca, J., y Padilla, E. (2003). Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. La curva de Kuznets Ambiental y el protocolo de Kyoto. *Economía Industrial*. (351), 73-86.
- Roca, J., Padilla, E., Farre, M., y Galletto, V. (2001). Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis. *Ecological Economics*, 39(1), 85-99.
- Roger, P., y David, I. S. (2003). Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47(3), 325-347.
- Ryan, D. L., y Ploure, A. (2009). Empirical modeling of energy demand. In J. Evans & L. C. Hunt (Eds.), *International handbook on the economics of energy*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Saboori, B., y Sulaiman, J. (2013). Environmental degradation, economic growth and energy consumption: Evidence of the environmental Kuznets curve in Malaysia. *Energy Policy*, 60, 892-905. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.099>
- Saboori, B., Sulaiman, J., y Mohd, S. (2012). Economic growth and CO2 emissions in Malaysia: A cointegration analysis of the Environmental Kuznets Curve. *Energy Policy*, 51(0), 184-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.065>
- Saravia, L. A. (2002). La curva medio ambiental de Kuznets para América Latina y el Caribe. In 23 (Ed.), *Documentos de reflexión académica*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Scruggs, L. A. (1998). Political and economic inequality and the environment. *Ecological Economics*, 26(3), 259-275. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00118-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00118-3)
- Selden, T. M., y Song, D. (1994). Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147-162.
- Sene, S. O. (2012). Estimating the demand for gasoline in developing countries: Senegal. *Energy Economics*, 34(1), 189-194. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2011.04.014>
- Shafik, N., y Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence *Background Paper for the World Development Report*. Washington, D.C: World Bank.
- StataCorp. (2007). *Stata Statistical Software: Release 10 Graphics*. College Station, Texas: StataCorp LP.
- Stern, D. I. (1998). Progress on the environmental Kuznets curve. *Progress on the environmental Kuznets curve?*, 3, 173-196.
- Stern, D. I. (2004). Economic Growth and Energy. In C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (pp. 35-51). New York: Elsevier.

- Stern, D. I., Common, M. S., y Barbier, E. B. (1996). Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development. *World Development*, 24(7), 1151-1160.
- Taghvaei, V. M., y Hajiani, P. (2014). Price and Income Elasticities of Gasoline Demand in Iran: Using Static, ECM, and Dynamic Models in Short, Intermediate, and Long Run. *Modern Economy*, 5, 939-950.
- Torras, M., y Boyce, J. K. (1998). Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets Curve. *Ecological Economics*, 25(2), 147-160. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00177-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00177-8)
- UPME- Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). *Capacidad instalada de autogeneración y cogeneración en sector de industria, petróleo, comercio y público del país*. Bogotá: Consorcio Hart - Re.
- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Plan Energético Nacional. Estrategia Energética Integral. Visión 2003 - 2020*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2007). *Desarrollo y consolidación del mercado de biocom bustibles en Colombia*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2009). *Biocombustibles en Colombia*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural Versión Marzo de 2015*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2005). *La Cadena del Gas Natural en Colombia*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2010). *Plan de Abastecimiento para el Suministro y Transporte de Gas Natural - Versión 2010*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME -Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Disponible en http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/RESUMEN_EJECUTIVO_INTEGRACION_ENERGIAS_UPME2015.pdf
- Vélez, C. E., Botero, J. A., y Yáñez, S. (1991). La demanda de energía de electricidad: Un caso colombiano. 1970-1983. *Lecturas de Economía*, 34, 149-189. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4833650.pdf>
- Verbeek, M. (2004). *A Guide to Modern Econometrics*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Vincent, J. (1997). Testing for environmental Kuznets curves within a developing country. *Environment and Development Economics*, 2(4), 417-431.
- Wooldridge, J. M. (2009). *Introductory econometrics: a modern approach*. Cincinnati, OH: South-Western College Cengage Learning.
- World Bank. (1992). *Development and the Environment: World Development Report*. New York: Oxford University Press.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. New York; Oxford: Oxford University.

Anexo

Anexo 2A.1. Explicación metodológica para estimación de elasticidades a largo plazo

A continuación, se expone la metodología de simulación como un método alternativo al convencional utilizado para estimar elasticidades de largo plazo (siguiendo una sugerencia, vía comunicación personal, del profesor J.L. Raymond-Bara).

Considérese un modelo de ajuste parcial definido a partir de una relación de equilibrio a largo plazo entre una variable explicativa y una variable dependiente:

$$(2A.1) \quad Y_t^* = \alpha + \beta X_t + \varepsilon_t$$

y un proceso de ajuste hacia este equilibrio del tipo:

$$(2A.2) \quad \Delta Y_t = \lambda (Y_t^* - Y_{t-1})$$

La estimación de elasticidades de largo plazo por el método convencional, tomando en consideración las variables de interés sería:

$$(2A.3) \quad y_t = \alpha + \beta X_t + \gamma y_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$(2A.4) \quad y_t = \alpha + \beta_0 X_t + \beta_1 X_t^2 + \gamma y_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$(2A.5) \quad \eta = \frac{dy}{dx} = \beta_0 + 2\beta_1 X$$

Ahora, para definir los intervalos de confianza se calcula la varianza:

$$(2A.6) \quad V(\hat{\eta}) = V(\hat{\beta}_0) + 4V(\hat{\beta}_1)X_t^2 + 4X \text{cov}(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1)$$

Y la desviación estándar:

$$(2A.7) \quad \sigma_\eta = [V(\eta)]^{1/2}$$

Bajo el supuesto de normalidad, los estimadores beta se distribuyen normalmente con media μ y varianza σ^2 . Ahora, conociendo la verdadera varianza poblacional, se puede conocer el área bajo la curva normal y con ello definir intervalos de confianza cercanos al 68% con $\mu \pm \sigma$, alrededor del 95% con $\mu \pm 2\sigma$, y aproximados al 99.7% con $\mu \pm 3\sigma$. Según cada caso, éstos se pueden representar por la línea punteada en el gráfico, mientras que la línea sin puntear sería la elasticidad media.

$$(2A.8) \quad \mu \pm \sigma \quad \mu \pm 2\sigma \quad \mu \pm 3\sigma \quad \mu \pm \sigma$$

Figura 2A.1: Elasticidad método convencional

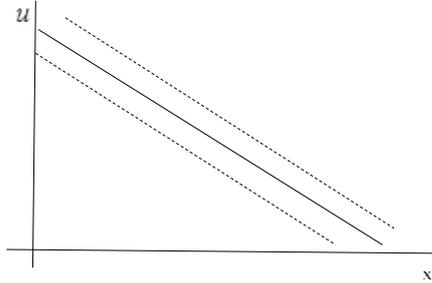
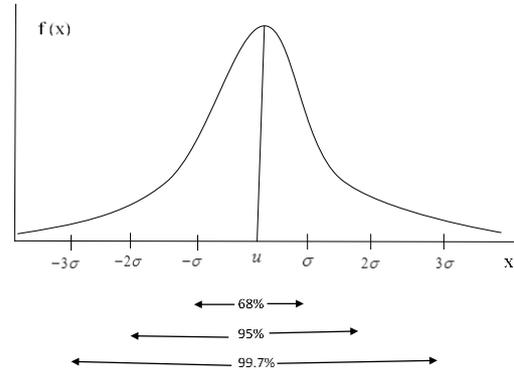


Figura 2A.2: Función de densidad Simétrica



$$(2A.9) \quad \mu \pm \sigma \quad \mu \pm 2\sigma \quad \mu \pm 3\sigma \quad \mu \pm \sigma$$

$$(2A.10) \quad \bar{y}_i = \frac{\alpha}{1-\gamma} + \frac{\beta_0}{1-\gamma} X_i + \frac{\beta_1}{1-\gamma} X_i^2$$

$$(2A.11) \quad \frac{d\bar{y}}{dx} = \frac{\beta_0}{1-\gamma} + 2 \frac{\beta_1}{1-\gamma} X$$

Donde la varianza de η se puede estimar a partir de aproximaciones asintóticas del tipo:

$$(2A.12) \quad f(\hat{\beta}) \approx f(\beta) + \frac{\partial f}{\partial \beta'} (\hat{\beta} - \beta)$$

$$\hat{\eta} = f(\hat{\beta}) \rightarrow N \left[f(\beta), \frac{\partial f}{\partial \beta'} \text{cov}(\hat{\gamma}) \frac{\partial f}{\partial \beta} \right]$$

Es decir:

$$(2A.13) \quad \text{var}(\hat{\eta}) \rightarrow \frac{\partial f}{\partial \hat{\beta}'} \text{cov}(\hat{\beta}) \frac{\partial f}{\partial \hat{\beta}}$$

$$(2A.14) \quad V(\eta) = V \left(\frac{\hat{\beta}_0}{1-\hat{\gamma}} \right) + 4V \left(\frac{\hat{\beta}_1}{1-\hat{\gamma}} \right) X_i^2 + 4X \text{cov} \left(\frac{\hat{\beta}_0}{1-\hat{\gamma}} \frac{\hat{\beta}_1}{1-\hat{\gamma}} \right) =$$

$$= V(\hat{\eta}_0) + 4V(\hat{\eta}_1) X_i^2 + 4X \text{cov}(\hat{\eta}_0 \hat{\eta}_1)$$

$$(2A.15) \quad \hat{\eta}_0 = \frac{\hat{\beta}_0}{1-\hat{\gamma}}; \hat{\eta}_1 = \frac{\hat{\beta}_1}{1-\hat{\gamma}}; \text{cov}(\hat{\eta}_0 \hat{\eta}_1) = \text{cov} \left(\frac{\hat{\beta}_0}{1-\hat{\gamma}} \frac{\hat{\beta}_1}{1-\hat{\gamma}} \right)$$

Sin embargo, dada la posible existencia de distribuciones asimétricas, cabe estimar por simulación, en lugar de aproximaciones asintóticas.

A partir de la estimación del modelo objetivo, se dispone del vector de coeficientes “beta” y la matriz de varianzas y covarianzas correspondiente, elementos que se utilizan para simular el comportamiento hipotético de las variables.

$$(2A.16) \quad \hat{\delta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\gamma} \end{bmatrix} : \mathbf{N} \left\{ \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \gamma \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}(\hat{\beta}_0) & \mathbf{V}(\hat{\beta}_0\hat{\beta}_1) & \mathbf{V}(\hat{\beta}_0\hat{\gamma}) \\ & \mathbf{V}(\hat{\beta}_1) & \mathbf{V}(\hat{\beta}_1\hat{\gamma}) \\ & & \mathbf{V}(\hat{\gamma}) \end{bmatrix} \right\}$$

A partir de este momento, por simulación, se trata de construir unas cien mil realizaciones de los coeficientes beta estimados y empíricamente construir $\hat{\eta}$ y su distribución.

Dado que, la matriz estimada de covarianzas viene dada por la estimación del modelo, se recurre a la descomposición de Cholesky, de manera que se verifique lo siguiente:

$$(2A.17) \quad \mathbf{cov}(\hat{\beta}) = \mathbf{P}\mathbf{P}'$$

Considerando la variable aleatoria ε que sigue una normal independientemente distribuida del tipo (0,1), se verifica:

$$(2A.18) \quad \delta = \mathbf{P}\varepsilon$$

$$\mathbf{cov}(\delta) = \mathbf{P}[\mathbf{E}(\varepsilon\varepsilon')] \mathbf{P}' = \mathbf{P}\mathbf{P}' = \mathbf{cov}(\hat{\beta})$$

La matriz \mathbf{P} en este caso:

$$(2A.19) \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{11} & & \\ \mathbf{p}_{21} & \mathbf{p}_{22} & \\ \mathbf{p}_{31} & \mathbf{p}_{32} & \mathbf{p}_{33} \end{bmatrix}$$

Por tanto, se generan 100,000 realizaciones de:

$$(2A.20) \quad \tilde{\beta}_1 = \beta_0 + \eta_1$$

$$\tilde{\beta}_2 = \beta_1 + \eta_2$$

$$\tilde{\gamma} = \gamma + \eta_3$$

Siendo posible generar las siguientes variables:

$$(2A.21) \quad \omega_1 = p_{11} \cdot \varepsilon_1$$

$$\omega_2 = p_{21} \cdot \varepsilon_1 + p_{22} \cdot \varepsilon_2$$

$$\omega_3 = p_{31} \cdot \varepsilon_1 + p_{32} \cdot \varepsilon_2 + p_{33} \cdot \varepsilon_3$$

Se puede verificar estimando la matriz de varianzas y covarianzas de los omegas, y comparándola con la matriz de varianzas y covarianzas del modelo original.

A partir de los coeficientes beta simulados se simula el coeficiente

$$(2A.22) \quad \tilde{\eta} = \frac{\tilde{\beta}_o + 2\tilde{\beta}_1}{1 - \tilde{\gamma}}$$

La estimación por año viene dada por:

$$(2A.23) \quad \tilde{\eta} = \frac{\tilde{\beta}_o + 2\tilde{\beta}_1 y_t}{1 - \tilde{\gamma}}$$

La correspondiente distribución obtenida es:

Figura 2A.3: Elasticidad método alternativo

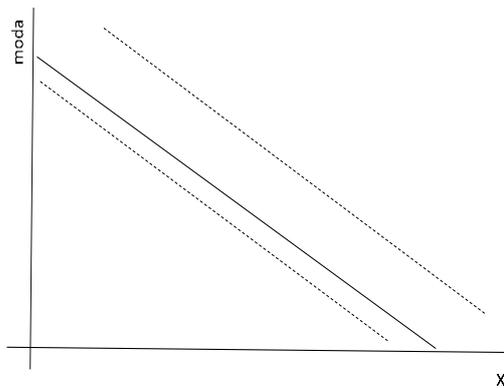
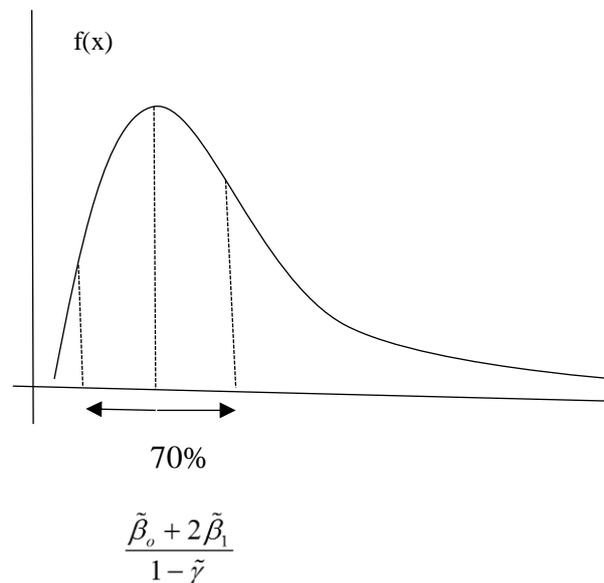


Figura 2A.4: Función de densidad Asimétrica



Dada la forma de la función, se considera la moda más representativa del valor puntual de la elasticidad que la media. Los límites inferior y superior se obtienen dejando dentro del intervalo 70,000 observaciones y con la condición de que la diferencia entre el límite superior e inferior sea mínima. Ello define un intervalo de confianza óptimo.

Gráficamente, la elasticidad estaría representada por la línea sin puntear y límite superior por la línea punteada arriba de la moda, mientras que el límite inferior estaría ubicado debajo de la moda.

Anexo 2A.2. Presentación pruebas de los supuestos de los modelos

Modelo energía	Modelo emisiones de CO ₂																																																																																																																																				
<p>Dependent Variable: LNTPES_POB Method: Least Squares Date: 07/07/16 Time: 13:30 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>-2.139042</td><td>0.738058</td><td>-2.898204</td><td>0.0064</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB</td><td>1.696141</td><td>0.674253</td><td>2.515584</td><td>0.0166</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB^2</td><td>-0.394708</td><td>0.171960</td><td>-2.295350</td><td>0.0278</td></tr> <tr><td>LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...</td><td>-0.167276</td><td>0.050808</td><td>-3.292337</td><td>0.0023</td></tr> <tr><td>LNTPES_POB(-1)</td><td>0.640580</td><td>0.102794</td><td>6.231708</td><td>0.0000</td></tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.821584 Mean dependent var -0.396188 Adjusted R-squared 0.801193 S.D. dependent var 0.068968 S.E. of regression 0.030751 Akaike info criterion -4.009316 Sum squared resid 0.033097 Schwarz criterion -3.798206 Log likelihood 85.18631 Hannan-Quinn criter. -3.932985 F-statistic 40.29260 Durbin-Watson stat 1.780696 Prob(F-statistic) 0.000000</p>	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	-2.139042	0.738058	-2.898204	0.0064	LNPIB_POB	1.696141	0.674253	2.515584	0.0166	LNPIB_POB^2	-0.394708	0.171960	-2.295350	0.0278	LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...	-0.167276	0.050808	-3.292337	0.0023	LNTPES_POB(-1)	0.640580	0.102794	6.231708	0.0000	<p>Dependent Variable: LNCO2_POB Method: Least Squares Date: 07/13/16 Time: 22:04 Sample (adjusted): 1973 2011 Included observations: 39 after adjustments Convergence achieved after 7 iterations</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>-1.436576</td><td>0.434562</td><td>-3.305803</td><td>0.0023</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB</td><td>1.203803</td><td>0.442202</td><td>2.722293</td><td>0.0104</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB^2</td><td>-0.294637</td><td>0.120955</td><td>-2.435928</td><td>0.0206</td></tr> <tr><td>@LOG(EP_RENOV/EP_TOTA...</td><td>-0.308807</td><td>0.063344</td><td>-4.875118</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>G</td><td>-0.120973</td><td>0.015173</td><td>-7.973087</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>LNCO2_POB(-1)</td><td>0.669431</td><td>0.064265</td><td>10.41665</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>AR(1)</td><td>-0.513875</td><td>0.167661</td><td>-3.064957</td><td>0.0044</td></tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.932749 Mean dependent var 0.319400 Adjusted R-squared 0.920140 S.D. dependent var 0.085538 S.E. of regression 0.024173 Akaike info criterion -4.446050 Sum squared resid 0.018698 Schwarz criterion -4.147462 Log likelihood 93.69798 Hannan-Quinn criter. -4.338920 F-statistic 73.97208 Durbin-Watson stat 1.952666 Prob(F-statistic) 0.000000</p> <p>Inverted AR Roots -0.51</p>	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	-1.436576	0.434562	-3.305803	0.0023	LNPIB_POB	1.203803	0.442202	2.722293	0.0104	LNPIB_POB^2	-0.294637	0.120955	-2.435928	0.0206	@LOG(EP_RENOV/EP_TOTA...	-0.308807	0.063344	-4.875118	0.0000	G	-0.120973	0.015173	-7.973087	0.0000	LNCO2_POB(-1)	0.669431	0.064265	10.41665	0.0000	AR(1)	-0.513875	0.167661	-3.064957	0.0044																																																														
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																	
C	-2.139042	0.738058	-2.898204	0.0064																																																																																																																																	
LNPIB_POB	1.696141	0.674253	2.515584	0.0166																																																																																																																																	
LNPIB_POB^2	-0.394708	0.171960	-2.295350	0.0278																																																																																																																																	
LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...	-0.167276	0.050808	-3.292337	0.0023																																																																																																																																	
LNTPES_POB(-1)	0.640580	0.102794	6.231708	0.0000																																																																																																																																	
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																	
C	-1.436576	0.434562	-3.305803	0.0023																																																																																																																																	
LNPIB_POB	1.203803	0.442202	2.722293	0.0104																																																																																																																																	
LNPIB_POB^2	-0.294637	0.120955	-2.435928	0.0206																																																																																																																																	
@LOG(EP_RENOV/EP_TOTA...	-0.308807	0.063344	-4.875118	0.0000																																																																																																																																	
G	-0.120973	0.015173	-7.973087	0.0000																																																																																																																																	
LNCO2_POB(-1)	0.669431	0.064265	10.41665	0.0000																																																																																																																																	
AR(1)	-0.513875	0.167661	-3.064957	0.0044																																																																																																																																	
<p>Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>F-statistic</th> <th>2.567209</th> <th>Prob. F(2,33)</th> <th>0.0920</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Obs*R-squared</td> <td>5.385599</td> <td>Prob. Chi-Square(2)</td> <td>0.0677</td> </tr> </tbody> </table> <p>Test Equation: Dependent Variable: RESID Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 15:35 Sample: 1972 2011 Included observations: 40 Presample missing value lagged residuals set to zero.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>-0.794143</td><td>0.855144</td><td>-0.928665</td><td>0.3598</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB</td><td>0.689633</td><td>0.768587</td><td>0.897273</td><td>0.3761</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB^2</td><td>-0.171942</td><td>0.194500</td><td>-0.884021</td><td>0.3831</td></tr> <tr><td>LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...</td><td>-0.034365</td><td>0.054078</td><td>-0.635468</td><td>0.5295</td></tr> <tr><td>LNTPES_POB(-1)</td><td>-0.169708</td><td>0.135456</td><td>-1.252869</td><td>0.2191</td></tr> <tr><td>RESID(-1)</td><td>0.239338</td><td>0.210665</td><td>1.136109</td><td>0.2641</td></tr> <tr><td>RESID(-2)</td><td>0.383116</td><td>0.182849</td><td>2.095265</td><td>0.0439</td></tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.134640 Mean dependent var 6.86E-16 Adjusted R-squared -0.022698 S.D. dependent var 0.029131 S.E. of regression 0.029460 Akaike info criterion -4.053925 Sum squared resid 0.028641 Schwarz criterion -3.758371 Log likelihood 88.07851 Hannan-Quinn criter. -3.947062 F-statistic 0.855736 Durbin-Watson stat 2.121708 Prob(F-statistic) 0.537118</p>	F-statistic	2.567209	Prob. F(2,33)	0.0920	Obs*R-squared	5.385599	Prob. Chi-Square(2)	0.0677	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	-0.794143	0.855144	-0.928665	0.3598	LNPIB_POB	0.689633	0.768587	0.897273	0.3761	LNPIB_POB^2	-0.171942	0.194500	-0.884021	0.3831	LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...	-0.034365	0.054078	-0.635468	0.5295	LNTPES_POB(-1)	-0.169708	0.135456	-1.252869	0.2191	RESID(-1)	0.239338	0.210665	1.136109	0.2641	RESID(-2)	0.383116	0.182849	2.095265	0.0439	<p>Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>F-statistic</th> <th>0.405101</th> <th>Prob. F(2,27)</th> <th>0.6709</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Obs*R-squared</td> <td>1.048798</td> <td>Prob. Chi-Square(2)</td> <td>0.5919</td> </tr> </tbody> </table> <p>Test Equation: Dependent Variable: RESID Method: Least Squares Date: 06/01/16 Time: 21:20 Sample: 1972 2007 Included observations: 36 Presample missing value lagged residuals set to zero.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>0.039524</td><td>0.971649</td><td>0.040677</td><td>0.9679</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB</td><td>-0.023343</td><td>0.992850</td><td>-0.023511</td><td>0.9814</td></tr> <tr><td>LNPIB_POB^2</td><td>-0.000725</td><td>0.250068</td><td>-0.002898</td><td>0.9977</td></tr> <tr><td>@LOG((EP_CARBO+EP_CRUDO)/EP_T...</td><td>-0.006005</td><td>0.097579</td><td>-0.061539</td><td>0.9514</td></tr> <tr><td>LNRENOV_P</td><td>0.004452</td><td>0.084938</td><td>0.052413</td><td>0.9586</td></tr> <tr><td>@TREND</td><td>0.000469</td><td>0.003188</td><td>0.147249</td><td>0.8840</td></tr> <tr><td>LNCO2_POB(-1)</td><td>-0.004571</td><td>0.102011</td><td>-0.044811</td><td>0.9646</td></tr> <tr><td>RESID(-1)</td><td>-0.042021</td><td>0.213122</td><td>-0.197168</td><td>0.8452</td></tr> <tr><td>RESID(-2)</td><td>0.169631</td><td>0.206571</td><td>0.821174</td><td>0.4187</td></tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.029133 Mean dependent var -1.52E-15 Adjusted R-squared -0.258531 S.D. dependent var 0.026522 S.E. of regression 0.029754 Akaike info criterion -3.979408 Sum squared resid 0.023903 Schwarz criterion -3.583528 Log likelihood 80.62934 Hannan-Quinn criter. -3.841235 F-statistic 0.101275 Durbin-Watson stat 1.807805 Prob(F-statistic) 0.998879</p>	F-statistic	0.405101	Prob. F(2,27)	0.6709	Obs*R-squared	1.048798	Prob. Chi-Square(2)	0.5919	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	0.039524	0.971649	0.040677	0.9679	LNPIB_POB	-0.023343	0.992850	-0.023511	0.9814	LNPIB_POB^2	-0.000725	0.250068	-0.002898	0.9977	@LOG((EP_CARBO+EP_CRUDO)/EP_T...	-0.006005	0.097579	-0.061539	0.9514	LNRENOV_P	0.004452	0.084938	0.052413	0.9586	@TREND	0.000469	0.003188	0.147249	0.8840	LNCO2_POB(-1)	-0.004571	0.102011	-0.044811	0.9646	RESID(-1)	-0.042021	0.213122	-0.197168	0.8452	RESID(-2)	0.169631	0.206571	0.821174	0.4187																										
F-statistic	2.567209	Prob. F(2,33)	0.0920																																																																																																																																		
Obs*R-squared	5.385599	Prob. Chi-Square(2)	0.0677																																																																																																																																		
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																	
C	-0.794143	0.855144	-0.928665	0.3598																																																																																																																																	
LNPIB_POB	0.689633	0.768587	0.897273	0.3761																																																																																																																																	
LNPIB_POB^2	-0.171942	0.194500	-0.884021	0.3831																																																																																																																																	
LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTA...	-0.034365	0.054078	-0.635468	0.5295																																																																																																																																	
LNTPES_POB(-1)	-0.169708	0.135456	-1.252869	0.2191																																																																																																																																	
RESID(-1)	0.239338	0.210665	1.136109	0.2641																																																																																																																																	
RESID(-2)	0.383116	0.182849	2.095265	0.0439																																																																																																																																	
F-statistic	0.405101	Prob. F(2,27)	0.6709																																																																																																																																		
Obs*R-squared	1.048798	Prob. Chi-Square(2)	0.5919																																																																																																																																		
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																	
C	0.039524	0.971649	0.040677	0.9679																																																																																																																																	
LNPIB_POB	-0.023343	0.992850	-0.023511	0.9814																																																																																																																																	
LNPIB_POB^2	-0.000725	0.250068	-0.002898	0.9977																																																																																																																																	
@LOG((EP_CARBO+EP_CRUDO)/EP_T...	-0.006005	0.097579	-0.061539	0.9514																																																																																																																																	
LNRENOV_P	0.004452	0.084938	0.052413	0.9586																																																																																																																																	
@TREND	0.000469	0.003188	0.147249	0.8840																																																																																																																																	
LNCO2_POB(-1)	-0.004571	0.102011	-0.044811	0.9646																																																																																																																																	
RESID(-1)	-0.042021	0.213122	-0.197168	0.8452																																																																																																																																	
RESID(-2)	0.169631	0.206571	0.821174	0.4187																																																																																																																																	
<p>Date: 07/16/16 Time: 19:21 Sample: 1971 2011 Included observations: 40</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Autocorrelation</th> <th>Partial Correlation</th> <th>AC</th> <th>PAC</th> <th>Q-Stat</th> <th>Prob</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.076</td><td>0.076</td><td>0.2471</td><td>0.619</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.07...</td><td>-0.08...</td><td>0.5081</td><td>0.776</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>-0.02...</td><td>-0.01...</td><td>0.5408</td><td>0.910</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.17...</td><td>-0.17...</td><td>1.8918</td><td>0.756</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>-0.15...</td><td>-0.13...</td><td>2.9923</td><td>0.701</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>-0.13...</td><td>-0.15...</td><td>3.9076</td><td>0.689</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.05...</td><td>-0.07...</td><td>4.0519</td><td>0.774</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>0.094</td><td>0.036</td><td>4.5196</td><td>0.807</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>-0.13...</td><td>-0.23...</td><td>5.5002</td><td>0.789</td><td></td></tr> <tr><td>1...</td><td>-0.10...</td><td>-0.18...</td><td>6.1505</td><td>0.802</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	1	0.076	0.076	0.2471	0.619		2	-0.07...	-0.08...	0.5081	0.776		3	-0.02...	-0.01...	0.5408	0.910		4	-0.17...	-0.17...	1.8918	0.756		5	-0.15...	-0.13...	2.9923	0.701		6	-0.13...	-0.15...	3.9076	0.689		7	-0.05...	-0.07...	4.0519	0.774		8	0.094	0.036	4.5196	0.807		9	-0.13...	-0.23...	5.5002	0.789		1...	-0.10...	-0.18...	6.1505	0.802		<p>Date: 07/16/16 Time: 19:22 Sample: 1971 2011 Included observations: 39</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Autocorrelation</th> <th>Partial Correlation</th> <th>AC</th> <th>PAC</th> <th>Q-Stat</th> <th>Prob</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.071</td><td>0.071</td><td>0.2135</td><td>0.644</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.08...</td><td>-0.09...</td><td>0.5479</td><td>0.760</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>0.151</td><td>0.167</td><td>1.5578</td><td>0.669</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>0.127</td><td>0.096</td><td>2.2961</td><td>0.681</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>-0.01...</td><td>-0.00...</td><td>2.3135</td><td>0.804</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>-0.07...</td><td>-0.07...</td><td>2.5663</td><td>0.861</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.02...</td><td>-0.05...</td><td>2.5902</td><td>0.920</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>-0.12...</td><td>-0.15...</td><td>3.4506</td><td>0.903</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>-0.10...</td><td>-0.07...</td><td>4.0569</td><td>0.908</td><td></td></tr> <tr><td>1...</td><td>-0.12...</td><td>-0.12...</td><td>4.9702</td><td>0.893</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	1	0.071	0.071	0.2135	0.644		2	-0.08...	-0.09...	0.5479	0.760		3	0.151	0.167	1.5578	0.669		4	0.127	0.096	2.2961	0.681		5	-0.01...	-0.00...	2.3135	0.804		6	-0.07...	-0.07...	2.5663	0.861		7	-0.02...	-0.05...	2.5902	0.920		8	-0.12...	-0.15...	3.4506	0.903		9	-0.10...	-0.07...	4.0569	0.908		1...	-0.12...	-0.12...	4.9702	0.893	
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob																																																																																																																																
1	0.076	0.076	0.2471	0.619																																																																																																																																	
2	-0.07...	-0.08...	0.5081	0.776																																																																																																																																	
3	-0.02...	-0.01...	0.5408	0.910																																																																																																																																	
4	-0.17...	-0.17...	1.8918	0.756																																																																																																																																	
5	-0.15...	-0.13...	2.9923	0.701																																																																																																																																	
6	-0.13...	-0.15...	3.9076	0.689																																																																																																																																	
7	-0.05...	-0.07...	4.0519	0.774																																																																																																																																	
8	0.094	0.036	4.5196	0.807																																																																																																																																	
9	-0.13...	-0.23...	5.5002	0.789																																																																																																																																	
1...	-0.10...	-0.18...	6.1505	0.802																																																																																																																																	
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob																																																																																																																																
1	0.071	0.071	0.2135	0.644																																																																																																																																	
2	-0.08...	-0.09...	0.5479	0.760																																																																																																																																	
3	0.151	0.167	1.5578	0.669																																																																																																																																	
4	0.127	0.096	2.2961	0.681																																																																																																																																	
5	-0.01...	-0.00...	2.3135	0.804																																																																																																																																	
6	-0.07...	-0.07...	2.5663	0.861																																																																																																																																	
7	-0.02...	-0.05...	2.5902	0.920																																																																																																																																	
8	-0.12...	-0.15...	3.4506	0.903																																																																																																																																	
9	-0.10...	-0.07...	4.0569	0.908																																																																																																																																	
1...	-0.12...	-0.12...	4.9702	0.893																																																																																																																																	

Anexo 2A.2. Presentación pruebas de los supuestos de los modelos (Continuación)

Modelo Energía	Modelo emisiones de CO ₂																																																																																																																																																						
<p>Heteroskedasticity Test: White</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">F-statistic</td> <td style="width: 15%;">1.212454</td> <td style="width: 15%;">Prob. F(4,35)</td> <td style="width: 15%;">0.3230</td> </tr> <tr> <td>Obs*R-squared</td> <td>4.868095</td> <td>Prob. Chi-Square(4)</td> <td>0.3011</td> </tr> <tr> <td>Scaled explained SS</td> <td>4.768309</td> <td>Prob. Chi-Square(4)</td> <td>0.3119</td> </tr> </table> <p>Test Equation: Dependent Variable: RESID^2 Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 16:21 Sample: 1972 2011 Included observations: 40</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Variable</th> <th style="text-align: right;">Coefficient</th> <th style="text-align: right;">Std. Error</th> <th style="text-align: right;">t-Statistic</th> <th style="text-align: right;">Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: right;">0.016178</td> <td style="text-align: right;">0.010321</td> <td style="text-align: right;">1.567435</td> <td style="text-align: right;">0.1260</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB^2</td> <td style="text-align: right;">-0.005515</td> <td style="text-align: right;">0.004659</td> <td style="text-align: right;">-1.183669</td> <td style="text-align: right;">0.2445</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB^2/2</td> <td style="text-align: right;">0.000590</td> <td style="text-align: right;">0.000602</td> <td style="text-align: right;">0.980215</td> <td style="text-align: right;">0.3337</td> </tr> <tr> <td>LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTAL)^...</td> <td style="text-align: right;">-0.001317</td> <td style="text-align: right;">0.000659</td> <td style="text-align: right;">-1.998860</td> <td style="text-align: right;">0.0534</td> </tr> <tr> <td>LNPES_POB(-1)^2</td> <td style="text-align: right;">-0.006882</td> <td style="text-align: right;">0.005120</td> <td style="text-align: right;">-1.344161</td> <td style="text-align: right;">0.1875</td> </tr> </tbody> </table> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>R-squared</td> <td style="text-align: right;">0.121702</td> <td>Mean dependent var</td> <td style="text-align: right;">0.000827</td> </tr> <tr> <td>Adjusted R-squared</td> <td style="text-align: right;">0.021326</td> <td>S.D. dependent var</td> <td style="text-align: right;">0.001340</td> </tr> <tr> <td>S.E. of regression</td> <td style="text-align: right;">0.001326</td> <td>Akaike info criterion</td> <td style="text-align: right;">-10.29678</td> </tr> <tr> <td>Sum squared resid</td> <td style="text-align: right;">6.15E-05</td> <td>Schwarz criterion</td> <td style="text-align: right;">-10.08567</td> </tr> <tr> <td>Log likelihood</td> <td style="text-align: right;">210.9356</td> <td>Hannan-Quinn criter.</td> <td style="text-align: right;">-10.22045</td> </tr> <tr> <td>F-statistic</td> <td style="text-align: right;">1.212454</td> <td>Durbin-Watson stat</td> <td style="text-align: right;">1.930288</td> </tr> <tr> <td>Prob(F-statistic)</td> <td style="text-align: right;">0.323032</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	F-statistic	1.212454	Prob. F(4,35)	0.3230	Obs*R-squared	4.868095	Prob. Chi-Square(4)	0.3011	Scaled explained SS	4.768309	Prob. Chi-Square(4)	0.3119	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	0.016178	0.010321	1.567435	0.1260	LNPIB_POB^2	-0.005515	0.004659	-1.183669	0.2445	LNPIB_POB^2/2	0.000590	0.000602	0.980215	0.3337	LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTAL)^...	-0.001317	0.000659	-1.998860	0.0534	LNPES_POB(-1)^2	-0.006882	0.005120	-1.344161	0.1875	R-squared	0.121702	Mean dependent var	0.000827	Adjusted R-squared	0.021326	S.D. dependent var	0.001340	S.E. of regression	0.001326	Akaike info criterion	-10.29678	Sum squared resid	6.15E-05	Schwarz criterion	-10.08567	Log likelihood	210.9356	Hannan-Quinn criter.	-10.22045	F-statistic	1.212454	Durbin-Watson stat	1.930288	Prob(F-statistic)	0.323032			<p>Heteroskedasticity Test: White</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">F-statistic</td> <td style="width: 15%;">1.529497</td> <td style="width: 15%;">Prob. F(6,32)</td> <td style="width: 15%;">0.2004</td> </tr> <tr> <td>Obs*R-squared</td> <td>8.691804</td> <td>Prob. Chi-Square(6)</td> <td>0.1917</td> </tr> <tr> <td>Scaled explained SS</td> <td>6.806514</td> <td>Prob. Chi-Square(6)</td> <td>0.3391</td> </tr> </table> <p>Test Equation: Dependent Variable: RESID^2 Method: Least Squares Date: 07/16/16 Time: 18:13 Sample: 1973 2011 Included observations: 39 White heteroskedasticity-consistent standard errors & covariance Collinear test regressors dropped from specification</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Variable</th> <th style="text-align: right;">Coefficient</th> <th style="text-align: right;">Std. Error</th> <th style="text-align: right;">t-Statistic</th> <th style="text-align: right;">Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: right;">0.009618</td> <td style="text-align: right;">0.008345</td> <td style="text-align: right;">1.152496</td> <td style="text-align: right;">0.2577</td> </tr> <tr> <td>GRADF_02^2</td> <td style="text-align: right;">-0.002549</td> <td style="text-align: right;">0.001961</td> <td style="text-align: right;">-1.300113</td> <td style="text-align: right;">0.2028</td> </tr> <tr> <td>GRADF_03^2</td> <td style="text-align: right;">0.000352</td> <td style="text-align: right;">0.000264</td> <td style="text-align: right;">1.336441</td> <td style="text-align: right;">0.1908</td> </tr> <tr> <td>GRADF_04^2</td> <td style="text-align: right;">0.000166</td> <td style="text-align: right;">0.000425</td> <td style="text-align: right;">0.392088</td> <td style="text-align: right;">0.6976</td> </tr> <tr> <td>GRADF_05^2</td> <td style="text-align: right;">-0.000114</td> <td style="text-align: right;">0.000272</td> <td style="text-align: right;">-0.419863</td> <td style="text-align: right;">0.6774</td> </tr> <tr> <td>GRADF_06^2</td> <td style="text-align: right;">0.002161</td> <td style="text-align: right;">0.002117</td> <td style="text-align: right;">1.020784</td> <td style="text-align: right;">0.3150</td> </tr> <tr> <td>GRADF_07^2</td> <td style="text-align: right;">-0.076552</td> <td style="text-align: right;">0.150825</td> <td style="text-align: right;">-0.507555</td> <td style="text-align: right;">0.6152</td> </tr> </tbody> </table> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>R-squared</td> <td style="text-align: right;">0.222867</td> <td>Mean dependent var</td> <td style="text-align: right;">0.000479</td> </tr> <tr> <td>Adjusted R-squared</td> <td style="text-align: right;">0.077154</td> <td>S.D. dependent var</td> <td style="text-align: right;">0.000741</td> </tr> <tr> <td>S.E. of regression</td> <td style="text-align: right;">0.000712</td> <td>Akaike info criterion</td> <td style="text-align: right;">-11.49680</td> </tr> <tr> <td>Sum squared resid</td> <td style="text-align: right;">1.62E-05</td> <td>Schwarz criterion</td> <td style="text-align: right;">-11.19821</td> </tr> <tr> <td>Log likelihood</td> <td style="text-align: right;">231.1876</td> <td>Hannan-Quinn criter.</td> <td style="text-align: right;">-11.38967</td> </tr> <tr> <td>F-statistic</td> <td style="text-align: right;">1.529497</td> <td>Durbin-Watson stat</td> <td style="text-align: right;">2.095764</td> </tr> <tr> <td>Prob(F-statistic)</td> <td style="text-align: right;">0.200359</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	F-statistic	1.529497	Prob. F(6,32)	0.2004	Obs*R-squared	8.691804	Prob. Chi-Square(6)	0.1917	Scaled explained SS	6.806514	Prob. Chi-Square(6)	0.3391	Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	C	0.009618	0.008345	1.152496	0.2577	GRADF_02^2	-0.002549	0.001961	-1.300113	0.2028	GRADF_03^2	0.000352	0.000264	1.336441	0.1908	GRADF_04^2	0.000166	0.000425	0.392088	0.6976	GRADF_05^2	-0.000114	0.000272	-0.419863	0.6774	GRADF_06^2	0.002161	0.002117	1.020784	0.3150	GRADF_07^2	-0.076552	0.150825	-0.507555	0.6152	R-squared	0.222867	Mean dependent var	0.000479	Adjusted R-squared	0.077154	S.D. dependent var	0.000741	S.E. of regression	0.000712	Akaike info criterion	-11.49680	Sum squared resid	1.62E-05	Schwarz criterion	-11.19821	Log likelihood	231.1876	Hannan-Quinn criter.	-11.38967	F-statistic	1.529497	Durbin-Watson stat	2.095764	Prob(F-statistic)	0.200359		
F-statistic	1.212454	Prob. F(4,35)	0.3230																																																																																																																																																				
Obs*R-squared	4.868095	Prob. Chi-Square(4)	0.3011																																																																																																																																																				
Scaled explained SS	4.768309	Prob. Chi-Square(4)	0.3119																																																																																																																																																				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																																			
C	0.016178	0.010321	1.567435	0.1260																																																																																																																																																			
LNPIB_POB^2	-0.005515	0.004659	-1.183669	0.2445																																																																																																																																																			
LNPIB_POB^2/2	0.000590	0.000602	0.980215	0.3337																																																																																																																																																			
LOG((EP_HIDRO+EP_GN)/EP_TOTAL)^...	-0.001317	0.000659	-1.998860	0.0534																																																																																																																																																			
LNPES_POB(-1)^2	-0.006882	0.005120	-1.344161	0.1875																																																																																																																																																			
R-squared	0.121702	Mean dependent var	0.000827																																																																																																																																																				
Adjusted R-squared	0.021326	S.D. dependent var	0.001340																																																																																																																																																				
S.E. of regression	0.001326	Akaike info criterion	-10.29678																																																																																																																																																				
Sum squared resid	6.15E-05	Schwarz criterion	-10.08567																																																																																																																																																				
Log likelihood	210.9356	Hannan-Quinn criter.	-10.22045																																																																																																																																																				
F-statistic	1.212454	Durbin-Watson stat	1.930288																																																																																																																																																				
Prob(F-statistic)	0.323032																																																																																																																																																						
F-statistic	1.529497	Prob. F(6,32)	0.2004																																																																																																																																																				
Obs*R-squared	8.691804	Prob. Chi-Square(6)	0.1917																																																																																																																																																				
Scaled explained SS	6.806514	Prob. Chi-Square(6)	0.3391																																																																																																																																																				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																																																																																																			
C	0.009618	0.008345	1.152496	0.2577																																																																																																																																																			
GRADF_02^2	-0.002549	0.001961	-1.300113	0.2028																																																																																																																																																			
GRADF_03^2	0.000352	0.000264	1.336441	0.1908																																																																																																																																																			
GRADF_04^2	0.000166	0.000425	0.392088	0.6976																																																																																																																																																			
GRADF_05^2	-0.000114	0.000272	-0.419863	0.6774																																																																																																																																																			
GRADF_06^2	0.002161	0.002117	1.020784	0.3150																																																																																																																																																			
GRADF_07^2	-0.076552	0.150825	-0.507555	0.6152																																																																																																																																																			
R-squared	0.222867	Mean dependent var	0.000479																																																																																																																																																				
Adjusted R-squared	0.077154	S.D. dependent var	0.000741																																																																																																																																																				
S.E. of regression	0.000712	Akaike info criterion	-11.49680																																																																																																																																																				
Sum squared resid	1.62E-05	Schwarz criterion	-11.19821																																																																																																																																																				
Log likelihood	231.1876	Hannan-Quinn criter.	-11.38967																																																																																																																																																				
F-statistic	1.529497	Durbin-Watson stat	2.095764																																																																																																																																																				
Prob(F-statistic)	0.200359																																																																																																																																																						
<p>C_how Breakpoint Test: 1996 Null Hypothesis: No breaks at specified breakpoints Varying regressors: All equation variables Equation Sample: 1972 2011</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">F-statistic</td> <td style="width: 15%;">3.046554</td> <td style="width: 15%;">Prob. F(5,30)</td> <td style="width: 15%;">0.0243</td> </tr> <tr> <td>Log likelihood ratio</td> <td>16.42498</td> <td>Prob. Chi-Square(5)</td> <td>0.0057</td> </tr> <tr> <td>Wald Statistic</td> <td>15.23277</td> <td>Prob. Chi-Square(5)</td> <td>0.0094</td> </tr> </table>	F-statistic	3.046554	Prob. F(5,30)	0.0243	Log likelihood ratio	16.42498	Prob. Chi-Square(5)	0.0057	Wald Statistic	15.23277	Prob. Chi-Square(5)	0.0094	<p>C_how Breakpoint Test: 1996 Null Hypothesis: No breaks at specified breakpoints Varying regressors: All equation variables Equation Sample: 1972 2007</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">F-statistic</td> <td style="width: 15%;">6.850417</td> <td style="width: 15%;">Prob. F(7,22)</td> <td style="width: 15%;">0.0002</td> </tr> <tr> <td>Log likelihood ratio</td> <td>41.64408</td> <td>Prob. Chi-Square(7)</td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>Wald Statistic</td> <td>47.95292</td> <td>Prob. Chi-Square(7)</td> <td>0.0000</td> </tr> </table>	F-statistic	6.850417	Prob. F(7,22)	0.0002	Log likelihood ratio	41.64408	Prob. Chi-Square(7)	0.0000	Wald Statistic	47.95292	Prob. Chi-Square(7)	0.0000																																																																																																																														
F-statistic	3.046554	Prob. F(5,30)	0.0243																																																																																																																																																				
Log likelihood ratio	16.42498	Prob. Chi-Square(5)	0.0057																																																																																																																																																				
Wald Statistic	15.23277	Prob. Chi-Square(5)	0.0094																																																																																																																																																				
F-statistic	6.850417	Prob. F(7,22)	0.0002																																																																																																																																																				
Log likelihood ratio	41.64408	Prob. Chi-Square(7)	0.0000																																																																																																																																																				
Wald Statistic	47.95292	Prob. Chi-Square(7)	0.0000																																																																																																																																																				
<p>Variance Inflation Factors Date: 07/16/16 Time: 19:20 Sample: 1971 2011 Included observations: 40</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Variable</th> <th style="text-align: right;">Coefficient Variance</th> <th style="text-align: right;">Uncentered VIF</th> <th style="text-align: right;">Centered VIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: right;">0.544730</td> <td style="text-align: right;">23042.02</td> <td style="text-align: right;">NA</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB</td> <td style="text-align: right;">0.454617</td> <td style="text-align: right;">63428.22</td> <td style="text-align: right;">701.9576</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB^2</td> <td style="text-align: right;">0.029570</td> <td style="text-align: right;">14208.48</td> <td style="text-align: right;">600.6901</td> </tr> <tr> <td>LOG((EP_HIDRO+EP...</td> <td style="text-align: right;">0.002581</td> <td style="text-align: right;">227.7225</td> <td style="text-align: right;">10.03767</td> </tr> <tr> <td>LNPES_POB(-1)</td> <td style="text-align: right;">0.010567</td> <td style="text-align: right;">72.81372</td> <td style="text-align: right;">2.112210</td> </tr> </tbody> </table>	Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF	C	0.544730	23042.02	NA	LNPIB_POB	0.454617	63428.22	701.9576	LNPIB_POB^2	0.029570	14208.48	600.6901	LOG((EP_HIDRO+EP...	0.002581	227.7225	10.03767	LNPES_POB(-1)	0.010567	72.81372	2.112210	<p>Variance Inflation Factors Date: 07/16/16 Time: 19:19 Sample: 1971 2011 Included observations: 39</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Variable</th> <th style="text-align: right;">Coefficient Variance</th> <th style="text-align: right;">Uncentered VIF</th> <th style="text-align: right;">Centered VIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: right;">0.188844</td> <td style="text-align: right;">28886.99</td> <td style="text-align: right;">NA</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB</td> <td style="text-align: right;">0.195542</td> <td style="text-align: right;">98885.88</td> <td style="text-align: right;">1011.418</td> </tr> <tr> <td>LNPIB_POB^2</td> <td style="text-align: right;">0.014630</td> <td style="text-align: right;">25461.04</td> <td style="text-align: right;">999.5184</td> </tr> <tr> <td>@LOG(EP_RENO/E...</td> <td style="text-align: right;">0.004012</td> <td style="text-align: right;">954.5015</td> <td style="text-align: right;">10.74314</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td style="text-align: right;">0.000230</td> <td style="text-align: right;">12.13219</td> <td style="text-align: right;">7.811726</td> </tr> <tr> <td>LNCO2_POB(-1)</td> <td style="text-align: right;">0.004130</td> <td style="text-align: right;">67.12292</td> <td style="text-align: right;">4.567896</td> </tr> <tr> <td>AR(1)</td> <td style="text-align: right;">0.028110</td> <td style="text-align: right;">1.068279</td> <td style="text-align: right;">1.067828</td> </tr> </tbody> </table>	Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF	C	0.188844	28886.99	NA	LNPIB_POB	0.195542	98885.88	1011.418	LNPIB_POB^2	0.014630	25461.04	999.5184	@LOG(EP_RENO/E...	0.004012	954.5015	10.74314	G	0.000230	12.13219	7.811726	LNCO2_POB(-1)	0.004130	67.12292	4.567896	AR(1)	0.028110	1.068279	1.067828																																																																																														
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF																																																																																																																																																				
C	0.544730	23042.02	NA																																																																																																																																																				
LNPIB_POB	0.454617	63428.22	701.9576																																																																																																																																																				
LNPIB_POB^2	0.029570	14208.48	600.6901																																																																																																																																																				
LOG((EP_HIDRO+EP...	0.002581	227.7225	10.03767																																																																																																																																																				
LNPES_POB(-1)	0.010567	72.81372	2.112210																																																																																																																																																				
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF																																																																																																																																																				
C	0.188844	28886.99	NA																																																																																																																																																				
LNPIB_POB	0.195542	98885.88	1011.418																																																																																																																																																				
LNPIB_POB^2	0.014630	25461.04	999.5184																																																																																																																																																				
@LOG(EP_RENO/E...	0.004012	954.5015	10.74314																																																																																																																																																				
G	0.000230	12.13219	7.811726																																																																																																																																																				
LNCO2_POB(-1)	0.004130	67.12292	4.567896																																																																																																																																																				
AR(1)	0.028110	1.068279	1.067828																																																																																																																																																				

Anexo 2A.2. Presentación pruebas de los supuestos de los modelos (Continuación)

Pruebas de raíz unitaria

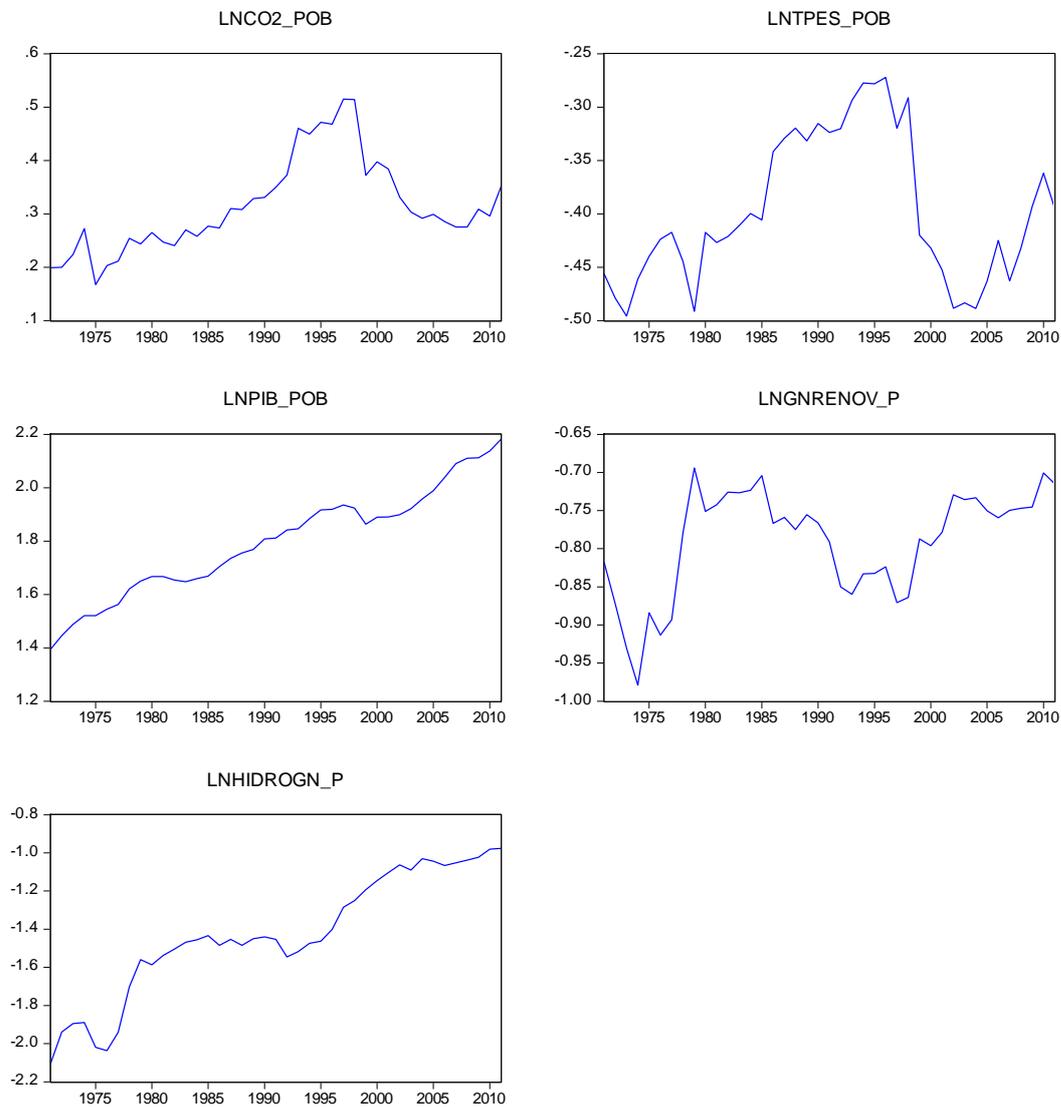
<p>Null Hypothesis: LNTPES_POB has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-1.714816</td> <td>0.4163</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.605593</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.936942</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.606857</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LNTPES_POB) Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 17:08 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LNTPES_POB(-1)</td> <td>-0.133634</td> <td>0.077929</td> <td>-1.714816</td> <td>0.0945</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>-0.051616</td> <td>0.031454</td> <td>-1.641024</td> <td>0.1090</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.071826 Mean dependent var 0.001533 Adjusted R-squared 0.047400 S.D. dependent var 0.034714 S.E. of regression 0.033881 Akaike info criterion -3.883194 Sum squared resid 0.043622 Schwarz criterion -3.798750 Log likelihood 79.66388 Hannan-Quinn criter. -3.852662 F-statistic 2.940593 Durbin-Watson stat 2.054101 Prob(F-statistic) 0.094525</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.714816	0.4163	Test critical values:			1% level	-3.605593		5% level	-2.936942		10% level	-2.606857		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	LNTPES_POB(-1)	-0.133634	0.077929	-1.714816	0.0945	C	-0.051616	0.031454	-1.641024	0.1090	<p>Null Hypothesis: LNCO2_POB has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-1.716817</td> <td>0.4153</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.605593</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.936942</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.606857</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LNCO2_POB) Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 16:54 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LNCO2_POB(-1)</td> <td>-0.120496</td> <td>0.070186</td> <td>-1.716817</td> <td>0.0942</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.041474</td> <td>0.022777</td> <td>1.820852</td> <td>0.0765</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.071982 Mean dependent var 0.003807 Adjusted R-squared 0.047560 S.D. dependent var 0.039648 S.E. of regression 0.038693 Akaike info criterion -3.617598 Sum squared resid 0.056892 Schwarz criterion -3.533154 Log likelihood 74.35197 Hannan-Quinn criter. -3.587066 F-statistic 2.947462 Durbin-Watson stat 2.210377 Prob(F-statistic) 0.094154</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.716817	0.4153	Test critical values:			1% level	-3.605593		5% level	-2.936942		10% level	-2.606857		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	LNCO2_POB(-1)	-0.120496	0.070186	-1.716817	0.0942	C	0.041474	0.022777	1.820852	0.0765										
	t-Statistic	Prob.*																																																																											
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.714816	0.4163																																																																											
Test critical values:																																																																													
1% level	-3.605593																																																																												
5% level	-2.936942																																																																												
10% level	-2.606857																																																																												
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																									
LNTPES_POB(-1)	-0.133634	0.077929	-1.714816	0.0945																																																																									
C	-0.051616	0.031454	-1.641024	0.1090																																																																									
	t-Statistic	Prob.*																																																																											
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.716817	0.4153																																																																											
Test critical values:																																																																													
1% level	-3.605593																																																																												
5% level	-2.936942																																																																												
10% level	-2.606857																																																																												
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																									
LNCO2_POB(-1)	-0.120496	0.070186	-1.716817	0.0942																																																																									
C	0.041474	0.022777	1.820852	0.0765																																																																									
<p>Null Hypothesis: LNPIB_POB has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-0.584937</td> <td>0.8627</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.605593</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.936942</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.606857</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LNPIB_POB) Method: Least Squares Date: 07/01/16 Time: 01:54 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LNPIB_POB(-1)</td> <td>-0.010832</td> <td>0.018518</td> <td>-0.584937</td> <td>0.5620</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.039014</td> <td>0.033271</td> <td>1.172631</td> <td>0.2482</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.008924 Mean dependent var 0.019664 Adjusted R-squared -0.017157 S.D. dependent var 0.022282 S.E. of regression 0.022472 Akaike info criterion -4.704386 Sum squared resid 0.019190 Schwarz criterion -4.619942 Log likelihood 96.08771 Hannan-Quinn criter. -4.673853 F-statistic 0.342152 Durbin-Watson stat 1.350250 Prob(F-statistic) 0.562047</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.584937	0.8627	Test critical values:			1% level	-3.605593		5% level	-2.936942		10% level	-2.606857		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	LNPIB_POB(-1)	-0.010832	0.018518	-0.584937	0.5620	C	0.039014	0.033271	1.172631	0.2482	<p>Null Hypothesis: LNRENOV_P has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 2 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-0.084281</td> <td>0.9438</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.621023</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.943427</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.610263</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LNRENOV_P) Method: Least Squares Date: 06/01/16 Time: 21:55 Sample (adjusted): 1974 2010 Included observations: 37 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LNRENOV_P(-1)</td> <td>-0.007826</td> <td>0.092858</td> <td>-0.084281</td> <td>0.9333</td> </tr> <tr> <td>D(LNRENOV_P(-1))</td> <td>-0.046723</td> <td>0.172177</td> <td>-0.271363</td> <td>0.7878</td> </tr> <tr> <td>D(LNRENOV_P(-2))</td> <td>-0.375725</td> <td>0.165452</td> <td>-2.270902</td> <td>0.0298</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>-0.022388</td> <td>0.114028</td> <td>-0.196340</td> <td>0.8455</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.145997 Mean dependent var -0.008922 Adjusted R-squared 0.068360 S.D. dependent var 0.070725 S.E. of regression 0.068265 Akaike info criterion -2.429042 Sum squared resid 0.153782 Schwarz criterion -2.254889 Log likelihood 48.93728 Hannan-Quinn criter. -2.367645 F-statistic 1.880518 Durbin-Watson stat 2.028747 Prob(F-statistic) 0.152080</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.084281	0.9438	Test critical values:			1% level	-3.621023		5% level	-2.943427		10% level	-2.610263		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	LNRENOV_P(-1)	-0.007826	0.092858	-0.084281	0.9333	D(LNRENOV_P(-1))	-0.046723	0.172177	-0.271363	0.7878	D(LNRENOV_P(-2))	-0.375725	0.165452	-2.270902	0.0298	C	-0.022388	0.114028	-0.196340	0.8455
	t-Statistic	Prob.*																																																																											
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.584937	0.8627																																																																											
Test critical values:																																																																													
1% level	-3.605593																																																																												
5% level	-2.936942																																																																												
10% level	-2.606857																																																																												
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																									
LNPIB_POB(-1)	-0.010832	0.018518	-0.584937	0.5620																																																																									
C	0.039014	0.033271	1.172631	0.2482																																																																									
	t-Statistic	Prob.*																																																																											
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.084281	0.9438																																																																											
Test critical values:																																																																													
1% level	-3.621023																																																																												
5% level	-2.943427																																																																												
10% level	-2.610263																																																																												
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																																									
LNRENOV_P(-1)	-0.007826	0.092858	-0.084281	0.9333																																																																									
D(LNRENOV_P(-1))	-0.046723	0.172177	-0.271363	0.7878																																																																									
D(LNRENOV_P(-2))	-0.375725	0.165452	-2.270902	0.0298																																																																									
C	-0.022388	0.114028	-0.196340	0.8455																																																																									

Anexo 2A.2. Presentación pruebas de los supuestos de los modelos (Continuación)

<p>Null Hypothesis: RESID01_TPES_71_2011 has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-5.447034</td> <td>0.0001</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.610453</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.938987</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.607932</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(RESID01_TPES_71_2011) Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 18:23 Sample (adjusted): 1973 2011 Included observations: 39 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RESID01_TPES_71_2011(-... C</td> <td>-0.891341 -5.25E-05</td> <td>0.163638 0.004761</td> <td>-5.447034 -0.011021</td> <td>0.0000 0.9913</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.445029 Mean dependent var -0.000262 Adjusted R-squared 0.430030 S.D. dependent var 0.039381 S.E. of regression 0.029731 Akaike info criterion -4.143314 Sum squared resid 0.032706 Schwarz criterion -4.058004 Log likelihood 82.79463 Hannan-Quinn criter. -4.112706 F-statistic 29.67018 Durbin-Watson stat 2.044100 Prob(F-statistic) 0.000004</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-5.447034	0.0001	Test critical values:			1% level	-3.610453		5% level	-2.938987		10% level	-2.607932		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	RESID01_TPES_71_2011(-... C	-0.891341 -5.25E-05	0.163638 0.004761	-5.447034 -0.011021	0.0000 0.9913	<p>Null Hypothesis: RESID01_CO2_71_2011 has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-6.025858</td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.615588</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.941145</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.609066</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(RESID01_CO2_71_2011) Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 18:31 Sample (adjusted): 1974 2011 Included observations: 38 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RESID01_CO2_71_2011(-... C</td> <td>-1.035465 -0.000620</td> <td>0.171837 0.003649</td> <td>-6.025858 -0.169830</td> <td>0.0000 0.8661</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.502150 Mean dependent var 0.000457 Adjusted R-squared 0.488321 S.D. dependent var 0.031410 S.E. of regression 0.022468 Akaike info criterion -4.702265 Sum squared resid 0.018173 Schwarz criterion -4.616076 Log likelihood 91.34303 Hannan-Quinn criter. -4.671599 F-statistic 36.31096 Durbin-Watson stat 1.953237 Prob(F-statistic) 0.000001</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-6.025858	0.0000	Test critical values:			1% level	-3.615588		5% level	-2.941145		10% level	-2.609066		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	RESID01_CO2_71_2011(-... C	-1.035465 -0.000620	0.171837 0.003649	-6.025858 -0.169830	0.0000 0.8661
	t-Statistic	Prob.*																																																							
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-5.447034	0.0001																																																							
Test critical values:																																																									
1% level	-3.610453																																																								
5% level	-2.938987																																																								
10% level	-2.607932																																																								
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																					
RESID01_TPES_71_2011(-... C	-0.891341 -5.25E-05	0.163638 0.004761	-5.447034 -0.011021	0.0000 0.9913																																																					
	t-Statistic	Prob.*																																																							
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-6.025858	0.0000																																																							
Test critical values:																																																									
1% level	-3.615588																																																								
5% level	-2.941145																																																								
10% level	-2.609066																																																								
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																					
RESID01_CO2_71_2011(-... C	-1.035465 -0.000620	0.171837 0.003649	-6.025858 -0.169830	0.0000 0.8661																																																					
<p>Null Hypothesis: LNHIDROGN_P has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-1.676978</td> <td>0.4349</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.605593</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.936942</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.606857</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(LNHIDROGN_P) Method: Least Squares Date: 07/14/16 Time: 18:46 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LNHIDROGN_P(-1) C</td> <td>-0.052825 -0.047902</td> <td>0.031500 0.046427</td> <td>-1.676978 -1.031785</td> <td>0.1018 0.3087</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.068907 Mean dependent var 0.028172 Adjusted R-squared 0.044405 S.D. dependent var 0.063908 S.E. of regression 0.062473 Akaike info criterion -2.659472 Sum squared resid 0.148307 Schwarz criterion -2.575028 Log likelihood 55.18943 Hannan-Quinn criter. -2.628939 F-statistic 2.812256 Durbin-Watson stat 1.285632 Prob(F-statistic) 0.101756</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.676978	0.4349	Test critical values:			1% level	-3.605593		5% level	-2.936942		10% level	-2.606857		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	LNHIDROGN_P(-1) C	-0.052825 -0.047902	0.031500 0.046427	-1.676978 -1.031785	0.1018 0.3087	<p>Null Hypothesis: G has a unit root Exogenous: Constant Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Augmented Dickey-Fuller test statistic</td> <td>-0.689202</td> <td>0.8380</td> </tr> <tr> <td>Test critical values:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> 1% level</td> <td>-3.605593</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 5% level</td> <td>-2.936942</td> <td></td> </tr> <tr> <td> 10% level</td> <td>-2.606857</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*MacKinnon (1996) one-sided p-values.</p> <p>Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(G) Method: Least Squares Date: 07/16/16 Time: 18:33 Sample (adjusted): 1972 2011 Included observations: 40 after adjustments</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Coefficient</th> <th>Std. Error</th> <th>t-Statistic</th> <th>Prob.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G(-1) C</td> <td>-0.037037 0.037037</td> <td>0.053739 0.030636</td> <td>-0.689202 1.208941</td> <td>0.4949 0.2342</td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared 0.012346 Mean dependent var 0.025000 Adjusted R-squared -0.013645 S.D. dependent var 0.158114 S.E. of regression 0.159189 Akaike info criterion -0.788743 Sum squared resid 0.962963 Schwarz criterion -0.704299 Log likelihood 17.77485 Hannan-Quinn criter. -0.758210 F-statistic 0.475000 Durbin-Watson stat 2.001425 Prob(F-statistic) 0.494883</p>		t-Statistic	Prob.*	Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.689202	0.8380	Test critical values:			1% level	-3.605593		5% level	-2.936942		10% level	-2.606857		Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	G(-1) C	-0.037037 0.037037	0.053739 0.030636	-0.689202 1.208941	0.4949 0.2342
	t-Statistic	Prob.*																																																							
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.676978	0.4349																																																							
Test critical values:																																																									
1% level	-3.605593																																																								
5% level	-2.936942																																																								
10% level	-2.606857																																																								
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																					
LNHIDROGN_P(-1) C	-0.052825 -0.047902	0.031500 0.046427	-1.676978 -1.031785	0.1018 0.3087																																																					
	t-Statistic	Prob.*																																																							
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.689202	0.8380																																																							
Test critical values:																																																									
1% level	-3.605593																																																								
5% level	-2.936942																																																								
10% level	-2.606857																																																								
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.																																																					
G(-1) C	-0.037037 0.037037	0.053739 0.030636	-0.689202 1.208941	0.4949 0.2342																																																					

**Anexo 2A.2. Evolución de las variables utilizadas en los modelos.
Colombia, 1971-2011 (Continuación)**

Figura 2A.5. Variables utilizadas en los modelos de ajuste parcial



Anexo 2A.3. Interpretación de las pruebas estadísticas aplicadas a los modelos estimados.

Al realizar el contraste de Breusch_Godfrey los resultados para los modelos 1 y 2, a dos retardos, permiten concluir que los errores no muestran un esquema autoregresivo dada la no significancia de resid (-1) y resid (-2). En todos los casos, no se rechaza hipótesis nula de ausencia de autocorrelación a un nivel de significancia del 1%.

Los correlogramas de los modelos 1 y 2 (previa corrección de la autocorrelación), se estimaron a 10 rezagos, lo que permite contrastar para cada retardo la hipótesis nula de que no hay autocorrelación en dicho orden. De los correlogramas, sobresalen dos hechos: i) La función de autocorrelación señala que ningún rezago es estadísticamente diferente de cero a nivel individual, puesto que todos están por dentro del límite del 95% de confianza. En éstos, no se observa ningún coeficiente de autocorrelación simple fuera de las bandas, al analizar la significancia estadística de los Pk (PAC) se observa que en ningún modelo el PAC está fuera del intervalo, en los modelos 1 y 2 el intervalo es (-0.3267, 0.3267), ii) La función de autocorrelación parcial indica que todas las PAC son estadísticamente no significativas, esto quiere decir que los coeficientes muestrales están dentro de las bandas, por lo que no hay evidencia empírica para rechazar la hipótesis de que los valores son iguales a cero a un nivel de significancia del 5%.

La detección de heterocedasticidad por la prueba de Breusch-Pagan Godfrey y por White no rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad.

Anexo 2A.4. Tabla elasticidades corto plazo y largo plazo con sus respectivos intervalos. Colombia 1971-2011

Año	Elasticidad CO2 CP			Elasticidad Energía CP			Elasticidad CO2 LP			Elasticidad Energía LP		
	LI		LS	LI		LS	LI		LS	LI		LS
1971	0.27	0.38	0.49	0.39	0.59	0.80	0.83	1.16	1.49	0.75	1.50	3.20
1972	0.26	0.35	0.45	0.37	0.56	0.74	0.77	1.07	1.38	0.78	1.30	3.00
1973	0.24	0.33	0.41	0.35	0.52	0.69	0.73	1.00	1.26	0.70	1.28	2.80
1974	0.23	0.31	0.39	0.33	0.50	0.66	0.69	0.94	1.19	0.68	1.20	2.65
1975	0.23	0.31	0.39	0.33	0.50	0.66	0.69	0.94	1.19	0.75	1.25	2.45
1976	0.22	0.29	0.37	0.32	0.48	0.63	0.67	0.90	1.13	0.65	1.18	2.40
1977	0.22	0.28	0.35	0.31	0.46	0.61	0.65	0.86	1.08	0.71	1.15	2.26
1978	0.19	0.25	0.30	0.29	0.42	0.55	0.58	0.76	0.94	0.65	0.95	2.02
1979	0.18	0.23	0.28	0.27	0.39	0.52	0.55	0.71	0.86	0.62	0.90	1.89
1980	0.18	0.22	0.27	0.26	0.38	0.50	0.53	0.67	0.82	0.60	0.90	1.84
1981	0.18	0.22	0.27	0.26	0.38	0.50	0.53	0.67	0.82	0.60	0.90	1.82
1982	0.18	0.23	0.28	0.27	0.39	0.51	0.55	0.70	0.85	0.61	0.95	1.87
1983	0.18	0.23	0.28	0.27	0.40	0.52	0.55	0.71	0.87	0.61	0.90	1.91
1984	0.18	0.23	0.27	0.27	0.39	0.51	0.54	0.69	0.84	0.60	0.90	1.87
1985	0.18	0.22	0.27	0.26	0.38	0.50	0.53	0.67	0.82	0.60	0.95	1.82
1986	0.16	0.20	0.24	0.24	0.35	0.46	0.49	0.61	0.73	0.55	0.80	1.65
1987	0.15	0.18	0.21	0.23	0.33	0.43	0.45	0.55	0.65	0.53	0.75	1.53
1988	0.14	0.17	0.20	0.22	0.31	0.41	0.42	0.52	0.61	0.47	0.70	1.48
1989	0.13	0.16	0.19	0.21	0.30	0.39	0.40	0.49	0.58	0.49	0.73	1.40
1990	0.11	0.14	0.16	0.19	0.27	0.35	0.34	0.42	0.50	0.44	0.65	1.24
1991	0.11	0.14	0.16	0.18	0.27	0.35	0.34	0.42	0.49	0.43	0.65	1.23
1992	0.09	0.12	0.14	0.17	0.24	0.32	0.28	0.36	0.44	0.40	0.58	1.15
1993	0.09	0.12	0.14	0.16	0.24	0.32	0.28	0.35	0.43	0.40	0.55	1.17
1994	0.06	0.09	0.12	0.14	0.21	0.28	0.20	0.28	0.37	0.30	0.50	1.00
1995	0.04	0.07	0.11	0.11	0.18	0.25	0.12	0.23	0.33	0.20	0.45	1.00
1996	0.04	0.07	0.11	0.11	0.18	0.25	0.12	0.22	0.33	0.20	0.45	1.00
1997	0.03	0.06	0.10	0.10	0.17	0.24	0.08	0.19	0.31	0.20	0.43	0.99
1998	0.04	0.07	0.10	0.11	0.18	0.25	0.11	0.21	0.32	0.20	0.43	1.07
1999	0.08	0.11	0.13	0.15	0.23	0.30	0.24	0.32	0.40	0.35	0.53	1.10
2000	0.06	0.09	0.12	0.13	0.20	0.27	0.18	0.27	0.36	0.30	0.48	1.10
2001	0.06	0.09	0.12	0.13	0.20	0.27	0.18	0.27	0.36	0.30	0.48	1.00
2002	0.05	0.08	0.12	0.13	0.20	0.27	0.16	0.26	0.35	0.30	0.45	1.00
2003	0.04	0.07	0.11	0.11	0.18	0.25	0.11	0.22	0.32	0.25	0.43	1.07
2004	0.01	0.05	0.09	0.08	0.15	0.22	0.02	0.15	0.28	0.10	0.38	1.00
2005	-0.01	0.03	0.08	0.06	0.13	0.20	-0.05	0.10	0.24	0.00	0.33	0.97
2006	-0.05	0.00	0.06	0.01	0.09	0.16	-0.17	0.01	0.19	-0.20	0.25	0.80
2007	-0.10	-0.03	0.04	-0.04	0.05	0.13	-0.30	-0.09	0.13	-0.39	0.13	0.70
2008	-0.11	-0.04	0.03	-0.06	0.03	0.12	-0.36	-0.12	0.11	-0.50	0.10	0.68
2009	-0.11	-0.04	0.03	-0.06	0.03	0.12	-0.36	-0.13	0.11	-0.60	0.10	0.60
2010	-0.14	-0.06	0.02	-0.08	0.01	0.10	-0.42	-0.17	0.08	-0.70	0.05	0.60
2011	-0.17	-0.08	0.01	-0.13	-0.03	0.08	-0.54	-0.25	0.04	-0.90	0.00	0.50

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la IEA (2012).

Nota: Límite inferior del intervalo (LI) y Límite superior del intervalo (LS).

Capítulo 3: Análisis del cambio estructural del consumo de energía primaria en Colombia

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo analizar el cambio estructural del consumo de energía primaria total productiva y estimar las elasticidades sectoriales de dicho consumo, desde un enfoque Input-Output. Para cumplir estos objetivos, se sigue la metodología de Proops (1984) y de Alcántara y Padilla (2003). Para la estimación del vector de energía primaria se utilizó la metodología de Alcántara y Roca (1995). La investigación representa la primera aplicación de este tipo que se desarrolla para Colombia.

El análisis de cambio estructural se realiza para dos períodos 1996-2005 y 2005-2010. Los resultados del análisis convencional muestran, que la estructura productiva y el nivel de demanda final son los principales factores explicativos del crecimiento del consumo energético. Asimismo, se observa que el componente tecnológico, es el factor que mejor explica el descenso del mencionado consumo, relegando a un segundo plano la interacción entre los distintos efectos.

Al examinar el cambio estructural desde un enfoque alternativo, esto es, considerando la energía utilizada a nivel sectorial para producir bienes, se verifica el rol fundamental del cambio técnico en ambos períodos analizados, pues el descenso en el consumo energético se debe principalmente a los cambios tecnológicos en su utilización. De otro lado, el aumento en el uso de la energía se explica por la variación en el comercio interindustrial en términos de tal uso.

La estimación de elasticidades sectoriales para los años 1996, 2005 y 2010, identifica reiteradamente como sectores clave: otros sectores (servicios) y transporte terrestre. En 2005 y 2010 también se destaca química y petroquímica. En 1996 es clave el sector alimentos y tabaco. Por lo tanto, es sobre estos sectores sobre los cuales se deben focalizar los esfuerzos de una política de incentivos, de cara a la conservación y ahorro de la energía, con el fin de alcanzar una mayor eficiencia energética en el país.

3.1. Introducción

En la actualidad, el cambio estructural del sector energético es una exigencia de la lucha contra el cambio climático, pues se requiere que las energías renovables logren una mayor cuota del mercado en el consumo final de energía. Colombia se une a esta lucha mediante su compromiso de reducción de emisiones de un 20%, convirtiendo la descarbonización del sistema energético en una acción prioritaria (Correa, 2015).

En el caso colombiano, el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 contempla entre sus lineamientos estratégicos para la sostenibilidad ambiental, promover el uso eficiente de la energía y priorizar el uso de energías renovables (DNP, 2011). No obstante, la ausencia de información sobre equipamiento, la falta de series completas y homogéneas de valor agregado industrial desagregado por subsectores, dificulta estimar cuánto de las mejoras en la eficiencia o el consumo energético obedecen a: i) cambios en la estructura productiva, ii) a cambios en la demanda, y/o iii) a cambios relacionados con la mejora en los equipamientos y procesos tecnológicos. Y a la forma como estos cambios pueden afectar el consumo específico de energía en cada actividad económica (UPME, 2011). Por lo que el presente estudio da cuenta sobre dónde surgen estos cambios y cuales sectores son los más dinámicos.

En Colombia, el desarrollo del sector minero-energético es una prioridad, ya que se lo considera una locomotora del crecimiento. Se han estimado proyecciones de producción de petróleo y carbón elevadas para los próximos años y se espera alza en los precios internacionales de la canasta minero energética. Además, se planea una intensa actividad de exploración en diferentes regiones del país, lo que se une a la incertidumbre en el abastecimiento del gas natural (COLCIENCIAS, 2012; 2006; UPME, 2003).

Para realizar el presente análisis se usa el enfoque input-output (IO, en adelante). La aplicación de esta técnica al campo energético es considerada una línea de gran interés en la investigación (Roca et al., 2007). La metodología ha sido reconocida en la literatura como un herramienta potente para analizar los flujos materiales de la economía (Hoekstra, 2005; United Nations, 2000). El presente trabajo cubre la escasez de análisis sobre cambio estructural en el consumo de energía primaria utilizando esta metodología, dado que en la revisión bibliográfica realizada no se encontraron estudios similares para el país.

El trabajo parte de los balances energéticos publicados por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2007, 2012, 2014), y aplica el método sugerido por Alcántara y Roca (1995) para transformar la energía final en energía primaria (EP, en adelante) total requerida, o sea, que la EP total pasa a contabilizar la energía necesaria en el proceso de transformación y distribución energética. Luego, para analizar los sectores productivos, se usa la tabla simétrica IO construida a partir de las tablas de origen y destino, publicadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, sugeridas desde 1969 por Naciones Unidas (DANE, 1968). Este último método es aplicado actualmente en la Unión Europea, Estados Unidos, Canadá, Alemania y, en general, en América Latina.

La utilidad de esta investigación estriba en que permite analizar, desde la perspectiva del consumo de energía primaria, la estructura productiva y las modificaciones que sufre el sistema económico ante cambios en la demanda final. Asimismo, facilita observar, desde la perspectiva energética, la relevancia relativa de los diferentes sectores y/o sus productos, así como el grado de conexión y la intensidad de flujos de intercambio para satisfacer sus necesidades y/o usos de la energía. De igual forma, el trabajo permite diferenciar el consumo propio y consumo total de energía, además de conocer cómo el consumo de un sector impacta el resto de la economía y viceversa. Se logra de este modo focalizar las políticas energéticas y/o ambientales en la demanda de un sector o en el consumo propio del mismo, o en aquellos que promueven cambios tecnológicos o estructurales. Para el logro de estos propósitos, se estiman las elasticidades y se analiza el cambio estructural del consumo de energía en Colombia desagregado a 15 sectores.

El trabajo se organizará como sigue: la sección 1 expone la introducción, la sección 2 presenta un breve marco de referencia conceptual y empírico sobre el modelo IO, la sección 3 describe el origen de los datos y la metodología, la sección 4 muestra la evidencia empírica y la discusión de los resultados, la sección 5 presenta las conclusiones. Por último, se anexan las tablas de los cálculos realizados.

3.2. Marco de referencia

En esta sección se presenta el marco teórico, las hipótesis en que se basa el modelo IO, las ecuaciones básicas, y las extensiones del mismo. Luego se realiza una síntesis de los principales estudios aplicados al consumo de energía en diferentes países y se destaca la aportación del presente estudio con respecto a la literatura de referencia.

3.2.1. Marco Teórico

El análisis IO como marco teórico fue desarrollado por el ruso Wassily Leontief en 1930. El mismo autor señala que: “el modelo IO constituye una adaptación de la teoría neoclásica del equilibrio general al estudio de la interdependencia cuantitativa que existe entre aquellas actividades económicas que guardan entre sí una relación recíproca” (Leontief, 1975, p. 207). Por este trabajo, Leontief recibió el premio Nobel de economía en 1973. La presentación más importante se llevó a cabo cuando publicó su obra *The Structure of the American Economy, 1919-1939*. El modelo IO realiza una transformación del *Tableau Economique* de François Quesnay, creando un marco analítico descriptivo que muestra las relaciones de compra y venta entre los distintos productores y consumidores de una economía. Varios autores señalan que el modelo presenta una visión macro analítica de los pensadores del siglo XVIII, y el rigor matemático de Walras y otros autores destacados de la época (United Nations, 1999a). A continuación se hace una breve síntesis del modelo IO siguiendo la exposición de Miller y Blair (2009).

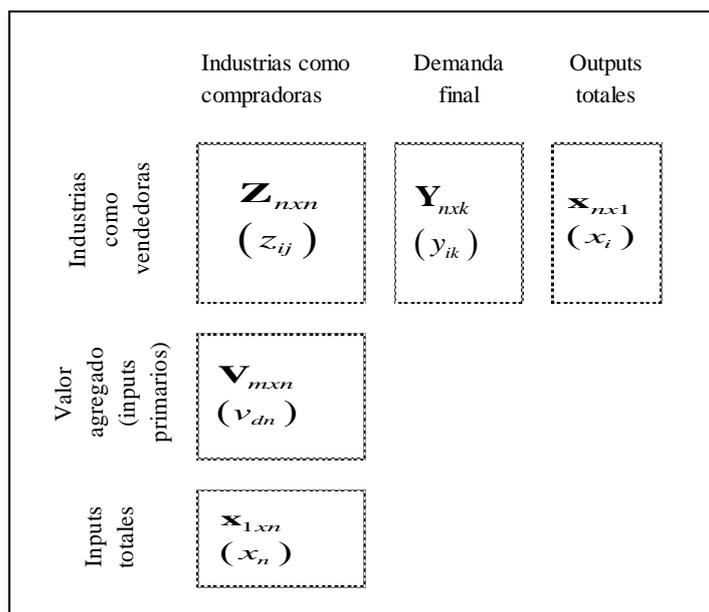
3.2.1.1. Notación utilizada

En el presente capítulo se utiliza la siguiente notación: las matrices se expresan en letras mayúsculas negritas, los vectores se definen como vectores columna y se expresan en minúsculas negritas, la transposición de un vector o matriz como es usual por el símbolo del primo (‘) y la diagonalización, es decir, la expresión de un vector como una matriz diagonal por el símbolo del circunflejo (^), los escalares y los elementos de matrices y vectores se representan en cursiva.

3.2.1.2. Estructura básica del modelo abierto de Leontief

El modelo IO es un conjunto de ecuaciones lineales que tiene como propósito analizar y medir las relaciones que existen entre los sectores de producción y el consumo de la economía de una nación (United Nations, 2000).

Figura 3.1. Marco contable simplificado del modelo Input Output simétrico



Fuente: Adaptación realizada a partir de Miller y Blair (1985, 2009) y United Nations (2009).

El modelo IO se construye a partir de los datos económicos de un país o una región en particular, y describe de forma simplificada en una matriz el origen y el destino de todos los bienes y servicios entre los sectores de la economía. Estos flujos pueden estar expresados en unidades físicas o en unidades monetarias. La estructura del modelo presenta tres matrices en los cuadrantes: matriz \mathbf{Z} de consumo intermedio, matriz \mathbf{Y} de demanda final y matriz \mathbf{V} de insumos primarios. La matriz de consumo intermedio señala los flujos de compras y ventas de bienes y servicios entre las diferentes industrias⁴⁷ que componen el sistema

⁴⁷ Los términos industria, sector o rama de actividad económica se usan indistintamente en el presente estudio y hacen referencia al conjunto de establecimientos dedicados a la misma o similar actividad. En el contexto de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme una industria/sector está constituido por todos los

económico. Las filas indican las ventas (outputs) que cada industria realiza al resto de las industrias y a sí misma. Las columnas detallan las compras (inputs) que cada industria realiza al resto de las industrias y a sí misma. La matriz de demanda final muestra las ventas de las n industrias con las k componentes de la demanda final. La matriz de insumos primarios presenta la compra de factores productivos primarios como, por ejemplo, el trabajo y el capital. Por último, el vector x muestra la producción bruta (output) de la economía por industria (ver figura 3.1).

En el modelo todos los insumos de cada industria se transforman en productos⁴⁸ ofertados por la misma y todo lo que se produce es consumido. Esto es, que toda producción se destina a satisfacer la demanda final o como insumo de otras industrias. Por tanto, los totales por columnas y por filas son iguales. Matricialmente este equilibrio se expresa así:

$$(3.1) \quad \mathbf{Zi} + \mathbf{Vi} = \mathbf{Zi} + \mathbf{Yi} = \mathbf{x}$$

En el modelo IO el cuadrante correspondiente al consumo intermedio es el más importante, pues a partir de esta matriz se determina los coeficientes técnicos que se convierten en los parámetros del modelo. Cada coeficiente técnico representa la cantidad de insumos procedente de la industria i -ésima, Z_{ij} requeridos para producir una unidad del producto total de la industria j -ésima, x_j . Al conjunto de coeficientes técnicos se le denomina matriz tecnológica. Cada coeficiente se obtiene así:

$$(3.2) \quad a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j}$$

Esta expresión, sustituida adecuadamente en el sistema de ecuaciones lineales (3.3), permite obtener el output de cada uno de los sectores. El sistema de ecuaciones de Leontief, donde y es exógena, da lugar al modelo abierto. Dado que $z_{ij} = a_{ij}x_j$ se puede escribir:

establecimientos que pertenecen a una sola clase de la CIIU y, por lo tanto, están dedicados a la misma actividad. La CIIU utilizada es la 3.1 adaptada para Colombia.

⁴⁸ El término “producto” y “bienes y servicios” se usan como sinónimos a lo largo del documento.

considerar que se conserva la relación de precios relativos existente en el año en que se hace la matriz.

3.2.1.3. Extensiones del modelo input-output al medio ambiente

El modelo IO ha sido extendido por numerosos autores e investigadores de diversas instituciones, con el fin de tratar aspectos relacionados con la contaminación y el medio ambiente. Uno de los primeros trabajos que extendió el modelo de Leontief a la problemática ambiental fue desarrollado por Cumberland (1966), quien propuso un modelo IO regional incorporando factores ambientales y subrayó la importancia que tiene analizar la relación entre los procesos de desarrollo regional y las externalidades ambientales. Cabe anotar que Leontief en 1970 proporcionó los elementos metodológicos para avanzar en las aplicaciones en el campo del medio ambiente (Leontief, 1970b). Desarrollándose posteriormente numerosas investigaciones desde esta perspectiva (Miller y Blair, 2009).

3.2.2. Marco empírico

El modelo de IO ha tenido innumerables aplicaciones en distintos países en diversos campos de la economía y el medio ambiente. El mismo Leontief (1970a, 1972) lo aplicó para analizar la contaminación ambiental.

En este estudio, la referencia empírica comprende la síntesis de los estudios más relevantes relacionados con el modelo IO desarrollado para estimar los requerimientos energéticos y tres estudios relacionados con el modelo IO aplicado a los sectores productivos en Colombia. La comparación entre los diversos estudios es difícil de llevar a cabo debido a la diversidad de metodologías, regiones y períodos analizados (ver anexo 3A.1)⁵¹.

En el caso de Colombia, la mayoría de las tablas IO han sido elaboradas por consultores del Departamento de Planeación Nacional, e investigadores para ser utilizadas en las matrices de contabilidad social, modelos de equilibrio general computable y modelos IO dinámicos.

⁵¹ En la mayoría de los estudios sobre el consumo de energía, se parte de la existencia de la tabla IO simétrica, por tanto, no se suele explicar el procedimiento para su obtención. Mientras que los estudios que si lo explican, no desarrollan la aplicación.

Se tiene conocimiento que pertenecen a instituciones como: CEGA⁵², Banco de la república y FEDESARROLLO⁵³. Los trabajos se centran en el sector productivo y sus multiplicadores. Recientemente, el DANE construyó la primera tabla simétrica IO para el año 2005 y 2010.

Bonet Morón (2000) desarrolla el modelo IO para la región Caribe colombiana utilizando dos componentes: el modelo IO lineal y un modelo econométrico no lineal para predecir el comportamiento de los sectores de la economía regional. Estima los multiplicadores y encuentra que el sector terciario es el que tiene mayores vínculos intersectoriales. Duque et al. (2000) realizan un análisis de los multiplicadores de producción a partir de la tabla IO simétrica para Colombia, año base 1994, bajo el supuesto de la tecnología del producto. A nivel de filas se destacan entre los multiplicadores: servicios de intermediación financiera, electricidad y gas. No fue posible realizar un análisis comparado con otros períodos, dado que no se tuvo conocimiento de trabajos similares. Banguero et al. (2005) estiman la tabla IO simétrica para la región del Valle del Cauca, año base de 1994, utilizando un enfoque indirecto y basados en el método de ajuste biproporcional RAS. La principal dificultad fue la consecución de estadísticas. Se destaca por ser el primer estudio realizado para apoyar el análisis económico regional. No se encontró literatura relacionada con la aplicación de modelo IO al sector energético.

En el contexto internacional, existe una amplia variedad de categorías de análisis de multiplicadores, uso de la energía y cambio estructural, que se viene desarrollando desde finales de los setenta. Esto se debe a que, a partir de este período, algunos países desarrollados empezaron a presentar cambios en el uso de la energía en su economía, como causa o efecto, o ambos, pues pasaron de una industria intensiva en manufactura hacia otra dominada por los servicios. Entre los estudios de país de cambio estructural, se destacan, Japón (Han y Lakshmanan, 1994; Kagawa y Inamura, 2001), Dinamarca (Wier, 1998), China (Garbaccio et al., 1999), India (Mukhopadhyay y Chakraborty, 1999), China y Japón (Kagawa y Inamura, 2004), Italia (Rocchi y Serrano Gutiérrez, 2011), grupos de países (Alcántara y Duarte, 2004; Proops, 1988). Otros estudios de descomposición relevantes del campo energético en España son los elaborados por (Alcántara y Roca, 1995; Roca et al., 2007).

⁵² Corporación de Estudios Ganaderos y Agropecuarios.

⁵³ Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo.

En el análisis de los coeficientes IO o de los multiplicadores⁵⁴ del consumo de energía, los sectores se organizan teniendo en cuenta su capacidad para influir sobre los demás. En este sentido, sobresalen por región los siguientes estudios revisados: Escocia (Al-Ali, 1979), Saskatchewan-Canadá (Gould y Kulshreshtha, 1986), Taiwán (Hsu, 1989), India (Tiwari, 2000), Australia (Lenzen, 1998; Lenzen, 2001; Treloar, 1997), Cataluña, España (Pérez Viéitez, 2007) República de Corea (Park y Heo, 2007), Colombia (Patiño, 2008) y Corea (Park y Heo, 2007).

Las razones de los cambios en el uso de la energía son diversas: variaciones en la demanda, mejoras tecnológicas en la eficiencia energética, cambios en la composición de bienes y servicios de la economía (desde industrias intensivas en energía hacia industrias con mayor valor agregado como las nuevas tecnologías) y la interacción de estos factores. Por esta razón, algunos autores, con el fin obtener una mejor explicación del comportamiento entre el uso de la energía y la actividad inter-industrial, utilizando la inversa de Leontief realizan un mayor nivel de desagregación de estos factores. Por ejemplo, Han y Lakshmanan (1994) trabajan con 4 factores de cambio que desglosan en subniveles. Los autores subrayan que el factor que más influyó en la reducción de la intensidad energética fue la estructura de la demanda y no el cambio técnico. Esto se explica porque Japón importa la mayoría de sus requerimientos energéticos y el cambio técnico necesita un período de gestación para dar sus frutos. Proops (1988) detalla 4 factores de cambio en el análisis del consumo de energía, donde se observa que en la mayoría de los países (India, Yugoslavia, Reino Unido, Japón y los países bajos) el cambio en la estructura y la demanda final es el factor más importante en el aumento del consumo de energía. Mukhopadhyay y Chakraborty (1999) identifican 6 factores de cambio y, además, desglosan el cambio técnico y la demanda en subniveles. Los autores concluyen que los factores que más influyen en el consumo de energía en la India son: la estructura de la demanda final, el cambio técnico y la interacción de ambos. Kagawa y Inamura (2001) señalan 4 factores de cambio y encuentran que los requerimientos totales de energía, en Japón, aumentaron principalmente por cambios en la estructura de la

⁵⁴ Un multiplicador representa una expresión cuantitativa que señala el cambio de una variable (usualmente endógena) generado por una variable que se ha modificado (puede ser una fuerza exógena), esto bajo el supuesto de la existencia de interdependencias asociadas al sistema (<http://faculty.washington.edu/krumme/207/inputoutput>. Duque et. al, 2005).

demanda, la estructura de insumos no energéticos y la demanda final no energética. Mientras que los cambios en la composición del producto contribuyeron al ahorro de energía. Park y Heo (2007) indican 4 factores de cambio en el consumo de energía, siendo el cambio estructural y la eficiencia energética los que más contribuyen a la disminución en los requerimientos de energía primaria en Corea.

En la revisión también se destacan algunos trabajos orientados a afinar metodológicamente las estimaciones del cambio técnico y el consumo de energía directo e indirecto (Park, 1982); el tratamiento a los productos secundarios, según la tecnología del producto y la tecnología de la industria (Casler y Wilbur, 1984; Rueda-Cantuche y Raa, 2007); la interdependencia entre la producción sectorial y los multiplicadores, entre otros aspectos (Wu y Chen, 1990); y la aplicación del modelo IO a los balances energéticos (Alcántara y Roca, 1995). Se destaca también la identificación de sectores clave, a partir de metodologías alternativas, como la teoría de redes con indicadores de multinivel y utilizando el modelo IO (García Muñoz et al., 2008) y la aplicación del modelo IO al flujo de materiales, energía y residuos de un distrito industrial (Albino et al., 2003).

El presente análisis se diferencia de la literatura existente en cinco aspectos:

- La mayoría de los análisis de cambio estructural convencional basados en la metodología IO se centran en el modelo de demanda. Sin embargo, en el presente trabajo se sigue el planteamiento de Proops (1988), donde se propone un análisis de cambio estructural, usando dos enfoques, el convencional, desde el punto de vista de la demanda (matriz de Leontief), y el alternativo, desde el punto de vista del uso de la energía. Esto se hace mediante la utilización de matrices de semejanza. El trabajo se diferencia del estudio de Proops (1988) en que se trabaja con EP total productiva⁵⁵ para 15 sectores, mientras que Proops (1988), utiliza energía final para 10 sectores en sus estimaciones.
- Para el análisis de impacto ambiental, usualmente en la literatura se utilizan los multiplicadores. En este caso, se estima la elasticidad demanda de la energía, que mide el estímulo y cuantifica el efecto en términos porcentuales (diferenciando consumo de energía, propio y total). La literatura relacionada con la estimación de elasticidades usando la metodología IO es escasa. La investigación de referencia utilizada para este propósito fue la

⁵⁵ En este capítulo la energía hace referencia a energía primaria total productiva.

de Alcántara y Padilla (2003). Este análisis se diferencia de la publicación mencionada en que se trabaja en términos de EP total y no de energía final.

- La EP total se estima calculando un vector de energía total (aplicación del modelo IO a los balances energéticos), el cual contiene la EP directa e indirecta por sectores y por tipo de energía. Éste vector es el relevante desde una perspectiva ecológica. El procedimiento para la obtención del vector se basa en la publicación de Alcántara y Roca (1995). Este trabajo se diferencia del mismo en que se complementa con las matrices simétricas del sector productivo, lo que permite trabajar con EP total productiva.

- Desde el punto de vista metodológico, el principal aporte realizado en el trabajo radica en combinar y complementar algunas técnicas para mejorar las estimaciones. Esto es, enlazar mediante una tabla de correspondencia los datos la tabla IO del sector productivo y la energía total estimada con el modelo IO, y calcular una tabla IO por los métodos matemáticos sugeridos por Naciones Unidas (1999), con el fin de cubrir un periodo más amplio 1996-2010 con respecto a las tablas simétricas oficiales del DANE.

Por último, se utilizan los resultados de la estimación de elasticidades y del cambio estructural para inferir algunas implicaciones de política y proponer algunas recomendaciones específicas. En otros trabajos de cambio estructural de la energía, el análisis de política no se plantea (Proops, 1988). En este caso, se revisó la normatividad política vigente del sector energético en Colombia desde el año 2000 hasta la fecha (ver anexo 3A.2), y conforme lo existente y los resultados de las estimaciones, se proponen algunos lineamientos de política específicos, pues el análisis de elasticidades permite definir políticas focalizadas hacia la demanda o la estructura productiva, según las características de cada actividad económica.

3.3. Datos y Metodología

3.3.1. Datos

La información estadística necesaria para realizar el análisis del consumo de energía proviene de dos fuentes: i) los balances energéticos de los países que no pertenecen a la

OCDE⁵⁶ elaborados por la IEA (2012), y ii) las tablas de las cuentas nacionales anuales elaboradas por el DANE⁵⁷(2013).

Los **balances energéticos** compilan datos estadísticos básicos de la oferta y la demanda de energía; es decir, del origen y el consumo de todas las fuentes de energía empleadas durante un año de todos los países, entre ellos Colombia. Las estadísticas consideran datos sobre la producción, el intercambio y el consumo de la mayoría de los combustibles energéticos. La metodología de los balances energéticos de la IEA se basa en el contenido calórico de los productos básicos de la energía en una unidad común. La unidad de cuenta común adoptada es la tonelada equivalente de petróleo (Tep) definida como 10⁷ kilocalorías.

En relación con el tipo de energía primaria⁵⁸ seleccionada para cada fuente de energía, la IEA ha adoptado como principio escoger la forma de energía con mayores usos prácticos, la aplicación de este principio conduce a adoptar dos formas de energía primaria: calor en el caso de la energía nuclear, geotérmica y solar térmica, y electricidad en el caso de la energía hidráulica, eólica, solar fotovoltaica, entre otras. Asimismo, se consideran como energías primarias: el carbón, el petróleo y el gas.

En relación con las estadísticas colectadas para cada fuente de energía, la IEA (2012) consideró lo siguiente: El carbón incluye carbón mineral, hulla, turba, lignito y combustibles derivados (coque, gas de coque, BKB, etc.). El petróleo comprende petróleo crudo, gas líquido natural, materias primas refinadas, aditivos y otros hidrocarburos. Productos de petróleo engloba gas, etano, gas licuado, gasolina de aviación, gasolina para motores, queroseno, gasóleo, nafta, lubricantes, betún, ceras de parafina, coque de petróleo y otros productos derivados del petróleo. El gas contiene al gas natural (con exclusión del gas líquido natural). Hidráulica incorpora el contenido energético de la electricidad generada en centrales hidroeléctricas y excluye la producción de plantas de almacenamiento bombeado. Combustibles renovables y residuos abarca la biomasa⁵⁹ sólida, biomasa líquida, el biogás,

⁵⁶<http://new.sourceoecd.org>

⁵⁷ <https://www.dane.gov.co>

⁵⁸ Se entiende por *energía primaria* aquella energía que se obtiene de los recursos o fuentes naturales disponibles en forma directa (tales como, energía hidráulica, eólica y solar) o indirecta (después de realizar un proceso minero, como el petróleo, el gas natural, el carbón mineral, etc.) sin necesidad de emplear un proceso de transformación.

⁵⁹ La biomasa se define como cualquier sustancia de una planta utilizada directamente como combustible o convertido en combustibles (por ejemplo, carbón). Se incluyen en este campo madera, residuos vegetales (incluidos los residuos de madera y los cultivos utilizados para la producción de energía), el etanol, los animales, materiales y desechos y sulfito lejías.

los desechos industriales y los residuos municipales. Electricidad comprende el consumo final y el intercambio de electricidad, se contabiliza de forma similar al calor (1 GWh = 0.000086 millones de Tep). La agregación para cada fuente de energía se realizó considerando las definiciones por producto presentadas por la IEA (2012).

Por otro lado, el marco de **cuentas nacionales** del DANE comprende las tablas de origen y destino, y las tablas de equilibrio económico general. Éstas describen la composición de la oferta y la demanda de los bienes y servicios disponibles, la producción y el uso realizado por los diferentes agentes económicos. Las cuentas nacionales están valoradas en pesos colombianos⁶⁰, año base 2000, 2005 y 1994.

Con el cambio de año base (del año base 2000 al 2005), el DANE incorporó distintos cambios en la metodología usada para calcular las series, empleando nuevas fuentes de información (Superintendencia de Sociedades y la Contaduría General de la Nación) y reflejando cambios esenciales ocurridos en el conjunto de la economía. Bajo el nuevo marco de las cuentas nacionales del año base 2005, el DANE confecciona las tablas de origen y destino para los años 1996, 2005 y 2010, así como la tabla simétrica IO, nacional y con importaciones para el año 2005 y 2010.

Del mismo modo, es importante señalar que la unidad de medición utilizada por el Ministerio de Minas y Energía (MME), en Colombia, es la teracaloría (Tcal) y en la IEA se usa la Tep. El cambio de uso de las unidades originales de las diferentes fuentes energéticas hacia la Tep, implica la elección de coeficientes de equivalencia entre las diferentes formas y fuentes de energía. La IEA realiza el cambio basándose en la consulta a expertos de las administraciones nacionales, por lo tanto, pueden existir algunas diferencias en los datos sectoriales entre el MME y la IEA; no obstante, las tendencias son las mismas. Una explicación detallada de las unidades de transformación se encuentra en IEA (2014).

Entre las limitaciones de los datos de Colombia en los balances energéticos de la IEA, sobresale la falta de información respecto a la energía final de los siguientes sectores: minas y canteras (división 10-14), pesca (división 02) y silvicultura (división 05) y el dato de uso

⁶⁰ Al 20 de abril del 2015 la tasa de cambio correspondiente a un dólar americano es de \$2,498.80 pesos colombianos y la de un euro es de \$2,698.26 pesos colombianos. Datos tomados de <http://es.exchange-rates.org/currentRates>.

o consumo no energético referido al “uso propio en el sector”⁶¹. La presencia de valor cero en estos sectores hizo necesario integrar las tres divisiones mencionadas en otros sectores, conforme la CIIU 3.1 internacional y la CIIU 3.1 vigente adaptada para Colombia.

Según la CIIU revisión 3.0 en los balances energéticos, el ítem de “uso propio” de la energía usada como no energía comprende: extracción de carbón, lignito y turba (división 10), extracción de petróleo crudo y gas natural (división 11), extracción de minerales uranio y torio (división 12), suministro de electricidad y gas (división 40), fabricación de coque, productos refinados del petróleo y combustible nuclear (división 23).⁶² En este caso, la agrupación sectorial integrada, se trabajó con el valor cero.

3.3.2. Metodología

La estrategia empírica seguida en el presente capítulo se basa en la aplicación de las siguientes metodologías:

- i) Metodología para el desarrollo del modelo IO de la energía⁶³. Esto es, transformación de los balances energéticos en un modelo IO (Alcántara y Roca, 1995, 2004; Roca et al., 2007), (ver cálculos para un año en el capítulo 1 anexo 1A.2)
- ii) Metodología para el tratamiento de las tablas de origen y destino para el desarrollo del modelo IO. El procedimiento consiste en realizar el cambio de valoración de precios de adquisición a precios básicos (ver anexo 3A.3), siguiendo el método propuesto por Naciones Unidas (1999a). Se verifica la consistencia de las tablas conforme la teoría
- iii) Metodología para el diseño del modelo IO del sistema productivo para el año 1996, bajo el supuesto de la tecnología de la industria, siguiendo la metodología de Naciones Unidas (United Nations, 1999a, 1999b, 2003). Se verifica la consistencia de la estimación de acuerdo a la teoría (ver anexo, tablas3A.4).

⁶¹ Uso no energético se refiere aquellos combustibles que se utilizan como materias primas en el sector y no son consumidos como combustible, ni transformados en otro combustible.

⁶² Según la CIIU 4.0 las divisiones que corresponden al uso propio son: extracción de carbón de piedra y lignito (05), extracción de petróleo crudo y gas natural (06), extracción de turba (0892), extracción de minerales de uranio y torio (0721), extracción de petróleo y gas natural (091), fabricación de coque y productos de la refinación de petróleo (19) suministro de electricidad, gas, vapor, y aire acondicionado (35). La IEA no utiliza la CIIU 3.1.

⁶³ La descripción metodológica del procedimiento se presenta detallada en el capítulo 1 de la tesis.

- iv) Construcción de la tabla correspondencia sectorial para articular los procesos (i) y (iii) mediante una homogenización entre nomenclatura internacional de los balances energéticos (IEA, 2014) y la nomenclatura adaptada a Colombia elaborada por el DANE (2009) según la revisión 3.1 de Naciones Unidas (ver en capítulo 1 anexo 1A.5).
- v) Metodología para la estimación de las elasticidades para el año 1996, 2005 y 2010, siguiendo la metodología de Alcántara y Padilla (2003).
- vi) Metodología para la estimación del cambio estructural del consumo de energía industrial aplicando un método escasamente explotado propuesto por Proops (1988). Se verifican las ecuaciones propuestas por el autor (ver anexo 3A.5 – 3A.7).

A continuación, se presentan las metodologías referidas a los puntos (iv), (v) y (vi). Esto considerando que el numeral (i) se encuentra explicado en el capítulo 1 de la tesis. Y los puntos (ii) y (iii), hacen referencia a cuestiones técnicas más utilizadas en el análisis IO.

3.3.2.1. Metodología para construir la tabla de correspondencia sectorial y calcular las elasticidades de la energía

Para la estimación de las elasticidades de la energía se debe unir los resultados de las tablas simétricas IO de la energía y el de los sectores productivos mediante una tabla de correspondencia. Esto significa que hay que enlazar la clasificación de las actividades económicas de los balances energéticos y las del sistema de cuentas nacionales de Colombia con la ayuda de la tabla de correspondencia.

La tabla de correspondencia establece la coordinación entre la estructura de la matriz simétrica de Colombia y las estructuras de los balances energéticos (United Nations et al., 1993, 2009). Esta se expone mediante una tabla con 15 clasificaciones a dos dígitos, y se elabora con base en la clasificación que se toma de la CIIU 3.1 de Naciones Unidas, seguida de las categorías usadas en los balances energéticos (CIIU 3.0 y 4.0), las clasificaciones de la CIIU 3.0 AC y 3.1 AC y las de la matriz simétrica. Se presenta un anexo reducido con la información esencial de los Balances energéticos y la CIIU 3.1 AC (ver anexo 1A.5).

La tabla de correspondencia permitió confeccionar la tabla simétrica IO a 15 sectores y posteriormente construir una matriz ampliada (utilizando la inversa de Leontief) que recoge los costos de producción de las ramas de actividad económica y la EP total consumida por estas actividades.

Ahora bien, la estimación que se puede desarrollar a partir de esta matriz construida se basa en calcular la energía consumida por las actividades económicas para generar una unidad de demanda final. La importancia de la estimación estriba en las diferentes capacidades de demandar energía por una y otra actividad económica, puesto que una industria puede consumir energía directamente, por la energía utilizada en la misma, o de forma indirecta, por los insumos intermedios empleados, para cuya producción se requiere energía. En este sentido, es importante anotar que la demanda de energía de una industria puede modificarse a lo largo del tiempo cambiando la estructura de insumos intermedios utilizados por ella, sin que se modifique el empleo directo de energía de la misma.

Se revisaron varios estudios donde realizan una aplicación de imputación a la demanda final utilizando en su proceso metodológico: la energía y la inversa de Leontief. En este sentido, destacan varios autores (Casler y Wilbur, 1984; Hoekstra, 2005; Machado et al., 2001; Tiwari, 2000). Alcántara (1995) y Zhang (2010) utilizan también la inversa de Ghosh.

Siguiendo el planteamiento de Alcántara (1995), para calcular los requerimientos totales, estimamos los coeficientes directos de EP total mediante la siguiente expresión:

$$(3.6) \quad \mathbf{c}' = \mathbf{e}'(\hat{\mathbf{x}})^{-1} \text{ entonces } E = \mathbf{c}'\mathbf{x}$$

Donde \mathbf{x} es la producción de la tabla IO simétrica, \mathbf{e}' es el vector fila de EP total obtenido de forma total, directa e indirecta por el método de Alcántara y Roca (1995), y cada coeficiente de EP total se define como $c_j = \frac{e_j}{x_j}$, siendo e_j la EP total, directa e indirecta,

empleada en la industria j y x_j la producción efectiva a precios básicos de la industria j

⁶⁴. Este coeficiente señala la cantidad de Tep empleadas por unidad de producto.

Para analizar en qué medida el aumento de la demanda final de cada industria aumenta el consumo de EP total (directa e indirectamente) en el sistema económico, se define E como

⁶⁴ Tanto las toneladas equivalentes de petróleo como la producción están en millones.

un escalar que indica la EP total utilizada por la economía y \mathbf{C} como un vector de intensidad de energía. Considerando el modelo de Leontief, se tiene la siguiente expresión:

$$(3.7) \quad E = \hat{\mathbf{c}}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y}$$

Siguiendo el trabajo de Alcántara y Padilla (2003), se diferencia la expresión anterior y se expresa el incremento de la demanda final como un porcentaje de la demanda final α , con lo que se obtiene:

$$(3.8) \quad \Delta E = \mathbf{c}' \Delta \mathbf{x} = \mathbf{c}' (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y} \alpha$$

Ahora, se define un vector de participación de la demanda final sectorial según la producción respectiva.

$$(3.9) \quad \mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}^{-1} \mathbf{y} \quad \text{entonces} \quad \mathbf{y} = \hat{\mathbf{x}} \mathbf{d}$$

Sustituyendo (3.9) en la ecuación (3.8):

$$(3.10) \quad \Delta E = \mathbf{c}' (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{d} \alpha$$

Dividiendo por E se obtiene:

$$(3.11) \quad E^{-1} \Delta E = E^{-1} \mathbf{c}' (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{d} \alpha$$

La ecuación muestra el incremento de la EP total en función de la variación de la demanda final, esto es, la elasticidad de E respecto a la demanda final. Luego, se desagrega sectorialmente la elasticidad, para ello se efectúan algunas transformaciones de la expresión.

Sea $\mathbf{f}' = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_i, \dots, \mathbf{f}_n)$ un vector de distribución de la energía entre los sectores productivos, de modo que $\sum_i \mathbf{f}_i = \mathbf{1}$. El vector de coeficientes de consumo de energía sectorial, esto es \mathbf{c}' puede expresarse así:

$$(3.12) \quad \mathbf{c}' = E \mathbf{f}' \hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad \text{entonces} \quad E^{-1} \mathbf{c}' = \mathbf{f}' \hat{\mathbf{x}}^{-1}$$

Sustituyendo (3.12) en (3.11):

$$(3.13) \quad E^{-1} \Delta E = \mathbf{f}' \hat{\mathbf{x}}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{d} \alpha$$

Teniendo en cuenta, como es bien sabido, que la matriz de Ghosh se obtiene a partir de la inversa de Leontief, sin más que aplicar la siguiente transformación de semejanza:

$$(3.14) \quad \hat{\mathbf{x}}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}$$

Sustituyendo (3.14) en (3.13) se obtiene:

$$(3.15) \quad E = \mathbf{f}' (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \hat{\mathbf{d}} \alpha$$

La ecuación indica la variación proporcional del consumo de EP total respecto al cambio proporcional de la demanda final. Con el fin de obtener información más desagregada, se diagonaliza el vector f' y se prescinde momentáneamente de α (suponiendo $\alpha = 1$), y se llega a la siguiente expresión:

$$(3.16) \quad \mathbf{E}^y = \hat{\mathbf{f}} (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \hat{\mathbf{d}}$$

Los elementos de la matriz \mathbf{E}^y indican el aumento porcentual de EP total en el sector i ante un cambio del 1% de la demanda final del sector j , y se interpreta como una elasticidad. En este caso, la suma de la columna del sector j señala el cambio porcentual del consumo de EP total provocado en todo el sistema económico, por un cambio del 1% del sector j . Este dato señala el nivel de relevancia del sector y muestra de dónde viene el consumo de energía primaria desde la perspectiva de la demanda. Es decir, muestra los encadenamientos hacia atrás (*backward linkages*), equivalente a la interpretación de Rasmussen (1956) y Hirschman (1958). La suma por filas muestra la distribución sectorial del consumo de EP total, y expresa el impacto que sufriría el sector i ante un incremento del 1% de la demanda final de todo el sistema económico. Este dato muestra a dónde va el consumo de energía primaria. O sea, los encadenamientos hacia adelante (*forward linkages*).

Para clasificar los datos se establece un valor medio del impacto total y del impacto distributivo y se discriminan los diferentes sectores productivos atendiendo este criterio.

	$\sum_i E_{ij}^y \rangle E_u$	$\sum_i E_{ij}^y \langle E_u$
$\sum_j E_{ij}^y \rangle E_d$	Sectores con un impacto superior a la media del sistema, impulsan y arrastran en consumo de EP total	Sectores con un impacto superior a la media desde el punto de vista de la demanda de otros sectores (son inducidos por otros sectores a consumir energía)
$\sum_j E_{ij}^y \langle E_d$	Sectores con un impacto superior a la media desde el punto de vista de la demanda final (impulsan el consumo de energía en otros sectores)	Sectores poco relevantes

3.3.2.2. Metodología para estimar el cambio estructural del consumo de energía industrial

Para la estimación del cambio estructural se utiliza un indicador absoluto de descomposición aditiva, siguiendo la metodología propuesta por Proops (1984; 1988). La metodología permite realizar dos tipos de descomposición estructural. La primera y más utilizada, mediante el enfoque convencional, y la segunda novedosa y sin antecedentes en la literatura, en términos del uso de la energía.

La metodología presenta dos ventajas con respecto a otros procedimientos utilizados. La primera, consiste en que al medir la intensidad de energía, definida como el ratio entre energía y producto, los bienes se miden en unidades físicas, evitando con ello las fluctuaciones propias de las finanzas y logrando estimaciones más estables y consistentes que las obtenidas en estudios donde se utilizan valores monetarios. La segunda, se refiere a la forma de estimar el ratio entre energía y producto, y el coeficiente de energía $\frac{dE/E}{dY/Y}$, con un enfoque microeconómico e identificando las razones del comportamiento de estas relaciones a lo largo del tiempo, pues en la literatura éstas se abordan desde un enfoque macroeconómico y sin dar muchas explicaciones sobre las razones de la evolución a lo largo del tiempo.

Proops (1988) expresa el volumen de la energía productiva total usada en la economía E mediante tres tipos diferentes de intensidad de energía.

$$(3.17) \quad E_{ind} = \mathbf{c}'\mathbf{x} \qquad (3.18) \quad E_{ind} = \mathbf{c}^{*'}\mathbf{y}$$

$$(3.19) \quad E_{ind} = \mathbf{c}^e\mathbf{e}^y \qquad (3.20) \quad \mathbf{c}^{*'} = \mathbf{c}'(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$$

\mathbf{c} es el vector de requerimientos de energía productiva directa para producir una unidad de valor de bienes de cada sector, \mathbf{c}^* es el vector de requerimientos de energía directa e indirecta para producir una unidad de valor de bienes de cada sector. En la ecuación (3.17), se imputa el uso de energía productiva a la producción total de la economía \mathbf{x} . En la ecuación (3.18), se imputa el uso de energía productiva a la producción final \mathbf{y} . En la ecuación (3.19), $\mathbf{c}^e = \mathbf{c}^*/\mathbf{c}$ es un nuevo tipo de intensidad de energía menos propenso a las fluctuaciones monetarias, y más estable y consistente; y \mathbf{e}^y es la energía directa utilizada en la producción de los distintos bienes que componen la demanda final.

La ecuación (3.21) puede ser reescrita sustituyendo (3.20) en (3.18) de donde se obtiene:

$$(3.21) \quad E_{ind} = \mathbf{c}'(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{y}$$

La ecuación (3.21) muestra el enfoque convencional, y señala que los cambios en el uso de energía productiva total E dependen de tres factores. Primero, \mathbf{c} representa el vector de intensidad⁶⁵ de energía directa con respecto al output total, reflejando la tecnología dentro de cada sector, en términos de la eficiencia. Segundo, $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ muestra la matriz de interrelación entre los sectores de la economía, reflejando cambios generados por sustitución de insumos o mejoras en la productividad. Y, por último, \mathbf{y} indica la estructura y el nivel de demanda final de bienes y servicios, desde los diferentes sectores. A lo largo del tiempo, estos tres factores pueden cambiar de forma independiente causando un cambio total en E_{ind} . De modo que, un cambio en el tiempo de \mathbf{c} se expresa por $\Delta\mathbf{c}$, reflejando cambios en la intensidad del uso de la energía, un cambio en $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, se expresa por $\Lambda(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, reflejando

⁶⁵ Una intensidad energética elevada, indica altos costos en la “conversión” de energía en riqueza, o sea, se consume demasiada energía para conseguir un PIB bajo.

cambios en la estructura de la producción sectorial debido a cambios en la estructura de insumos intermedios, y un cambio en y se expresa por Δy , reflejando cambios en la estructura de la demanda final. Los dos primeros sumandos a la derecha de la igualdad reflejan el cambio tecnológico experimentado durante el período analizado.

Por lo tanto, en el presente análisis, el cambio total ΔE_{ind} , puede formularse en términos de la siguiente expresión:

$$(3.22) \quad \Delta E_{ind} = \underbrace{\Delta c' (I - A)^{-1} y}_{\text{Efecto tecnológico}} + \underbrace{c' \Delta (I - A)^{-1} y}_{\text{Efecto sectorial}} + \underbrace{c' (I - A)^{-1} \Delta y}_{\text{Efecto demanda}} + \frac{1}{4} \underbrace{\Delta c' \Delta (I - A)^{-1} \Delta y}_{\text{Efecto mixto}}$$

En el enfoque alternativo propuesto por Proops (1988) se parte de que la energía usada por cada sector del sistema y la tecnología del mismo son conocidas. Partiendo de la identidad contable del modelo de Leontief, el sistema se puede reconvertir en un nuevo modelo medido en unidades energéticas:

Esto también se observa en la ecuación 3.25.

$$(3.23) \quad \hat{c}x = \hat{c}A\hat{c}^{-1}\hat{c}x + \hat{c}y$$

Pero sabemos que $\hat{c}x = e$, el vector de energía sectorial consumida en el sistema y $\hat{c}y = e^y$, el vector de consumos de energía directamente necesarios para la obtención de las distintas demandas sectoriales. Hagamos ahora $\hat{c}A\hat{c}^{-1} = Q$. Y podemos escribir:

$$(3.24) \quad e = Qe + e^y$$

No es difícil demostrar que el elemento característico q_{ij} de la matriz Q expresa el consumo de energía incorporada en los inputs procedentes del sector i por unidad de consumo energético del sector j . En cierto modo, la energía procedente de i usada por unidad de energía utilizada en j . En efecto, el elemento característico de Q viene dado por la siguiente expresión:

$$(3.25) \quad q_{ij} = \frac{c_i a_{ij}}{c_j} = \frac{e_i a_{ij} x_j}{x_i e_j} = \frac{e_{ij}}{e_j}$$

Y podemos escribir:

$$(3.26) \quad e_i = \sum_j^n q_{ij} e_j + e_j^y$$

Expresión que muestra la descomposición de la energía consumida por el sector i , e_i , en una parte que es usada para proveer insumos a los n sectores de la economía $\sum_j^n q_{ij} e_j = \sum_j^n e_{ij}$ y la energía usada en proveer bienes para la demanda final e_j^y .

Resolviendo para \mathbf{e} en (3.28) se obtiene:

$$(3.27) \quad \mathbf{e} = \mathbf{i}'(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{e}^y$$

En la que \mathbf{I} es la matriz identidad.

Podemos operar ahora una descomposición similar a la que obtuvimos con anterioridad, solo que en este caso la descomposición es medida en términos de energía.

Suponiendo un momento inicial de consumo de energía en la economía mediante la expresión:

$$(3.28) \quad E_0 = \mathbf{i}'(\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1} \mathbf{e}_0^y$$

Y un momento final de consumo de energía en la economía, dado por

$$(3.29) \quad E_1 = \mathbf{i}'(\mathbf{I} - \mathbf{Q})_1^{-1} \mathbf{e}_1^y$$

Definimos las siguientes variaciones:

$$(3.30) \quad \Delta E = E_1 - E_0$$

$$(3.31) \quad \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})_1^{-1} - (\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1}$$

$$(3.32) \quad \Delta \mathbf{e}^y = \mathbf{e}_1^y - \mathbf{e}_0^y$$

Y podemos escribir⁶⁶:

⁶⁶ No seguiremos aquí la larga exposición de Proops (1988) en el apéndice IV de su artículo. Se llega al mismo resultado de forma más directa.

$$(3.33) \quad E_1 = \mathbf{i}' \left[(\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1} + \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right] (\mathbf{e}_0^y + \Delta \mathbf{e}^y)$$

Desarrollando la expresión anterior y operando, se tiene:

$$(3.34) \quad \Delta E = \mathbf{i}' \left[\Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{e}_0^y + (\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1} \Delta \mathbf{e}^y + \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \Delta \mathbf{e}^y \right] = \\ \mathbf{i}' \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \left[\left(\mathbf{e}_0^y + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{e}^y \right) \right] + \mathbf{i}' \left[(\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1} + \frac{1}{2} \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right] \Delta \mathbf{e}^y$$

Haciendo ahora,

$$(3.35) \quad \mathbf{e}^y = \mathbf{e}_0^y + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{e}^y \quad \text{y} \quad (3.36) \quad (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})_0^{-1} + \frac{1}{2} \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}$$

Llegamos a la descomposición analítica de Proops:

$$(3.37) \quad \Delta E = \mathbf{i}' \underbrace{\Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{e}^y}_{\text{Efecto estructura y tecnología energética}} + \mathbf{i}' \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \Delta \mathbf{e}^y}_{\text{Efecto demanda y tecnología energética}}$$

En la ecuación (3.37), la expresión $\Delta(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}$ refleja los cambios en la estructura productiva sectorial, así como el impacto de los cambios tecnológicos en el uso de la energía, bien considerados desde el punto de vista interno del sector: sustitución de fuentes energéticas utilizadas, mejoras en el aparataje de producción, etc., o bien desde el punto de vista externo: mejoras en la producción y distribución de la energía, pongamos por caso. Nótese que el primer sumando de la expresión (3.37) sintetiza y combina muchos aspectos de la anterior descomposición de la expresión (3.22). Combina aspectos estructurales de la producción sectorial y los aspectos tecnológicos en relación con el consumo energético. No resulta fácil una nomenclatura para este efecto. Quizás con no muy alto grado de acierto, hemos denominado a este impacto *Efecto estructura y tecnología energética*.

El otro aspecto a considerar es el relacionado con el consumo energético relacionado directamente con la obtención de la demanda final. La variación dada por $\Delta \mathbf{e}^y$ no es ni más ni menos que esto. Este incremento depende tanto de la variación de la intensidad energética, como síntesis de todos los aspectos referidos al cambio tecnológico desde el punto de la energía, como de los cambios en los patrones de consumo y escala del mismo. Con las salvedades pertinentes, hemos llamado a estas alteraciones *Efecto demanda y tecnología energética*.

A diferencia del modelo de demanda convencional, este modelo alternativo permite observar la otra cara de la moneda del consumo de la energía, pues la estimación muestra los efectos energéticos puros debido a que cada efecto se encuentra expresado en unidades de energía, diferenciando desde este enfoque, la energía destinada al consumo intermedio y al consumo final. Mientras que, en el modelo convencional, al descomponer los efectos, se sigue trabajando los componentes de la descomposición con elementos de base productiva (unidades monetarias) como la demanda final.

Además, en esta nueva derivación la suma de las columnas de la matriz $(I-Q)^{-1}$ da los “multiplicadores de la energía”, que se interpretan de forma similar al vector c^e explicado antes. Estos coeficientes son similares a los multiplicadores obtenidos de la matriz $(I-A)^{-1}$ en el análisis IO tradicional. Demostrando que el vector c^e se puede estimar de dos formas: i) mediante el ratio c^*/c , y ii) usando el modelo IO de forma independiente, libre de las fluctuaciones de la tasa de cambio y del comportamiento del mercado. Siendo fácilmente aplicable para desagregar el uso de la energía, definir tendencias, simular políticas y efectuar proyecciones para lograr una mejor planificación.

3.3.2.3. Comentario metodológico

Una fortaleza del trabajo realizado es la cobertura que se le ha dado al consumo de EP total, pues en este caso comprende la energía proveniente de carbón y productos del carbón, Crudo, NGL y materias primas, energía hidroeléctrica, gas natural, electricidad, combustibles renovables y residuos, productos derivados del petróleo, e importación de electricidad y refinados del petróleo. Además, no se han utilizado variables de datos proxy, pues en todos los casos los datos constituyen estadísticas oficiales, provenientes de instituciones gubernamentales reconocidas internacionalmente para la medición de estas variables. Por otro lado, la tabla IO cumple las siguientes identidades: para cada industria los insumos son iguales a los productos, para el conjunto de industrias la suma de recursos nacionales es igual a los empleos nacionales y, por último, el valor añadido sin importaciones es igual a la demanda final sin importaciones⁶⁷ (ver anexo 3A.4). Asimismo, al multiplicar la inversa por

⁶⁷ Considerando las precisiones estadísticas de definición de conceptos.

la demanda final se obtiene la producción total. La prueba se realizó con 61 sectores y agregada a 15 sectores para los años 1996, 2005 y 2010. Las matrices de multiplicadores de producción del modelo IO de demanda y de oferta cumplen las características que garantizan su consistencia: i) todos los elementos de la matriz son positivos, y ii) los elementos de la diagonal son mayores o iguales que uno. Estas estimaciones se realizan con los datos de las matrices simétricas.

En relación con los balances energéticos, es importante anotar que al multiplicar la inversa de la matriz de necesidades totales de EP por el consumo final de energía, se obtiene la EP total estimada, valor que coincide con el valor de energía primaria presente en los balances energéticos de la IEA. Se presenta un caso, pero el procedimiento se aplica a todos los años (ver anexo 1A.3).

En el análisis de cambio estructural se verifican todas las pruebas de consistencia propuestas por Proops (1988), tanto para el análisis convencional de cambio estructural como para el análisis de usos de la energía desarrollado a partir de la matriz Q (ver anexo 3A.5, anexo 3A.6 y anexo 3A.7). Se cumplen las ecuaciones (3.17) a (3.22) y (3.27) a (3.29). En las pruebas de verificación de la matriz Q para algunos sectores puede haber diferencias decimales debido a la falta de información en los balances energéticos de la IEA en correspondencias con las cuentas nacionales de Colombia.

En general, siempre que se disponga de una buena base de datos, el enfoque IO ofrece la posibilidad de llevar a cabo un análisis de equilibrio general, puesto que tiene en cuenta los requerimientos directos e indirectos asociados a los cambios en las actividades económicas. Sin embargo, siempre hay que tener presente las simplificaciones y limitaciones planteadas por las hipótesis del modelo al momento de interpretar los datos. No obstante, a pesar de estas limitaciones el modelo es virtuoso porque brinda información sumamente útil, presenta un esquema de la interacción intersectorial con una cobertura nacional, y sirve como instrumento para desarrollar modelos económicos que describen la actividad económica y la planificación de la misma. El modelo tiene una alta aplicabilidad, comparado con otros modelos estadístico-matemáticos complejos con una aplicabilidad a la realidad nula. De ahí, su éxito en la aplicación como modelo IO en distintos países y esquema de planificación de las estadísticas de las cuentas nacionales a nivel internacional. En la actualidad, algunos países (Japón, Corea, China, Estados Unidos, Singapur, Costa Rica, Colombia, etc.) hacen

el esfuerzo por integrarse a la matriz IO internacional, con el fin de medir mejor su participación en las cadenas globales de valor.

3.4. Evidencia empírica, análisis y discusión de resultados

Las tablas IO simétricas valorados a precios básicos, describen en forma simplificada, en unidades de producción homogénea, el registro ordenado de las transacciones que tuvieron lugar entre las 61 industrias de la economía colombiana durante el año 1996, 2005 y 2010. Para propósitos del análisis del consumo de energía las tablas se agregan a 15 industrias o sectores conforme los datos sectoriales de los balances energéticos.

Además, mediante algunas transformaciones, se analiza el impacto directo e indirecto que tienen sobre las industrias o sectores los incrementos en la demanda final o en alguna de las industrias. De ahí que, uno de los principales aportes que se puede realizar al contar con tablas simétricas IO, es estimar las elasticidades e identificar los sectores clave de la economía. En este caso, se trata de los sectores más relevantes en el consumo de EP total productiva en Colombia para los años 1996, 2005 y 2010. Su análisis permite identificar aquellas industrias que impactan en gran medida el consumo de EP del sistema económico, es decir, el efecto total sobre el sistema económico, y los de todo el sistema económico sobre los sectores. Por lo tanto, se convierten en la base para el desarrollo y/o el crecimiento del consumo energético primario. Asimismo, es posible conocer los factores que contribuyen al cambio estructural en el consumo de energía durante el período 1996-2005 y 2005-2010. Esto, sin olvidar algunos factores que limitan los resultados, tales como: los supuestos planteados en las hipótesis del modelo, la existencia de tecnologías tradicionales y las transacciones informales no monetarias presentes en el país. Así como la falta de una información más detallada.

3.4.1. Determinación de las elasticidades del consumo de energía primaria total

El análisis de las elasticidades permite organizar los sectores teniendo en cuenta el impacto total (directo e indirecto) de éstos sobre el consumo de EP total, considerando la demanda

final; logrando de este modo estudiar los sectores según el impacto total y el impacto distributivo.

Esta medición es útil para compensar las diferencias en el tamaño de las industrias y profundizar un poco más en los vínculos que existen entre los diferentes sectores económicos y el consumo de energía. Concretamente, se mide el estímulo entre los diferentes sectores y se cuantifica el efecto en términos porcentuales, en lugar de variaciones absolutas en cantidades (Kenneth y Medlock, 2009; Miller y Blair, 2009; Proops, 1988).

En la estimación realizada, la elasticidad mide la sensibilidad al cambio en el consumo de la EP total del sector “i” ante variaciones sectoriales de cualquier componente de la demanda final o del conjunto de los sectores. La matriz de elasticidades del modelo de demanda se obtiene aplicando la ecuación (3.16). Posteriormente, se clasifican las elasticidades con respecto a la media sectorial, según el criterio expuesto en la sección metodológica.

Considerando los aspectos mencionados, en esta sección se analizan varios casos de elasticidades: i) elasticidades calculadas para los años 1996, 2005 y 2010, a partir de la matriz simétrica con importaciones (ver tabla 3.1), ii) elasticidades nacionales para los años 2005 y 2010, estimadas considerando la matriz simétrica nacional (ver tabla 3.1); y iii) análisis detallado de la matriz de elasticidad nacional para los años 2005 y 2010. Se seleccionan estos años porque presentan algunas variaciones en el posicionamiento de los sectores (ver figura 3.2b, 3.2c y 3.2d.).

En general, el conjunto de sectores destacados por su elasticidad para los años 1996, 2005 y 2010, tanto a nivel nacional como considerando las importaciones, son los mismos, solo que ocupan diferentes posicionamientos a lo largo del tiempo, en términos de impacto total y distributivo.

3.4.1.1 Estimación de la elasticidad del consumo de energía considerando importaciones

Al analizar el conjunto de elasticidades sectoriales estimadas para los años 1996, 2005 y 2010, a partir de la matriz simétrica con importaciones, sobresalen como sectores clave

aquellos cuyo impacto total y distributivo (participación en el consumo de la energía) está por encima de la media. Considerando este criterio, en los años 1996 y 2005, figuran como sectores clave: otros sectores (12) transporte terrestre (13) y alimentos y tabaco (3). Para el año 2010 destacan los mismos sectores, excepto alimentos y tabaco (3). Estos sectores impulsan el consumo de energía y son arrastrados por otros sectores para consumir energía. Por esta razón, tienen una elevada participación en el consumo de EP total productiva.

Una situación relativamente parecida se observa en los sectores relevantes por el lado del impacto total generado por su demanda final, pues en los tres años mencionados, aparece construcción (11) y, para el año 2010, surge como relevante alimentos y tabaco (3). Esto significa que el impacto total en el consumo de EP total de estos sectores, ante un cambio del 1% de la demanda final, está por encima de la media. En este sentido, es importante mencionar que durante los 15 años del período de análisis, el sector alimentos y tabaco (3) ha estado en la frontera, entre sectores clave y sectores destacados desde el punto de vista del impacto total (ver figuras 3.2a, 3.2c y 3.2e). Lo que subraya el importante rol que cumple junto con los sectores clave en la economía energética y productiva del país.

En cuanto a los sectores relevantes, desde el punto de vista distributivo, para los años 1996, 2005 y 2010, destacan: agricultura, silvicultura y pesca (1), química y petroquímica (7) y minerales no metálicos (8). Es decir, que el impacto de estos sectores en el consumo de EP total, ante un cambio del 1% de la demanda final de todos los sectores económicos, está por encima de la media. En general, no se observa cambios de cuadrante, pero sí del posicionamiento del sector dentro del cuadrante, debido a cambios en el valor de la elasticidad (ver figuras 3.2a, 3.2c y 3.2e). Estos sectores son inducidos por otros sectores para consumir energía, pues tienen inputs que forman parte de otros procesos productivos.

3.4.1.2 Estimación de la elasticidad del consumo de energía nacional

Las elasticidades estimadas a partir de la matriz simétrica nacional del año 2005 destacan como sectores clave: química y petroquímica (7), otros sectores (12), transporte terrestre (13) y alimentos y tabaco (3). Para el año 2010, sobresalen los mismos sectores, con la diferencia de que alimentos y tabaco (3) deja de ser clave y pasa a relevante desde el punto

de vista del impacto total. El cambio en el valor de la elasticidad es relativamente pequeño (ver tabla 3.1).

Otro sector relevante en el impacto total para los años 2005 y 2010 es el sector construcción (11). Este sector genera un impacto con encadenamiento hacia atrás. Por último, figuran como sectores relevantes por su impacto distributivo para los años 2005 y 2010: agricultura, silvicultura y pesca (1), y minerales no metálicos (8). El impacto en el consumo de energía de estos sectores presenta encadenamiento hacia adelante. Las figuras 3.2b y 3.2d muestran esta clasificación.

Al comparar las elasticidades nacionales del año 2005 con las elasticidades con importaciones el mismo año, se encuentra que el sector relevante por su impacto total es el mismo: construcción (3). No obstante, existen diferencias en cuanto a los sectores clave y los sectores relevantes por su impacto distributivo (ver figuras 3.2b y 3.2c). A nivel nacional, para el año 2005, se destacan como sectores clave, además de los mencionados anteriormente (otros sectores y transporte terrestre), el sector de química y petroquímica (7), que en el grupo de elasticidades con importaciones se destacaba como sector relevante por la oferta, subrayando en este sentido el rol que desempeñan las importaciones en la producción doméstica. Asimismo, entre los sectores relevantes por su impacto distributivo, sobresale el sector minerales no metálicos (8) y agricultura (1). En el año 2010, de modo similar, el principal cambio que se presenta está en el sector de la industria química y petroquímica (7), que pasa de ser relevante por el impacto distributivo (al considerar importaciones), a ser clave a nivel nacional (ver figuras 3.2d y 3.2e). En este último año, la presencia de las importaciones modifica los estímulos en la economía del consumo de energía de este sector, cambiándose la dinámica de este proceso cuando se ofrece un bien que puede emplearse como insumo y como producto. Es decir, que la ausencia de importaciones lleva a que el sector tenga impactos con encadenamiento hacia adelante y hacia atrás (ver tabla 3.1).

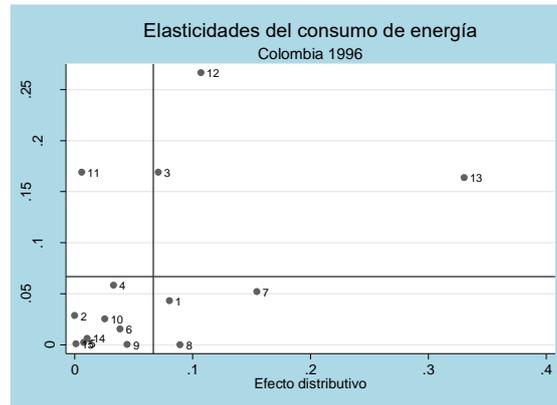
Tabla 3.1. Elasticidades de demanda y oferta considerando la matriz simétrica. con importaciones y la nacional. Colombia 1996, 2005 y 2010

No.	Sector	Impacto total	Impacto	Impacto total	Impacto	Impacto total	Impacto	Impacto total	Impacto	Impacto total	Impacto
		con importaciones	distributivo con importaciones	nacional	distributivo nacional	con importaciones	distributivo con importaciones	nacional	distributivo nacional	con importaciones	distributivo con importaciones
		1996	1996	2005	2005	2005	2005	2010	2010	2010	2010
1	Agricultura	0.043	0.0804	0.0530	0.0711	0.0522	0.0711	0.0512	0.0870	0.0508	0.0870
2	Energía	0.029	0.0000	0.0208	0.0000	0.0316	0.0000	0.0335	0.0000	0.0393	0.0000
3	Alimentos y tabaco	0.169	0.0710	0.1148	0.0682	0.1683	0.0682	0.1346	0.0646	0.1555	0.0646
4	Textiles y cueros	0.058	0.0330	0.0370	0.0305	0.0528	0.0305	0.0388	0.0283	0.0432	0.0283
5	Madera y productos de madera	0.002	0.0076	0.0051	0.0038	0.0023	0.0038	0.0037	0.0037	0.0013	0.0037
6	Papel e impresión	0.015	0.0384	0.0214	0.0396	0.0175	0.0396	0.0118	0.0324	0.0119	0.0324
7	Química y petroquímica	0.052	0.1546	0.1361	0.1714	0.0098	0.1714	0.0982	0.1422	0.0220	0.1422
8	Minerales no metálicos	0.000	0.0895	0.0466	0.1006	0.0069	0.1006	0.0102	0.0838	0.00	0.0838
9	Hierro, acero y metales no ferrosos	0.000	0.0446	0.0372	0.0435	0.0103	0.0435	0.0284	0.0392	0.0117	0.0392
10	Industria no específica	0.025	0.0256	0.0347	0.0225	0.0222	0.0225	0.0385	0.0205	0.0167	0.0205
11	Construcción	0.169	0.0059	0.0860	0.0069	0.1744	0.0069	0.1256	0.0038	0.1666	0.0038
12	Otros sectores	0.266	0.1071	0.1667	0.0905	0.2672	0.0905	0.2183	0.1160	0.2681	0.1160
13	Transporte terrestre	0.164	0.3305	0.2315	0.3394	0.1780	0.3394	0.1987	0.3649	0.2051	0.3649
14	Transporte por agua	0.006	0.0106	0.0067	0.0102	0.0048	0.0102	0.0059	0.0119	0.0059	0.0119
15	Transporte aéreo	0.001	0.0011	0.0024	0.0019	0.0017	0.0019	0.0025	0.0017	0.0026	0.0017
	Media	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667

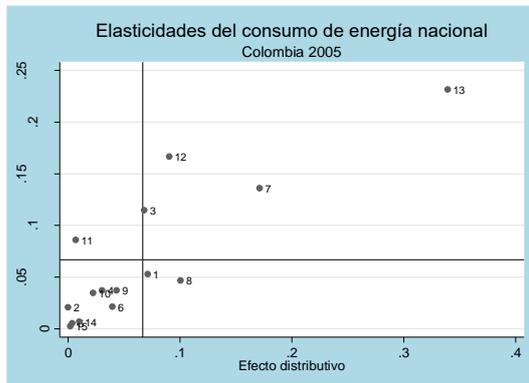
Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.2. Elasticidades del consumo de energía. Colombia, 1996, 2005 y 2010

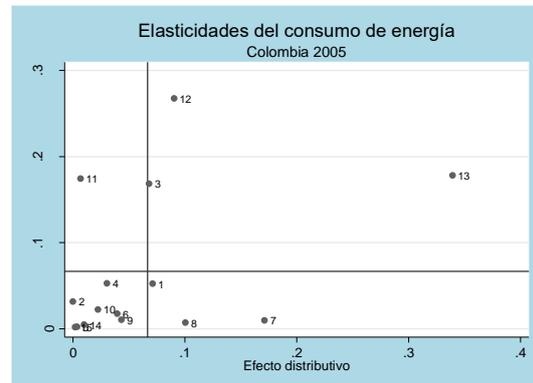
a.



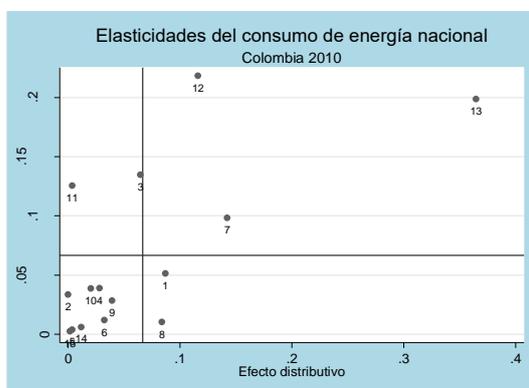
b.



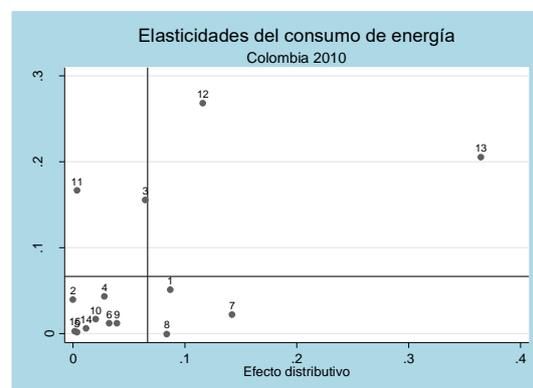
c.



d.



e.



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014)

Nota: Agricultura (1), energía (2), alimentos y tabaco (3), textiles y cueros (4), madera y productos de madera (5), papel e impresión (6), química y petroquímica (7), minerales no metálicos (8), hierro, acero y metales no férricos (9), industria no específica (10), construcción (11), otros sectores (12), transporte terrestre (13), transporte por agua (14), y transporte aéreo (15).

3.4.1.3 Estimación de la matriz de elasticidad del consumo de energía nacional

Las matrices de la elasticidad demanda de los años 2005 y 2010 permiten realizar un análisis independiente de las unidades de medida y más detallado en lo referente al autoconsumo de los sectores más importantes, logrando de este modo visualizar algunas directrices de política específicas.

Se denomina elasticidad demanda al incremento porcentual de EP total soportado en todos los sectores, ante un incremento de un 1% del sector j . El valor de este impacto de la demanda se obtiene de sumar la columna j -ésima del sector j -ésimo (ver tablas 3.2 y 3.3). De acuerdo con la tabla nacional de elasticidades 3.2a y 3.3, un incremento del 1% de la demanda final, por ejemplo, del sector de la industria química y petroquímica, generaría un incremento del consumo de EP total del sector de 1 3.6% y 9.8% en el año 2005 y 2010, respectivamente. Aunque no se tiene como propósito analizar detalladamente las elasticidades con importaciones, vale la pena señalar que la elasticidad del mismo sector, para el año 2005, al considerar las importaciones, *ceteris paribus*, experimenta un incremento del 0.98% del consumo de EP total (ver tabla 3.2b). Esta menor elasticidad del consumo total energético, al considerar las importaciones, podría explicarse por el hecho de que los productos importados contienen energía incorporada y le ahorran este gasto energético al país (ver tabla 3.2b).

Tabla 3.2a. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica nacional. Colombia 2005

No.	Agricultura (1)	Energía (2)	Alimentos y tabaco (3)	Textiles y cueros (4)	Madera y productos de madera (5)	Papel e impresión (6)	Química y petroquímica (7)	Minerales no metálicos (8)	Hierro y metales no ferreos (9)	Industria no específica (10)	Construcción (11)	Otros sectores (12)	Transporte terrestre (13)	Transporte por agua (14)	Transporte aéreo (15)	TOTAL
1	0.04063647	4.53E-05	0.02369713	0.00055	0.00023183	2.6593E-05	0.000167214	1.43247E-05	2.875E-05	0.00010727	0.000583804	0.0049717	5.67695E-05	9.76207E-07	1.15208E-05	0.07113
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00000
3	0.00145958	4.91E-05	0.05952722	0.0004	3.7447E-05	1.3955E-05	0.000285086	1.26325E-05	2.998E-05	8.4104E-05	0.000156567	0.0060362	6.76306E-05	1.09626E-06	1.49894E-05	0.06818
4	0.00011495	7.73E-05	0.00015694	0.02743	0.00015506	2.5574E-05	4.99933E-05	1.32159E-05	3.905E-05	0.00050646	0.000203521	0.0016363	3.97818E-05	1.18442E-06	9.37061E-06	0.03045
5	5.1427E-05	2.22E-05	0.00027621	5.6E-05	0.00177588	0.00013559	8.99588E-05	3.13176E-05	3.93E-05	0.00021076	0.00045401	0.0006656	1.21748E-05	4.82578E-07	4.95605E-06	0.00383
6	0.00016242	0.00029	0.00200682	0.00044	0.00018628	0.01958071	0.000962797	7.53504E-05	0.0001586	0.00049587	0.000488588	0.0145034	0.000181203	3.32122E-06	7.60245E-05	0.03961
7	0.00530625	0.000572	0.00604417	0.00251	0.0007764	0.00045534	0.126458582	0.000546404	0.000606	0.00812765	0.004874137	0.0147116	0.000305789	1.65562E-05	7.76577E-05	0.17138
8	0.00034386	0.000771	0.0021375	9.6E-05	3.5861E-05	1.2227E-05	0.000621091	0.043293735	0.000476	0.00082269	0.048390212	0.0034934	8.60756E-05	3.17664E-06	1.437E-05	0.10060
9	0.0002268	0.000101	0.00090439	0.0001	7.8872E-05	1.4549E-05	0.000189001	7.31803E-05	0.031455	0.00228604	0.006683227	0.0012959	5.91411E-05	4.21182E-06	9.9239E-06	0.04348
10	0.00014752	0.000245	0.00101581	0.0002	0.00018069	3.4085E-05	0.000339745	7.55155E-05	0.0003307	0.01520863	0.001843519	0.0025595	0.000249516	2.62818E-05	4.98497E-05	0.02251
11	7.5077E-06	4.8E-05	1.0489E-05	3.5E-06	8.4974E-07	6.5518E-07	3.50007E-06	1.26426E-06	1.838E-06	3.543E-06	0.006493576	0.0002783	6.61123E-06	1.56118E-07	1.02571E-06	0.00686
12	0.00037487	0.000628	0.00155594	0.00077	0.00017583	0.0001532	0.000655601	0.000151233	0.0003706	0.00073801	0.001703198	0.0821249	0.00091042	1.4182E-05	0.000158208	0.09048
13	0.00408532	0.01679	0.01734418	0.00445	0.00148891	0.00090118	0.006238175	0.002315287	0.0036576	0.00605268	0.014039168	0.032167	0.229270629	3.38388E-05	0.000568521	0.33940
14	3.8298E-05	0.001165	7.7134E-05	2.7E-05	7.9589E-06	4.8612E-06	2.67389E-05	1.12812E-05	1.796E-05	2.8556E-05	6.14674E-05	0.001842	0.000229026	0.006621142	8.17003E-06	0.01017
15	6.6293E-06	6.63E-06	1.9705E-05	8.6E-06	2.0111E-06	1.9102E-06	9.48148E-06	2.19593E-06	3.81E-06	9.1646E-06	1.583E-05	0.0004117	4.73378E-06	8.42512E-08	0.001410568	0.00191
Total	0.05296189	0.02081	0.11477363	0.03704	0.00513389	0.02136043	0.136096965	0.046616936	0.0372153	0.03468145	0.085990824	0.1666977	0.231479501	0.00672669	0.002415155	1
Consumo propio	77%	0%	52%	74%	35%	92%	93%	93%	85%	44%	8%	49%	99%	98%	58%	

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Tabla 3.2b. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica con importaciones. Colombia 2005

No.	Agricultura (1)	Energía (2)	Alimentos y tabaco (3)	Textiles y cueros (4)	Madera y productos de madera (5)	Papel e impresión (6)	Química y petroquímica (7)	Minerales no metálicos (8)	Hierro y metales no ferreos (9)	Industria no específica (10)	Construcción (11)	Otros sectores (12)	Transporte terrestre (13)	Transporte por agua (14)	Transporte aéreo (15)	TOTAL
1	0.026833475	0.000154	0.032056571	0.001207	7.9285E-05	6.952E-05	3.89813E-05	7.96164E-06	2.732E-05	0.00013704	0.001262968	0.00905949	0.000175513	3.7118E-06	1.79689E-05	0.07113
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00000
3	0.001661614	0.000149	0.055044161	0.000764	2.4623E-05	4.179E-05	4.79853E-05	7.23401E-06	2.613E-05	0.000116773	0.000660555	0.00943227	0.000177251	3.599E-06	1.86934E-05	0.06818
4	0.000207199	0.000124	0.000496422	0.025983	5.6294E-05	5.041E-05	9.25286E-06	5.09149E-06	2.39E-05	0.000244901	0.000587912	0.00255334	9.87689E-05	3.0799E-06	1.00871E-05	0.03045
5	8.21487E-05	5.7E-05	0.000525326	0.000122	0.00036854	0.0002018	1.18174E-05	7.76719E-06	1.833E-05	0.000116204	0.000857417	0.0014053	4.56612E-05	1.5078E-06	5.73218E-06	0.00383
6	0.000373226	0.00047	0.003176221	0.000845	6.8736E-05	0.0138083	9.95806E-05	2.24202E-05	7.786E-05	0.000341409	0.001556878	0.01832665	0.000382735	8.4682E-06	5.59852E-05	0.03961
7	0.01481379	0.00361	0.032094942	0.011981	0.0007589	0.0014373	0.008497367	0.000336676	0.0008581	0.009524709	0.02481086	0.05960154	0.002679799	0.00010755	0.000270472	0.17138
8	0.000656163	0.001488	0.003989534	0.000467	3.5701E-05	6.149E-05	0.000111111	0.005767925	0.0002022	0.00062778	0.07702609	0.00973599	0.000382464	1.2439E-05	3.31048E-05	0.10060
9	0.000622664	0.000562	0.003512455	0.000585	7.3402E-05	9.303E-05	6.4212E-05	4.94829E-05	0.0071616	0.00209181	0.020856805	0.00724517	0.000502076	2.1856E-05	4.3473E-05	0.04348
10	0.000357027	0.000606	0.002378577	0.00063	8.2352E-05	0.0001042	5.41873E-05	3.28119E-05	0.000163	0.004504899	0.004745768	0.00786969	0.000861451	4.3303E-05	7.69612E-05	0.02251
11	1.2446E-05	7.33E-05	3.59336E-05	1.25E-05	7.1009E-07	1.881E-06	8.10887E-07	5.76325E-07	1.574E-06	4.49329E-06	0.006207155	0.00049156	1.61611E-05	4.0829E-07	1.3431E-06	0.00686
12	0.000664759	0.00108	0.003372531	0.001548	8.1916E-05	0.0002437	9.06569E-05	4.58911E-05	0.0001779	0.000529253	0.004077989	0.07704732	0.001369613	2.5274E-05	0.000130257	0.09048
13	0.005860306	0.021741	0.031220327	0.008503	0.00061261	0.0013573	0.000743912	0.000560632	0.0015144	0.003935385	0.031407625	0.06040291	0.170959161	0.00010428	0.000476399	0.33940
14	8.1726E-05	0.001484	0.000279132	9.44E-05	6.3224E-06	1.404E-05	6.46047E-06	5.65764E-06	1.472E-05	3.67178E-05	0.000279827	0.00298944	0.000352995	0.00450869	1.18259E-05	0.01017
15	2.23924E-05	2.51E-05	9.05677E-05	3.88E-05	2.0927E-06	6.726E-06	2.73102E-06	1.37325E-06	4.202E-06	1.44491E-05	9.26947E-05	0.00108796	2.10558E-05	4.4411E-07	0.000502402	0.00191
Total	0.052249	0.031624	0.168273	0.052780	0.002251	0.017491	0.009779	0.006852	0.010271	0.022226	0.174431	0.267249	0.178025	0.004845	0.001655	1
Consumo propio	51%	0%	33%	49%	16%	79%	87%	84%	70%	20%	4%	29%	96%	93%	30%	

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Tabla 3.3. Elasticidad demanda de la energía a partir de la matriz simétrica nacional. Colombia 2010

No.	Agricultura (1)	Energía (2)	Alimentos y tabaco (3)	Textiles y cueros (4)	Madera y productos de madera (5)	Papel e impresión (6)	Química y petroquímica (7)	Minerales no metálicos (8)	Hierro y metales no ferreos (9)	Industria no específica (10)	Construcción (11)	Otros sectores (12)	Transporte terrestre (13)	Transporte por agua (14)	Transporte aéreo (15)	TOTAL
1	0.03862317	0.000183	0.0349572	0.00079	0.000171991	3.711E-05	0.000399031	1.001E-05	7.32E-05	0.00027407	0.001286598	0.0100245	0.00016474	2.4184E-06	3.2861E-05	0.08703
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.00171531	0.000144	0.0525466	0.00053	3.86979E-05	1.944E-05	0.000442024	7.4E-06	5.68E-05	0.00017891	0.000456016	0.008346	0.00013574	1.9231E-06	2.8105E-05	0.06464
4	0.00010892	9.73E-05	0.0002108	0.02551	8.05697E-05	1.369E-05	4.49195E-05	3.704E-06	3.89E-05	0.00046315	0.00021941	0.0014275	4.287E-05	1.0819E-06	1.0955E-05	0.02828
5	5.7766E-05	4.59E-05	0.0004134	6.9E-05	0.00094919	0.0001091	0.000106776	8.894E-06	4.24E-05	0.00026761	0.000684331	0.0009657	2.1153E-05	6.3494E-07	7.7684E-06	0.00375
6	0.00021237	0.000492	0.002522	0.00051	0.000131158	0.0100964	0.000894282	2.492E-05	0.000167	0.00066627	0.001000992	0.0153392	0.00027345	4.413E-06	8.0291E-05	0.03241
7	0.00442226	0.002457	0.0081372	0.00289	0.000570008	0.0003967	0.085928363	0.0001676	0.00068	0.00962225	0.007787084	0.0184506	0.00050631	2.134E-05	0.00012778	0.14217
8	0.00034089	0.001528	0.002102	0.00016	3.90504E-05	1.743E-05	0.000763898	0.0090202	0.00031	0.00093378	0.063421574	0.004927	0.00018925	5.1923E-06	3.003E-05	0.08379
9	0.0001965	0.000231	0.0011531	0.00011	4.42805E-05	1.488E-05	0.000195241	2.6E-05	0.021965	0.00210932	0.011369568	0.0017082	7.2789E-05	3.818E-06	1.343E-05	0.03921
10	0.00013996	0.000264	0.0012212	0.00018	0.000124564	2.746E-05	0.000346029	2.018E-05	0.000406	0.01323898	0.002149412	0.0021096	0.0001783	2.0048E-05	4.7698E-05	0.02047
11	5.0246E-06	5.13E-05	1.166E-05	3.6E-06	5.45769E-07	4.451E-07	3.17323E-06	3.494E-07	1.68E-06	3.8975E-06	0.003547335	0.0001803	7.0722E-06	1.4585E-07	1.0253E-06	0.00382
12	0.00064256	0.001574	0.0033843	0.00154	0.000199668	0.000186	0.00115983	7.775E-05	0.000623	0.00148062	0.004528968	0.0987217	0.00158985	2.1601E-05	0.0002896	0.11602
13	0.00468636	0.024842	0.0277232	0.00642	0.00136298	0.0008947	0.007848545	0.0008181	0.004029	0.00919412	0.028827777	0.0521112	0.19517182	6.4721E-05	0.00087026	0.36486
14	6.8943E-05	0.001582	0.0002164	7.2E-05	1.2125E-05	8.695E-06	6.44344E-05	7.347E-06	3.7E-05	8.0368E-05	0.000234061	0.0033718	0.00032403	0.00578341	2.0415E-05	0.01188
15	9.3417E-06	1.47E-05	3.604E-05	1.5E-05	2.2384E-06	1.869E-06	1.44486E-05	1.042E-06	5.85E-06	1.7374E-05	4.30302E-05	0.000584	9.7551E-06	1.4964E-07	0.00091424	0.00167
Total	0.051229	0.033506	0.134635	0.038789	0.003727	0.011824	0.098211	0.010193	0.028438	0.038531	0.125556	0.218267	0.198687	0.005931	0.002474	1
Consumo propio	75%	0%	39%	66%	25%	85%	87%	88%	77%	34%	3%	45%	98%	98%	37%	

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Ahora, para conocer el valor del impacto de una expansión uniforme de la demanda final, se suma la fila i -ésima de la matriz de elasticidad del sector i -ésimo. Continuando con el sector de la industria química y petroquímica, un incremento del 1% de la demanda final del conjunto de sectores provocaría un incremento de EP total del sector del 17% y del 14%, en el año 2005 y 2010, respectivamente. Esto significa que su impacto distributivo o consumo directo, presenta un descenso del 3% durante este quinquenio (ver tabla 3.2a y 3.3).

Como se mencionó anteriormente, los sectores relevantes según la demanda final para el año 2010, son: construcción (11) y alimentos y tabaco (3). Estos se caracterizan porque su consumo de energía está influenciado por la demanda de otros sectores económicos y presentan conjuntamente, un impacto en el consumo total (directo e indirecto) de EP total del 26%, respectivamente; mientras que su impacto distributivo conjunto en el consumo de energía es del 6.8%, respectivamente. Un análisis similar se puede realizar para el resto de los sectores.

Los sectores clave a nivel nacional para el año 2010, desde la perspectiva del efecto total y el efecto distributivo, son: otros sectores (12), transporte terrestre (13) y química y petroquímica (7), presentando conjuntamente un impacto total en el consumo de energía alrededor del 53% en la industria colombiana y un impacto directo del 60%. Al considerar la matriz de elasticidades nacional del año 2005, se destacan los mismos sectores más alimentos y tabaco (3), con un impacto total energético del 64% y un impacto directo del 66%. Como se puede observar, el impacto total de estos sectores es muy significativo, por lo que se hace necesario conocer el impacto del propio sector en el consumo de EP total, información que aparece en los elementos que componen la diagonal principal de la matriz de elasticidades. En la matriz de elasticidad nacional del año 2005 (ver tabla 3.2a), el sector transporte terrestre, ante un incremento del 1% de su demanda final, el impacto en el consumo propio del sector corresponde a 0.229, y el impacto total en la energía es del 0.23; es decir, que el 99% corresponde al efecto del propio sector, una situación similar se presenta para el año 2010. En este contexto, la política de ahorro energético debe orientarse particularmente hacia al sector transporte terrestre más que a la demanda final del sector, por lo que sería deseable conocer ¿qué tipo de transporte y qué modalidad presenta la mayor sensibilidad en el consumo de energía y según las fuentes?

Una situación parecida se presenta en el sector química y petroquímica (7), en la matriz nacional del año 2005 y 2010, donde el efecto propio representa el 93% y el 87% del impacto total del consumo de energía, respectivamente (ver tabla 3.2a y 3.3). Al observar el consumo propio considerando importaciones, el impacto dentro del sector disminuye, por ejemplo, para el año 2005, el consumo propio de este sector se ubica en 87% (ver tabla 3.2b). En este caso, igual que en el caso anterior, una política energética centrada en mejorar la eficiencia energética del sector química y petroquímica, identificando los subsectores más sensibles al consumo de energía, podría arrojar mejores resultados, que influir en la demanda final de todo el sector (ver tabla 3.2b y 3.3).

3.4.2. Análisis del cambio estructural del consumo de energía

El análisis de cambio estructural, ampliamente usado como herramienta para cuantificar fuentes subyacentes de variación, se basa en la idea de que el cambio a lo largo del tiempo de alguna variable se descompone en los cambios de sus respectivos determinantes. Normalmente, se supone que estos determinantes son independientes. El término “estructura” comprende la forma en que una variable se distribuye entre las distintas actividades económicas. El cambio estructural implicaría que las participaciones sectoriales en la respectiva variable se modifican y éste se presenta porque algunos sectores crecen más rápido que otros en esa variable (Antúnez Torres et al., 2011; Dietzenbacher y Hoekstra, 2002; Dietzenbacher y Los, 2000).

El presente análisis permite identificar las fuentes del cambio estructural en el consumo de EP total productiva en Colombia durante el período 1996-2005 y 2005-2010. La estimación se realiza a partir de las tablas simétricas del año 1996, 2005 y el año 2010, con año base 2005, agregadas a 16 sectores utilizando la CIIU revisión 3.1. adaptada para Colombia. La estructura y el nivel, la intensidad, la interacción y la dirección de los cambios, mostrarán aspectos significativos de lo ocurrido en el comportamiento de la energía en el país durante el período de análisis. Las estimaciones de los cambios se obtienen a partir de la aplicación de las ecuaciones (3.22 y 3.37). A continuación, se presentan tres tipos de intensidad de energía que serán utilizados en el análisis de cambio estructural.

En la tabla 3.4 se observa el vector C de requerimientos de EP directa para producir una unidad de bienes de cada sector. El vector C* de requerimientos de EP directa e indirecta

para producir una unidad de valor de bienes de cada sector, y el vector $Ce = \frac{C^*}{C}$ de requerimientos de EP promedio (valor medio), el cual se derivada de C y C*. El vector Ce es principalmente determinado por la estructura interna de la economía, reflejo de la interconexión IO, libre de las fluctuaciones de las tasas de cambio y la inflación, y por lo tanto, más estable, (ver figuras 3.3, 3.4 y 3.5).

La utilidad del vector Ce se puede comprender mejor analizando un sector. Por ejemplo, el sector de alimentos y tabaco en el año 2010, presenta una intensidad directa de $C=2.01$, una intensidad total de $C^*=7.52$ y una intensidad media de $Ce=3.73$. Ce expresa el promedio de energía consumido por cada Tep consumido directamente, en el sector de alimentos y tabaco para la demanda final. Otra interpretación sería que por cada Tep usada directamente por el sector alimentos y tabaco para satisfacer la demanda final, cerca de 2.73 ($3.73-1=2.73$) Tep fueron usados indirectamente.

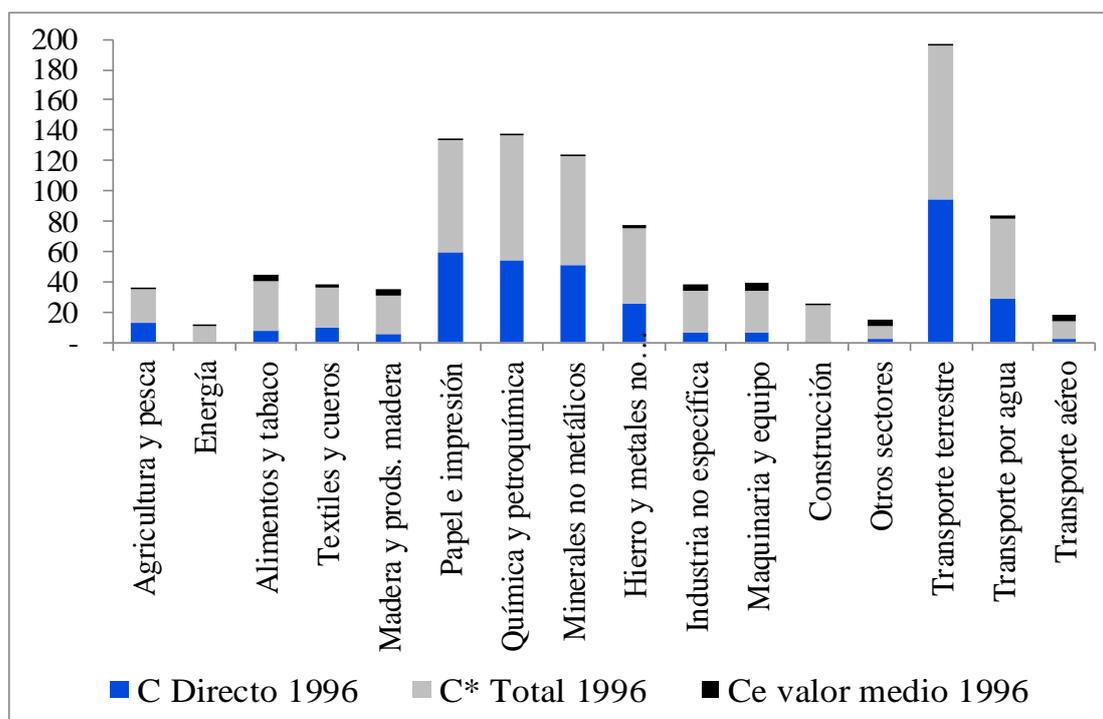
En la tabla 3.4 se observa que la variabilidad Ce es claramente inferior a C y C*, así se refleja en el coeficiente de variación. Además, presenta la media más baja, tanto para el año 1996 como para los años 2005 y 2010. Tal como lo señala el planteamiento metodológico desarrollado por Proops (1988).

Tabla 3.4. Intensidades de energía productiva. Colombia 1996, 2005 y 2010

No.	Sector	C	C*	Ce	C	C*	Ce	C	C*	Ce
		Directo 1996	Total 1996	Promedio 1996	Directo 2005	Total 2005	Promedio 2005	Directo 2010	Total 2010	Promedio 2010
1	Agricultura	12.65	22.28	1.76	4.03	8.55	2.12	4.03	6.77	1.68
2	Energía	0.00	10.55	1.00	0.00	2.35	1.00	0.00	1.60	1.00
3	Alimentos y tabaco	7.71	32.30	4.19	2.83	10.51	3.71	2.01	7.52	3.73
4	Textiles y cueros	9.68	26.23	2.71	3.65	10.48	2.87	3.19	7.72	2.42
5	Madera y productos de madera	5.89	24.80	4.21	1.07	8.33	7.79	0.87	6.01	6.92
6	Papel e impresión	59.44	73.80	1.24	19.51	25.78	1.32	13.70	18.08	1.32
7	Química y petroquímica	54.69	81.95	1.50	19.33	34.49	1.78	12.29	20.88	1.70
8	Minerales no metálicos	51.32	71.59	1.39	21.37	28.98	1.36	13.52	18.26	1.35
9	Hierro, acero y metales no férreos	26.14	49.26	1.88	6.23	13.75	2.21	3.92	8.28	2.11
10	Industria no específica	6.18	28.10	4.54	2.06	12.76	6.19	1.42	8.11	5.70
11	Maquinaria y equipo	6.12	28.40	4.64	1.58	10.05	6.37	1.35	6.90	5.11
12	Construcción	0.74	23.58	1.00	0.32	9.04	1.00	0.10	4.94	1.00
13	Otros sectores	2.22	9.06	4.08	0.66	3.06	4.63	0.58	2.11	3.65
14	Sector transporte terrestre	94.74	100.99	1.07	29.88	31.69	1.06	21.97	23.25	1.06
15	Sector transporte por agua	29.07	53.00	1.82	28.06	35.99	1.28	24.51	32.46	1.32
16	Sector transporte aéreo	2.55	11.15	4.37	1.22	4.19	3.45	0.66	2.72	4.13
Media		23.07	40.44	2.59	8.86	15.63	3.01	6.51	10.97	2.76
Coeficiente de variación		1.14	0.69	0.54	1.15	0.74	0.69	1.18	0.79	0.65

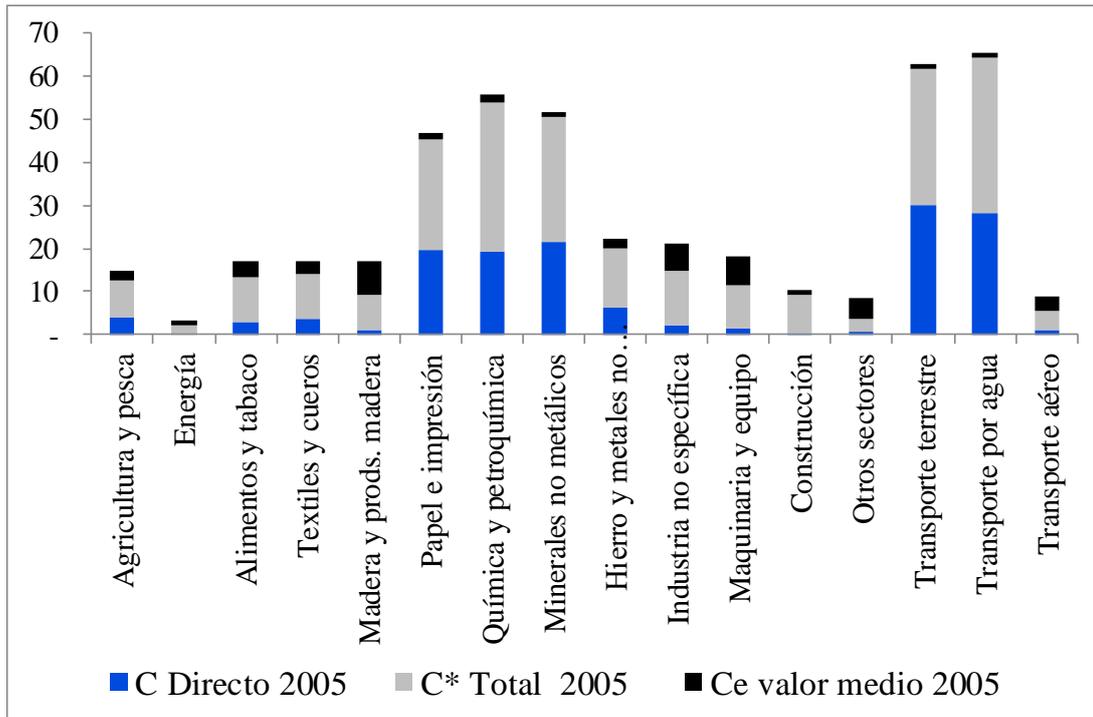
Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.3. Intensidad de la energía total productiva. Colombia 1996



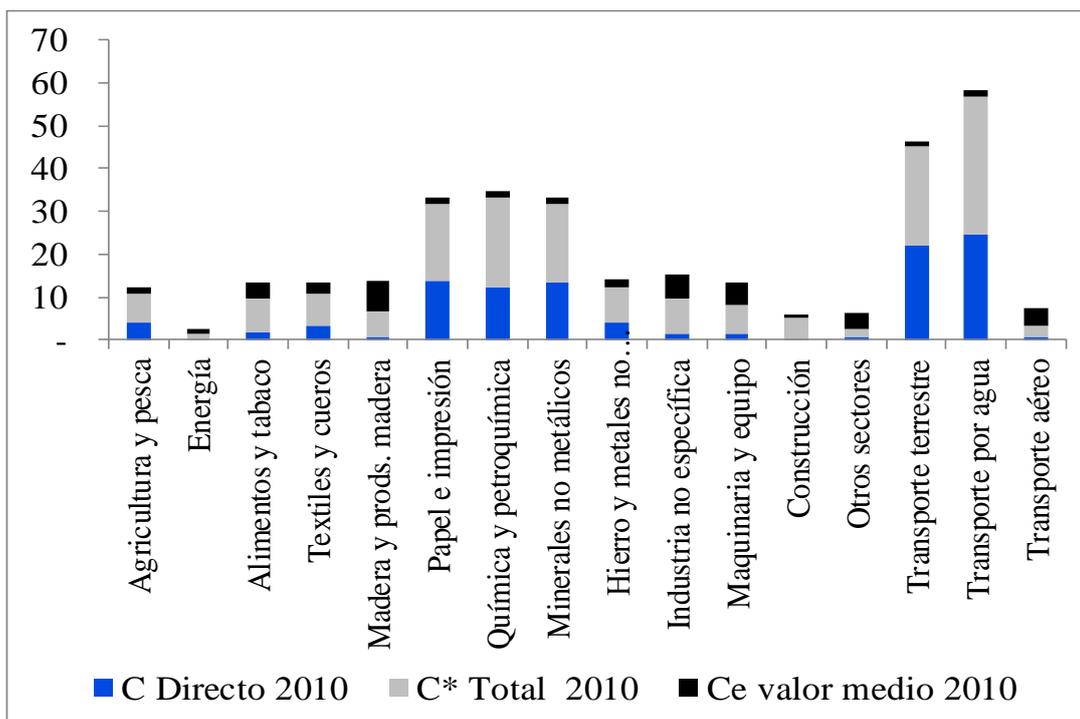
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.4. Intensidad de la energía productiva. Colombia 2005



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.5. Intensidad de la energía productiva. Colombia 2010



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se observan picos de crecimiento en los sectores destacados clave identificados en el análisis de las elasticidades.

Los multiplicadores del uso de la energía representados por el vector C_e muestran un crecimiento de forma gradual a lo largo del tiempo conservando la tendencia en los sectores relevantes.

3.4.3.1. Análisis de cambio estructural convencional

En esta descomposición se realiza el análisis convencional de cambio estructural mediante la aplicación de la ecuación (3.22) y se identifican los factores que contribuyen a los cambios en el consumo de EP total durante el período 1996-2005 y 2005-2010. En las estimaciones realizadas del primer período, se observa que hubo un descenso en el consumo de energía de 0.6 millones de toneladas equivalentes de petróleo. Sin embargo, en el último quinquenio el consumo de energía aumentó en 1.5 millones de toneladas equivalente de petróleo. Es decir, que en cinco años, casi se triplicó el descenso logrado durante la década anterior. Las tablas 3.5 y 3.6 muestran los resultados de aplicar la metodología propuesta por Proops, en éstas se desglosa los efectos, a nivel global y sectorial de ambos períodos.

En general, al examinar el período 1996-2005, los resultados obtenidos concuerdan con la literatura; especialmente al considerar que el efecto del cambio en la estructura y nivel de la demanda final es el que más ha contribuido al crecimiento del consumo de EP total productiva (25.30 Tep) para la mayoría de los sectores, desplazando a un papel menor el efecto sectorial (2.02 Tep). Es decir, que los cambios en la interrelación entre los sectores de la economía presentan un impacto leve con respecto a otros efectos.

Asimismo, se destaca el efecto del cambio tecnológico (-27.49 Tep) como el factor que más influye en el descenso del consumo de energía, resultado de una mejora en la eficiencia energética en todos los sectores productivos. O sea, que hay cambios relevantes en el consumo de energía por unidad de producto (ver tabla 3.5). El otro factor que contribuye al

descenso, en un plano totalmente secundario, es la interacción entre los distintos efectos con (-0.41 Tep).

El efecto tecnológico ha tenido un aporte favorable en la disminución del consumo de EP en todos los sectores, siendo los más destacados: construcción (12), madera y productos de madera (5), industria no específica (10), alimentos y tabaco (3), otros sectores (13), y transporte terrestre (14). Los sectores de menor cambio técnico son: transporte por agua (15) y maquinaria y equipo (11). Es probable que el poco cambio técnico en términos del consumo de EP del sector transporte por agua (15), explique el alto consumo propio energético del sector (98%), observado en la matriz nacional de elasticidades (Ver tabla 3.3).

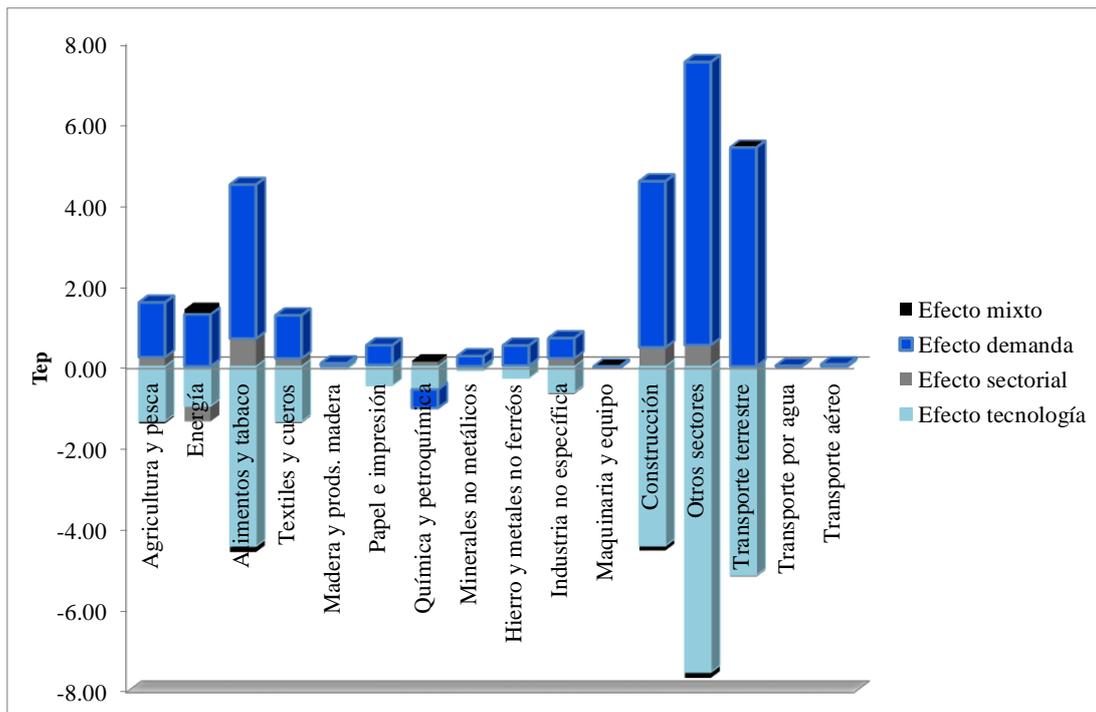
La contribución del efecto demanda al aumento en el consumo de energía es positiva para 14 sectores, entre los que sobresalen: construcción (12), otros sectores (13), transporte terrestre (14), alimentos y tabaco (3), etc. Los sectores donde la variación es negativa son: maquinaria y equipo (11), y química y petroquímica (7) (ver figura 3.6).

Tabla 3.5. Análisis convencional del cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia 1996-2005

No.	Sectores	Efecto Tecnología	%	Efecto Sectorial	%	Efecto Demanda	%	Efecto Mixto	%	Total
1	Agricultura	-1.36	-837	0.23	140	1.35	831	-0.06	-34	0.16
2	Energía	-0.98	-2379	-0.38	-922	1.28	3104	0.12	298	0.04
3	Alimentos y tabaco	-4.44	-4196	0.69	647	3.80	3586	-0.15	-137	-0.11
4	Textiles y cueros	-1.36	-953	0.19	135	1.06	743	-0.04	-25	-0.14
5	Madera y productos de madera	-0.07	-7518	0.01	1008	0.06	6656	-0.002	-246	-0.001
6	Papel e impresión	-0.47	-1419	0.03	104	0.48	1443	-0.01	-28	0.03
7	Química y petroquímica	-0.57	-63	0.11	12	-0.46	-51	0.02	2	-0.898
8	Minerales no metálicos	-0.11	-74	0.00	2	0.25	173	-0.001	-1	0.14
9	Hierro y acero	-0.29	-141	0.02	9	0.49	237	-0.01	-6	0.21
10	Industria no específica	-0.64	-4427	0.20	1359	0.50	3420	-0.04	-251	0.01
11	Maquinaria y equipo	0.00	-2	0.00	0	-0.04	-104	0.00	6	-0.04
12	Construcción	-4.43	-27908	0.47	2945	4.10	25802	-0.12	-739	0.02
13	Otros sectores	-7.55	-4059	0.52	281	6.99	3754	-0.14	-77	-0.186
14	Transporte terrestre	-5.16	-2534	-0.04	-21	5.40	2653	0.00	1	0.20
15	Transporte por agua	-0.02	-47	-0.03	-86	0.01	33	0.00	0	-0.034
16	Transporte aéreo	-0.04	-297	0.00	19	0.05	384	0.00	-6	0.012
	Todos los sectores	-27.49	-4782	2.02	351	25.31	4402	-0.41	-71	-0.6

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.6. Análisis del cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia, 1996-2005



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Al analizar el período 2005-2010, se observa nuevamente que el efecto del cambio estructural y el nivel de la demanda final son los que más han aumentado el consumo de EP total (10.08 Tep) para la mayoría de los sectores, desplazando a un papel radicalmente menor al efecto mixto, que sólo explica el 5% del descenso, producto de la interacción entre los distintos efectos (0.08 Tep).

Asimismo, se destaca el efecto del cambio tecnológico (6.85 Tep) como el factor que más influye en la disminución del consumo de EP total, resultado del cambio técnico dentro de cada sector causado por mejoras en la intensidad energética. Esto es válido para todos los sectores. El segundo factor que contribuye al descenso en el consumo de EP total es el efecto sectorial (1.78 Tep). O sea, la interrelación entre los diferentes sectores de la economía resultado de cambios en la estructura productiva provocadas por sustitución de insumos o mejoras en la productividad (ver tabla 3.6).

Tabla 3.6. Análisis convencional del cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia 2005 – 2010

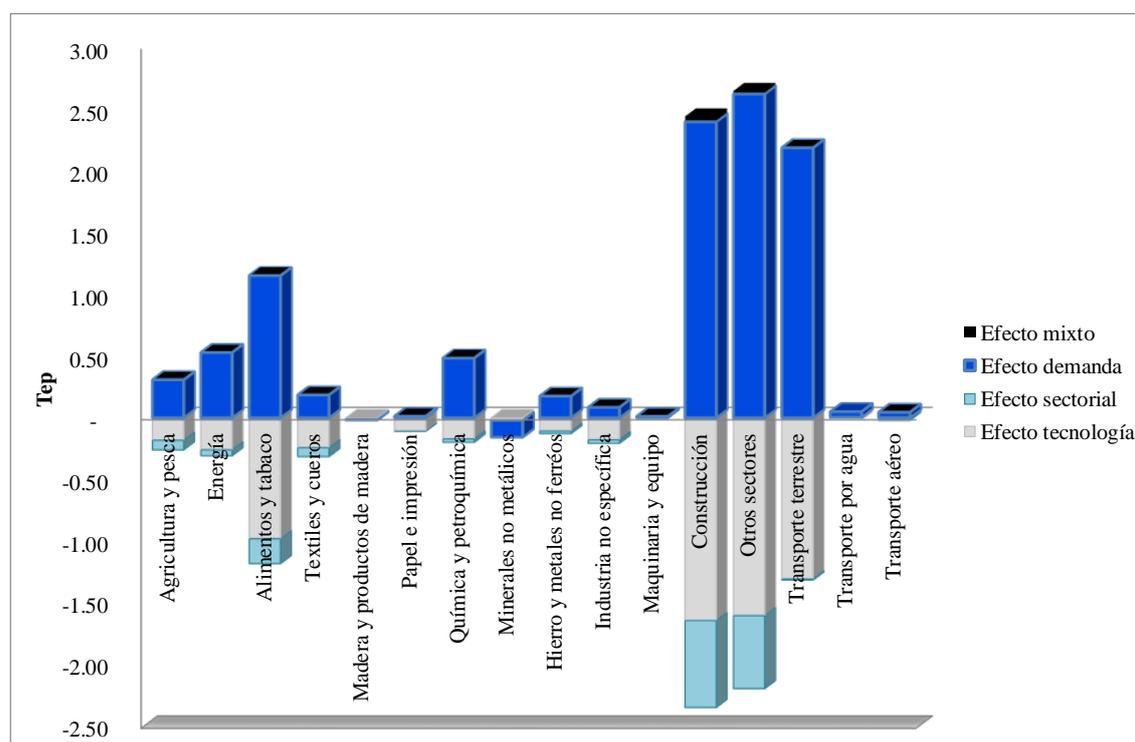
No. Sectores	Efecto Tecnología	%	Efecto Sectorial	%	Efecto Demanda	%	Efecto Mixto	%	Total	
1 Agricultura	-0.18	-373	-0.08	-161	0.31	630	0.00	4.5	0.05	100
2 Energía	-0.26	-118	-0.05	-22	0.53	241	0.00	0.1	0.22	100
3 Alimentos y tabaco	-0.98	-3761	-0.20	-776	1.15	4419	0.00	18.8	-0.03	100
4 Textiles y cueros	-0.24	-186	-0.07	-56	0.18	141	0.00	0.7	-0.13	100
5 Madera y prods. madera	-0.01	-67	0.00	-1	-0.01	-32	0.00	0.0	-0.02	100
6 Papel e impresión	-0.11	111	0.00	2	0.01	-12	0.00	0.0	-0.10	100
7 Química y petroquímica	-0.17	60	-0.03	10	0.48	-168	0.00	-1.2	0.29	100
8 Minerales no metálicos	-0.02	13	0.00	1	-0.14	86	0.00	0.2	-0.16	100
9 Hierro y acero	-0.11	-228	-0.02	-43	0.17	369	0.00	2.7	0.05	100
10 Industria no específica	-0.18	145	-0.03	23	0.08	-67	0.00	-0.4	-0.12	100
11 Maquinaria y equipo	0.00	-13	0.00	-2	0.01	-85	0.00	-0.4	0.01	100
12 Construcción	-1.64	1757	-0.70	753	2.40	-2564	0.04	-46.1	0.09	100
13 Otros sectores	-1.60	354	-0.59	130	2.62	-579	0.02	-5.4	0.45	100
14 Transporte terrestre	-1.31	-150	-0.01	-1	2.19	251	0.00	0.0	0.87	100
15 Transporte por agua	-0.02	55	0.00	-16	0.04	-139	0.00	0.2	0.03	100
16 Transporte aéreo	-0.02	-85	0.00	-7	0.04	192	0.00	0.5	0.02	100
Todos los sectores	-6.8481	447	-1.78	116	10.08	-658	0.0810	-5	1.5	100

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

El efecto tecnológico ha tenido un aporte negativo al crecimiento del consumo de EP total en todos los sectores, siendo los más destacados alimentos y tabaco (3), construcción (12) y otros sectores (13). Los sectores de menor cambio técnico son: transporte por agua (15) y maquinaria y equipo (11). O sea, que esta tendencia no cambió en los últimos cinco años.

La contribución del efecto demanda al aumento en el consumo de energía es positiva para 14 sectores, entre los que sobresalen: alimentos y tabaco (3), construcción (12), Otros sectores (13), y transporte terrestre (14). Los sectores donde la variación es negativa son: madera y productos de madera (5) y minerales no metálicos (8) (ver figura 3.7).

Figura 3.7. Análisis de cambio estructural del consumo de energía sectorial. Colombia, 2005-2010



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

3.4.3.2. Análisis de cambio estructural en términos del uso de energía

En esta sección se efectúa el análisis del cambio estructural desde la perspectiva del uso de la energía mediante la aplicación de la ecuación (3.37) y se identifican los factores que contribuyen a los cambios en el consumo de EP total durante los períodos 1996-2005 y 2005-2010. En los cálculos realizados del primer período se identifica un descenso en el consumo de EP total de 0.6 millones de toneladas equivalentes de petróleo. No obstante, en el período 2005-2010 el consumo de energía aumentó en 1.2 millones de toneladas equivalente de petróleo. Es decir, que en el quinquenio casi se duplicó el descenso conseguido durante 1996-2005. Las tablas 3.7 y 3.8 muestran los resultados de los efectos, a nivel global y sectorial, de ambos períodos.

Al igual que en el análisis convencional, para el período 1996-2005, el efecto estructura y tecnología energética en términos del uso de la energía, a nivel global, es positivo con 1.21

Tep, contribuyendo al crecimiento del consumo de EP total en un 194%. Sin embargo, a nivel sectorial, se observa que hay 5 sectores donde el efecto de este cambio contribuye a la disminución del consumo de energía, reflejando cambios favorables en la tecnología y la estructura de la economía de algunos sectores, en orden descendente, iniciando por el sector con crecimiento más negativo; éstos son: construcción (12), transporte por agua (15), transporte terrestre (14), transporte aéreo (16), y minerales no metálicos (8) (ver tabla 3.7 y figura 3.8).

El efecto del cambio en la demanda final y la tecnología energética en el uso de la energía, a nivel global, es negativo con -1.83 Tep, contribuyendo al descenso en un 294%. Este efecto muestra los cambios estructurales de la demanda final energética. Cabe señalar que, en este caso, el método alternativo propuesto por Proops (1988) no permite distinguir de forma independiente el efecto demanda final y el efecto del cambio tecnológico, obteniendo un resultado conjunto. Por el valor obtenido, pareciera que el cambio tecnológico neutraliza el impacto positivo en el consumo de energía de la demanda final, el cual es posible diferenciar en el análisis convencional del cambio estructural.

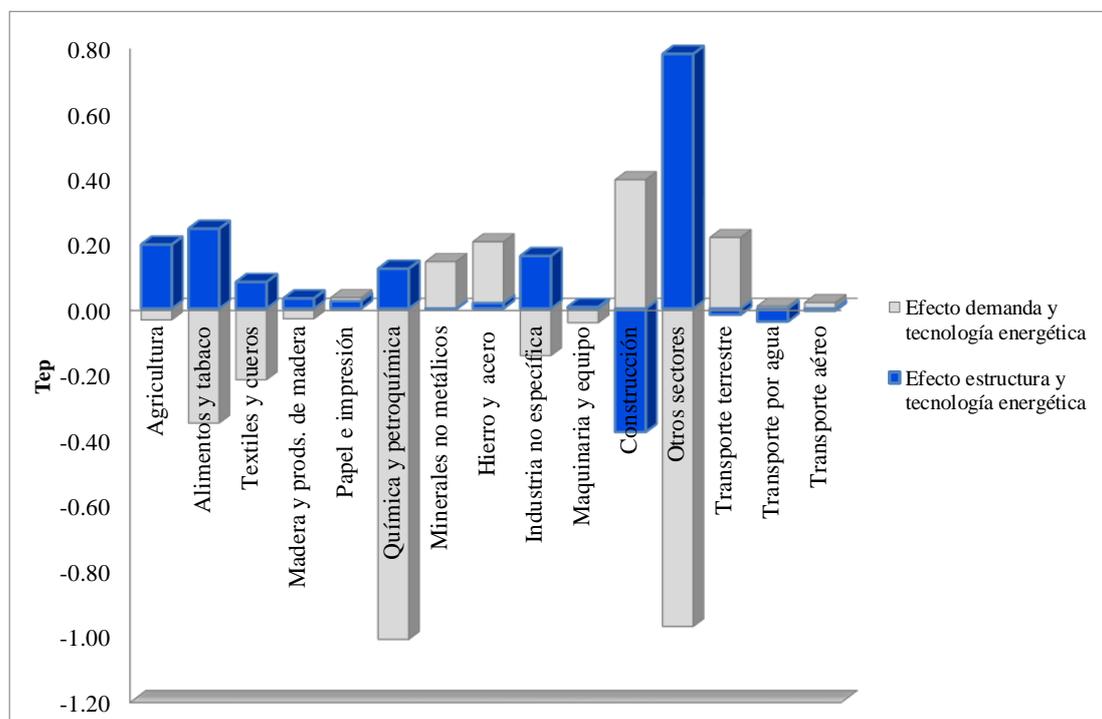
Los sectores con mayor incidencia, a nivel interno, en el descenso del uso de energía por la acción de este efecto conjunto, en su orden son: madera y productos de madera (5), industria no específica (10), otros sectores (13), alimentos y tabaco (3), textiles y cuero (4), química y petroquímica (7) y maquinaria y equipo (11) (ver tabla 3.7 y figura 3.8).

Tabla 3.7. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía 1996-2005. Colombia

No.	Sectores	Efecto estructura y tecnología energética	%	Efecto demanda y tecnología energética	%	Total	%
1	Agricultura	0.195	122	- 0.035	- 22	0.160	100
2	Energía	-	-	-	-	-	-
3	Alimentos y tabaco	0.244	229	- 0.351	- 329	0.107	100
4	Textiles y cueros	0.081	59	- 0.218	- 159	0.137	100
5	Madera y productos de madera	0.030	2,916	- 0.031	- 3,016	0.001	100
6	Papel e impresión	0.022	68	0.011	32	0.033	100
7	Química y petroquímica	0.121	14	- 1.013	- 114	0.891	100
8	Minerales no metálicos	- 0.002	- 1	0.143	101	0.141	100
9	Hierro, acero y metales no ferrosos	0.017	8	0.187	92	0.204	100
10	Industria no específica	0.160	980	- 0.144	- 880	0.016	100
11	Maquinaria y equipo	0.004	11	- 0.043	- 111	0.039	100
12	Construcción	- 0.378	- 2,370	0.394	2,470	0.016	100
13	Otros sectores	0.779	400	- 0.973	- 500	0.194	100
14	Sector transporte terrestre	- 0.019	- 10	0.217	110	0.198	100
15	Sector transporte por agua	- 0.040	- 121	0.007	21	0.033	100
16	Sector transporte aéreo	- 0.007	- 66	0.018	166	0.011	100
Todos los sectores		1.21	194	- 1.83	- 294	0.6	100

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.8. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía. Colombia, 1996-2005



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Para el período 2005-2010 se presentó un crecimiento en el uso de la EP total, explicado especialmente por el efecto del cambio estructural de la demanda final y el cambio técnico del uso de energía. A nivel global, éste es de 1.19 Tep, representando el 96% del cambio. En un plano secundario, el crecimiento en el uso de energía es explicado por el efecto del cambio en la estructura del comercio y la tecnología energética. A nivel global, éste es de 0.05 Tep, contribuyendo al incremento del consumo de energía en un 3.9%.

No obstante, a nivel sectorial hay 10 sectores donde el efecto de este cambio en la estructura y la tecnología es negativo, destacándose agricultura (1), otros sectores (13), textiles y cuero (4), industria no específica (10), transporte terrestre (14) y el sector de la industria química y petroquímica (7), etc. Es decir, que estos sectores han disminuido el uso de energía. El efecto se contrarresta especialmente por el sector construcción (ver tabla 3.8 y figura 3.9).

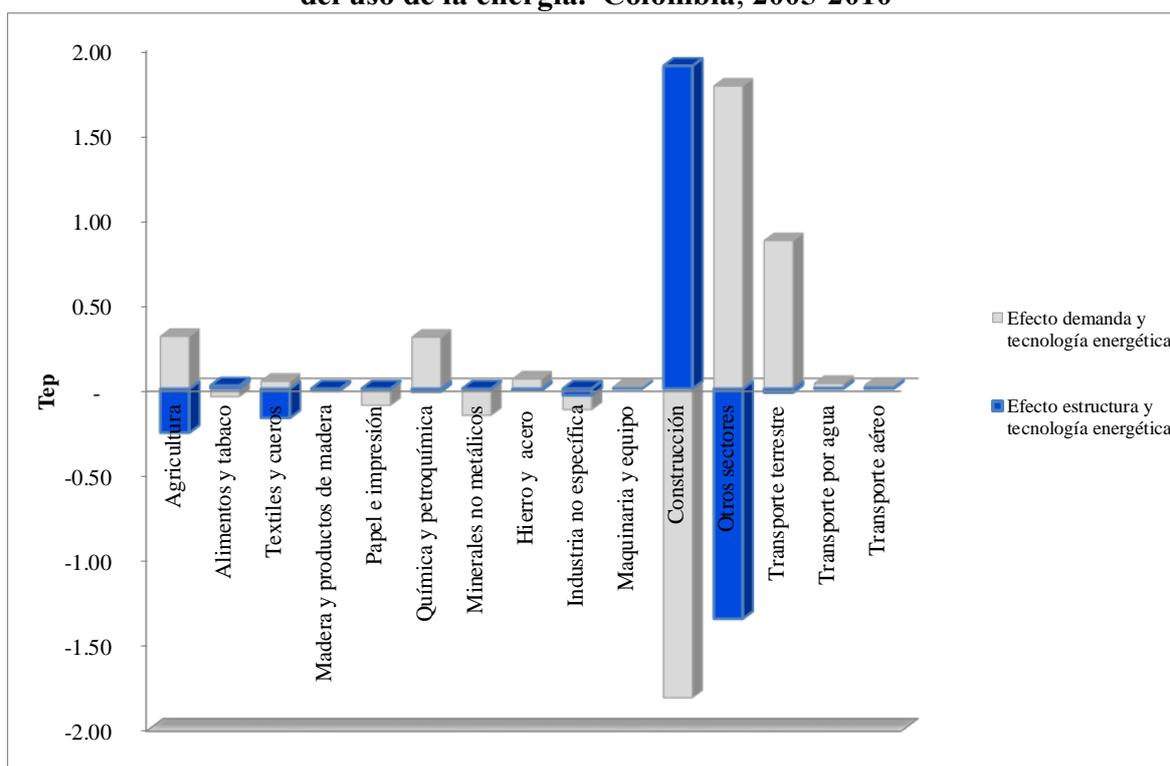
El efecto del cambio en la estructura de la demanda final y el cambio en la tecnología del uso de energía, es el más importante. Este efecto muestra el cambio de estructura y nivel de la demanda de la economía energética colombiana. Se destacan 6 sectores cuyo cambio técnico contribuye al descenso del uso de la EP total productiva, a saber: Construcción (12), minerales no metálicos (8), papel e impresión (6), industria no específica (10), alimentos y tabaco (3) y madera y productos de madera (5) (ver tabla 3.8 y figura 3.9).

Tabla 3.8. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía 2005-2010. Colombia

Sector		Efecto estructura y tecnología energética		Efecto demanda y tecnología energética		Total	
	Sectores		%		%		%
1	Agricultura	- 0.258	- 532	0.307	632	0.049	100
2	Energía	-	-	-	-	-	-
3	Alimentos y tabaco	0.017	61	0.046	161	0.029	100
4	Textiles y cueros	- 0.172	- 134	0.043	34	- 0.128	100
5	Madera y productos de madera	- 0.004	- 25	- 0.013	- 75	- 0.017	100
6	Papel e impresión	- 0.001	- 1	- 0.097	- 99	- 0.098	100
7	Química y petroquímica	- 0.017	- 6	0.302	106	0.285	100
8	Minerales no metálicos	- 0.000	- 0	- 0.156	- 100	- 0.156	100
9	Hierro, acero y metales no ferrosos	- 0.010	- 22	0.057	122	0.047	100
10	Industria no específica	- 0.038	- 31	- 0.085	- 69	- 0.123	100
11	Maquinaria y equipo	0.001	9	0.009	91	0.010	100
12	Construcción	1.898	2,355	- 1.817	-2,255	0.081	100
13	Otros sectores	- 1.352	- 317	1.779	417	0.427	100
14	Sector transporte terrestre	- 0.023	- 3	0.870	103	0.848	100
15	Sector transporte por agua	0.003	11	0.027	89	0.030	100
16	Sector transporte aéreo	0.006	31	0.013	69	0.019	100
Todos los sectores		0.05	3.9	1.19	96	1.2	100

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

Figura 3.9. Análisis de cambio estructural de la producción sectorial en términos del uso de la energía. Colombia, 2005-2010



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la IEA (2014) y DANE (2014).

3.5. Conclusiones

El trabajo unifica diferentes metodologías propuestas por investigadores expertos en el tema que permiten realizar una contribución importante al conocimiento de las relaciones entre las distintas industrias colombianas durante los períodos 1996-2005 y 2005-2010, desde la perspectiva del consumo de energía.

La estimación de la EP total aplicando el modelo de Leontief a los balances energéticos, permite cuantificar mejor el contenido energético por unidad de producto a nivel sectorial, arrojando una estimación superior e integral, en comparación con los cálculos que se hubieran podido obtener al trabajar con la energía final directa. Realizar el trabajo con la EP total permite una clasificación sectorial más rigurosa sobre el verdadero consumo de energía, pues el consumo de energía directo, conllevaría identificar sectores prioritarios distintos o

con diferente peso sobre el sistema económico, porque no se tiene en cuenta la energía necesaria para el proceso de transformación de la energía final que se utiliza en el sector.

Se confeccionaron las tablas simétricas IO con la visión metodológica y analítica de Naciones Unidas y el marco conceptual del sistema de Cuentas Nacionales 2008, contribuyendo con ello al logro de los propósitos del programa de cuentas nacionales y macroeconomía del DANE.

Las estimaciones permiten identificar los principales factores asociados al cambio en el consumo de energía, mediante el uso de los balances energéticos y las tablas simétricas IO de los sectores productivos en Colombia. En este sentido, el estudio es pionero, puesto que hasta el momento no se había construido una herramienta de este tipo para apoyar el análisis del cambio estructural del consumo de la energía primaria total.

Los sectores considerados clave por su mayor efecto total y distributivo en el consumo de la energía, desde el punto de vista de la elasticidad energía-demanda, considerando importaciones, para el período estudiado 1996-2005, son: otros sectores (12), transporte terrestre (13) y alimentos y tabaco (3). Por el lado del efecto total destacan: el sector construcción (11). Por el efecto distributivo sobresalen: agricultura, silvicultura y pesca (1), química y petroquímica (7) y minerales no metálicos (8). Para el período 2005 y 2010 continúan los mismos sectores clave, excepto alimentos y tabaco (3), que pasa a ser relevante únicamente por su efecto total en el sistema económico. Los sectores relevantes por su efecto distributivo continúan igual (en el mismo cuadrante, con ligeros cambios en el valor de su elasticidad). El cambio de posición del sector alimentos y tabaco (3), también se presenta cuando se comparan las elasticidades a nivel nacional de los años 2005 y 2010, el resto de los sectores sigue igual.

El estudio encuentra que durante la primera década hubo un descenso en el consumo de energía (0.6 millones de Tep). Sin embargo, en el último quinquenio, el incremento del consumo de energía casi triplicó el valor del descenso alcanzado (1.5 millones de Tep).

El análisis del cambio estructural convencional del consumo de energía (considerando la intensidad energética, la interrelación entre los sectores y la demanda final) ha permitido identificar los principales factores que han influido en el cambio, tanto a nivel global como sectorial. En primer lugar, se observa que el cambio en la estructura y el nivel de demanda final son los principales factores explicativos del crecimiento en el consumo de energía.

Asimismo, se visualiza que el componente tecnológico es el factor que mejor explica el descenso en el consumo de energía, relegando a un segundo plano la interacción entre los distintos efectos. Entre los sectores que más se destacan por este factor técnico, se encuentran: la construcción, otros sectores y el transporte terrestre, probablemente debido a la política de masificación de uso de gas en el país, promovida desde finales de la década de los noventa.

El cambio técnico en el sector energético, en parte, también es un reflejo del esfuerzo que ha realizado el gobierno en la implementación de políticas sobre el uso racional y eficiente del consumo de energía, a partir de la ley 697, reglamentada con el decreto 3683 del año 2003.

Al examinar el cambio estructural considerando la energía usada a nivel sectorial para producir bienes durante el período 1996-2005, se verifica el rol fundamental del cambio técnico, pues el descenso en el uso de la energía se debe principalmente a los cambios tecnológicos en el uso de la energía y la demanda. De otro lado, el aumento en el uso de la energía se explica por el cambio en la estructura sectorial y la tecnología en términos del uso de la energía. Para el último quinquenio 2005-2010, a nivel global ambos efectos son positivos, y a nivel sectorial, el efecto tecnológico y de demanda presenta un impacto mayor.

A partir de los resultados obtenidos en la descomposición estructural, en la identificación de sectores con un alto efecto multiplicador en el consumo de EP total productiva, y en el consumo propio sectorial identificado en la matriz de elasticidad, se determinan los sectores clave (nacionales y con importaciones) sobre los cuales se debe focalizar los esfuerzos de una política de incentivos y de conservación de la energía para lograr una mejor eficiencia energética en el país. A futuro sería deseable tener un mayor desglose de las actividades económicas con el fin de lograr una mayor dinámica y especificidad en la identificación de sectores clave.

Mención especial merece el sector “otros sectores”, que agrupa 19 sectores relacionados con el campo de los servicios. En el análisis de cambio estructural convencional éste presenta el mayor efecto demanda. Es decir, el que ha tenido el mayor aumento de la demanda del consumo de EP total productiva en el período 1996-2005 y 2005-2010. Estos resultados ponen en evidencia que el sector servicios tiene un gran impacto (en los eslabones previos

de la cadena y en los eslabones consecutivos) en el incremento de la demanda de energía, por la gran participación de los servicios en la producción industrial. Queda pendiente por responder si las tecnologías utilizadas en el sector servicios son eficientes energéticamente y cuáles son las implicaciones que esto tiene para la competitividad del mismo sector y de la industria en su conjunto. Este mismo fenómeno también se observa al revisar la descomposición en términos del uso de la energía durante el período 2005-2010. En esta última descomposición, el efecto demanda neutraliza el cambio tecnológico. Corroborando lo dicho.

En estudios futuros sería deseable realizar una mayor desagregación del sector transporte, dado su alto impacto (real y potencial) sobre el consumo y uso de energía primaria. Así como un análisis de cambio estructural por tipos de energía incluyendo la demanda final desglosada por categorías (exportaciones, capital fijo, gobierno, hogares, etc.). Esto con el fin de conocer la dependencia que existe a nivel sectorial según fuente energética. No obstante, basado en los hallazgos del estudio, los balances energéticos y las estadísticas del país, el desarrollo de una política energética específica para el sector transporte terrestre (14) es necesaria, debido al alto consumo de energía de este sector. Las líneas específicas sobre las cuales se debe continuar trabajando al interior del sector serían: la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, la disminución de la congestión vehicular, la renovación del parque vehicular y el mantenimiento de los mismos. Asimismo, se requiere crear políticas de incentivos para impulsar el desarrollo y uso de vehículos eléctricos e híbridos en el sistema de transporte masivo, y contar con estadísticas actualizadas y consolidadas sobre el tipo de combustibles que se consumen en el sector por tipo y modo de transporte. Al igual que impulsar el desarrollo de investigación I+D+D⁶⁸ sobre las tecnologías energéticas sin carbono.

Otro sector que sobresale es el sector de la construcción (12). En este caso, la política debería orientarse a la construcción de vivienda y edificios bioclimatizados, según los materiales propios de cada región del país, así como impulsar el uso de la etiqueta de eficiencia energética, los sistemas de refrigeración solar según las condiciones geográficas del país, así

⁶⁸Investigación, desarrollo tecnológico y demostración.

como la investigación en el diseño de este tipo de construcciones e identificación de nuevos materiales adecuados para este propósito.

En el sector de industrial se necesita: a) impulsar buenas prácticas del uso de la energía, promover una nueva forma de valorar y usar adecuadamente la energía, incentivar el cambio de equipo eléctrico y térmico ineficiente, facilitar la transferencia de tecnología entre los sectores industriales, etc. b) Realizar un análisis por subsectores de la industria de alimentos y tabaco (3), química y petroquímica (7) y minerales no metálicos (8), identificando aquellos subsectores con menor eficiencia energética y que requieren optimización de sus procesos industriales para disminuir el consumo de energía.

Si bien, el gobierno ha desarrollado políticas que racionalizan el consumo de energía entre los sectores mencionados, un sector que ha sido ignorado es el denominado otros sectores, relacionado con los sectores de servicios. Éstos cobran gran relevancia en la brecha entre los países desarrollados y en desarrollo, por convertirse en el elemento que diferencia y personaliza el contenido energético de un producto en el mercado. En esta línea se requiere impulsar el desarrollo de los servicios relacionados con I+D+i en el campo energético y facilitar la transferencia de tecnología entre los sectores, por ejemplo, de los centros de investigación de las universidades hacia las empresas, o entre las mismas universidades o las mismas empresas.

El consumo de energía del sector servicios a futuro se convierte en un mayor desafío, pues el aumento del PIB per cápita, la urbanización y el envejecimiento de la población contribuyen a aumentar la demanda de servicios.

Finalmente, se sugiere que el país integre la matriz IO nacional a la matriz IO internacional, con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de la cadena global de valor de la energía. Esta herramienta analítica permite un análisis más detallado de la participación de Colombia en la economía global, contribuyendo a identificar los encadenamientos productivos de la cadena global de valor, definir políticas orientadas a eliminar barreras comerciales en estos eslabones, y fortalecer procesos de innovación y alta tecnología, que impulsan el desarrollo de energías renovables.

Se requiere realizar un análisis de política para evaluar, valorar y cuantificar el impacto real de las políticas implementadas por el gobierno, en materia de uso eficiente y racional del consumo de energía por diferentes fuentes. Por ejemplo, la reconversión de vehículos de motor a vehículos de gas vehicular o la sustitución de la electricidad por gas en el sector industrial.

3.6. Bibliografía

- Al-Ali, H. M. (1979). Input-output analysis of energy requirements - An application to the Scottish economy in 1973. *Energy Economics*, 1(4), 211-218.
- Albino, V., Dietzenbacher, E., y Kühtz, S. (2003). Analysing Materials and Energy Flows in an Industrial District using an Enterprise Input-Output Model. *Economic System Research*, 15(4), 457 - 480.
- Alcántara, E. V., y Padilla, R. E. (2003). "Key" sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case. *Energy Policy*, 31(15), 1673-1678.
- Alcántara, V. (1995). *Economía y contaminación atmosférica: hacia un nuevo enfoque desde el análisis input-output*. Ph.D Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Alcántara, V., y Duarte, R. (2004). Comparison of energy intensities in European Union countries. Results of a structural decomposition analysis. *Energy Policy*, 32(2), 177-189.
- Alcántara, V., y Padilla, E. (2003). "Key" sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case. *Energy Policy*, 31(15), 1673-1678.
- Alcántara, V., y Roca, J. (1995). Energy and CO2 emissions in Spain: Methodology of analysis and some results for 1980 -1990. *Energy Economics*, 17(3), 221-230.
- Alcántara, V., y Roca, J. (2004). Consumo energético y actividad económica: sobre el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input-output. In P. Campos Palacín & J.-M. Casado Raigón (Eds.), *Cuentas ambientales y actividad económica* (pp. 163-199). Madrid: Consejo General de Colegios de Economistas de España.
- Antúnez Torres, A., Sanjuán Solís, J., y Casquero Tomas, A. (2011). *El cambio estructural en la economía española 1980-2005: un análisis sectorial*. Paper presented at the IV Spanish Conference on Input Output analysis.
- Bonet, M. J. (2000). La matriz insumo-producto del caribe colombiano *Documentos de trabajo sobre economía regional*: Banco de la República.
- Bonet Morón, J. (2000). La matriz insumo-producto del caribe colombiano *Documentos de trabajo sobre economía regional*: Banco de la República.
- Casler, S., y Wilbur, S. (1984). Energy input-output analysis: A simple guide. *Resources and Energy*, 6(2), 187-201.
- Cochran, W. G. (1968). The Effectiveness of Adjustment by Subclassification in Removing Bias in Observational Studies. *Biometrics*, 24(2), 295-313. doi: 10.2307/2528036
- COLCIENCIAS. (2012). *Plan de Ciencia Tecnología e Innovación para el Desarrollo de la Energía Sustentable en Colombia*. Bogotá: KEMA-CENERGÍA.
- Cumberland, J., H. (1966). A Regional Interindustry Model for Analysis of Development Objectives. *Papers of the Regional Science Association*, 17, 64-94.
- DANE -Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2009). Metodología Tablas Correlativas Económicas y Sociales *Colección de documentos No. 49*. Bogotá: DANE.
- DANE -Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). Matrices de productos nacionales e importados a precios básicos, año base 2005. Bogotá: DANE.
- Dietzenbacher, E., y Hoekstra, R. (2002). The RAS Structural Decomposition Approach *Trade, Networks and Hierarchies* (pp. 179-199): Springer Berlin Heidelberg.
- Dietzenbacher, E., y Los, B. (2000). Structural Decomposition Analyses with Dependent Determinants. *Economic Systems Research*, 12(4), 497-514. doi: 10.1080/09535310020003793
- DNP-Departamento Nacional de Planeación. (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010 - 2014. Prosperidad para todos* (Vol. II). Bogotá: Ministerio de Hacienda y Crédito Público y Departamento Nacional de Planeación.

- Duque, S. H., Castañeda, R. J., y Garizado, R. P. A. (2005). *Analisis de los Multiplicadores de producción a partir de la matriz insumo producto simetrica Para Colombia – año de 1994*. Paper presented at the I Jornadas de Análisis Input Output Oviedo.
- Garbaccio, R. F., Ho, M. S., y Jorgenson, D. W. (1999). Why has the energy - output ratio fallen in China? *Energy Journal*, 20(3), 63-91.
- García Muñiz, A. S., Morillas Raya, A., y Ramos Carvajal, C. (2008). Key Sectors: A New Proposal from Network Theory. *Regional Studies*, 42(7), 1013–1030.
- Gould, B. W., y Kulshreshtha, S. N. (1986). An interindustry analysis of structural change and energy use linkages in the Saskatchewan economy. *Energy Economics*, 8(3), 186-196.
- Han, X., y Lakshmanan, T. K. (1994). Structural changes and energy consumption in the Japanese economy 1975-1985: an input output analysis. *Energy Journal*, 15(3), 165-188.
- Hirschman, A. O. (1958). *The Strategy of Economic Development*. New Haven: Yale University Press.
- Hoekstra, R. (2005). *Economic Growth Material Flows and the environment. New applications of structural decomposition analysis and physical input output tables*. Cheltenham: Edward Elgar Publishers
- Hsu, G. J. Y. (1989). Energy multipliers for economic analysis : An input-output approach. *Energy Economics*, 11(1), 33-38.
- IEA -International Energy Agency. (2007). *Energy Balances of non-OECD countries 2004-2005*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2012). *Energy Balances of non-OECD Countries 2012*. Paris: OCDE/IEA.
- IEA -International Energy Agency. (2014). World Energy Balances. Documentation for beyond 2020 files Disponible en <http://www.iea.org/statistics/topics/energybalances/>.
- Kagawa, S., y Inamura, H. (2001). A structural decomposition of energy consumption based on a hybrid rectangular Input-Output framework: Japan's Case *Economic System Research*, 13(4), 339-363.
- Kagawa, S., y Inamura, H. (2004). A spatial structural decomposition analysis of Chinese and Japanese energy demand: 1985-1990. *Economic System Research*, 16(3), 279-299.
- Kenneth, B., y Medlock, I. (2009). Energy demand theory. In J. Evans & H. C. Lester (Eds.), *International Handbook on the Economics of Energy* (pp. 89-111). Massachusetts: Edward Elgar Publishing Limited.
- Lenzen, M. (1998). Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input-output analysis. *Energy Policy*, 26(6), 495-506.
- Lenzen, M. (2001). A Generalized Input Output Multiplier Calculus for Australia. *Economic Systems Research*, 13(1), 1-28.
- Leontief, W. (1970a). Environmental repercussions and the economic structure — an input–output approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262-271.
- Leontief, W. (1970b). Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262-271.
- Leontief, W. (1972). Air pollution and the economic structure: empirical results of input–output computations. In A. Brody & A. Carter (Eds.), *Input - Output Techniques* (pp. 9-30). Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Leontief, W. (1975). *Análisis input output*. Barcelona: Ediciones Orbis, S.A.
- Machado, G., Schaeffer, R., y Worrell, E. (2001). Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach. *Ecological Economics*, 39(3), 409-424.
- Miller, E. R., y Blair, D. P. (1985). *Input Output Analysis, Foundations and Extensions*. New York: Prentice Hall International Inc.
- Miller, E. R., y Blair, D. P. (2009). *Input Output Analysis, Foundations and Extensions*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mukhopadhyay, K., y Chakraborty, D. (1999). India's energy consumption changes during 1973-74 to 1991-92. *Economic System Research*, 11(4), 423-437.

- Park, H.-C., y Heo, E. (2007). The direct and indirect household energy requirements in the Republic of Korea from 1980 to 2000--An input-output analysis. *Energy Policy*, 35(5), 2839-2851.
- Park, S. H. (1982). An input-output framework for analysing energy consumption. *Energy Economics*, 4(2), 105-110.
- Patiño, P. L. I. (2008). *Análisis de las necesidades de energía primaria desde la perspectiva insumo producto (input-output): Aplicación a la economía colombiana*. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.
- Pérez Viéitez, H. (2007). *Un análisis SAM de las intensidades energéticas en Catalunya*. Maestría MSc. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.
- Proops, J. L. R. (1984). *Energy Intensities, Input-output Analysis and Economic Development*: University of Keele, Department of Economics.
- Proops, J. L. R. (1984). Modelling the energy-output ratio. *Energy Economics*, 6(1), 47-51.
- Proops, J. L. R. (1988). Energy intensities, input output analysis and economic development. In M. Ciaschini (Ed.), *Input output Analysis: Current Developments* (pp. 201-215). London: Chapman and Hall.
- Rasmussen, N. P. (1956). *Studies in InterSectoral Relations*. Amsterdam: North Holland Publishing Company.
- Roca, J., Alcántara, V., y Padilla, R. E. (2007). Anàlisi del Metabolisme Energètic de l'Economia Catalana (AMEEC). Consum final d'energia. Barcelona: Estudi encarregat pel Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS). Generalitat de Catalunya.
- Rocchi, P., y Serrano Gutiérrez, M. (2011). *Environmental Structural Decomposition Analysis of Italian Emissions, 1995-2005*. E11/267, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.
- Rueda-Cantucho, J. M., y Raa, T. t. (2007). *Symmetric input - output tables: products or industries?* Paper presented at the II Jornadas de análisis input - output. Crecimiento, demanda y recursos naturales, Zaragoza.
- Serrano, M. (2008). *Economic Activity and Atmospheric Pollution in Spain: an Input Output Approach*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona. Disponible en <http://hdl.handle.net/10803/2883>
- Tiwari, P. (2000). An analysis of sectoral energy intensity in India. *Energy Policy*, 28(11), 771-778.
- Treloar, G. J. (1997). Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables: Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method. 9, 4, 375 - 391.
- United Nations. (1999a). Handbook of input-output table compilation and analysis. Studies in Methods, Handbook of National Accounting *Serie F, No. 74 ST/ESA/STAT/SER.F/74*. New York: United Nations, Statistics Division, Department for Economic and Social Affairs
- United Nations. (1999b). *System of National Accounts (SNA) 1993*. New York: United Nations Publication.
- United Nations. (2000). Handbook of National Accounting. Integrated environmental economic accounting an operational manual *Serie F No. 78*. New York: United Nations Publication.
- United Nations. (2003). Handbook of National Accounting. Studies in Methods. National Accounts: a practical introduction *Series F, No.85*. New York: Unites Nations.
- United Nations, International Monetary Fund, World Bank, Organization for Economic Cooperation and Development, y Commission of the European Communities. (1993). *System of National Accounts 1993*. Brussels/Luxemburgo, New York, Paris, Washington, D.C.: Eurostat, IMF, OECD, UN, WB.
- United Nations, International Monetary Fund, World Bank, Organization for Economic Cooperation and Development, y Commission of the European Communities. (2009). *System of National Accounts 2008*. New York: Eurostat, IMF, OECD, UN, WB.
- UPME- Unidad de Planeación Minero Energética. (2006). *Plan Nacional para el Desarrollo Minero. Colombia País Minero. Visión al año 2019*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Plan Energético Nacional. Estrategia Energética Integral. Visión 2003 - 2020*. Bogotá: MINMINAS-UPME.

- UPME-Unidad de Planeación Minero Energética. (2011). *Balances Energéticos 1975-2009. Reconstrucción de series de demanda por uso y subsectores*. Bogotá: MINMINAS-UPME.
- Wier, M. (1998). Sources of changes in emissions from energy: a structural decomposition analysis. *Economic System Research*, 10(2), 99-112.
- Wu, R.-H., y Chen, C.-Y. (1990). On the application of input-output analysis to energy issues. *Energy Economics*, 12(1), 71-76. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883\(90\)90010-D](http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883(90)90010-D)
- Zhang, Y. (2010). Supply-side structural effect on carbon emissions in China. *Energy Economics*, 32(1), 186-193. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.09.016>

Anexo

Anexo 3A.1. Resumen de los estudios sobre el consumo de energía usando el modelo Input Output

N o.	Autor y año	Indicador de flujo físico	Período Analizado	Región/país	Tecnología	Modelo monetario o híbrido
1	Al-Ali (1979)	Carbón, productos refinados del petróleo, gas y electricidad	1973	Escocia	Coefficientes IO	Modelo monetario
2	Gould and Kulshreshtha (1986)	Gas natural, electricidad, combustibles líquidos y carbón	74-79	Canadá	Coefficientes IO	Modelo monetario
3	Proops (1988)	Consumo de energía	1956-1965 1951-1964 1948-1965 1958-1964 1935-1968 1951-1965	Filipinas India Países Bajos Yugoslavia Reino Unido Japón	Coefficientes IO	Modelo Híbrido
4	Su (1989)	Energía y actividades económicas	1978	Taiwán	Multiplicadores	Modelo híbrido
5	Han and Lakshmanan (1994)	Uso de energía primaria: carbón, petróleo crudo, gas natural, productos del petróleo, productos del carbón, electricidad	75-80-85	Japón	Coefficientes IO de energía y no energía	Modelo híbrido
6	Alcantára y Roca (1995)	Uso de la energía y el dióxido del carbón	80-90	España	Coefficientes IO	Modelo híbrido
7	Treloar (1997)	Consumo de energía primaria	1986-87	Australia	Coefficientes IO	Modelo híbrido
8	Wier (1998)	Uso de la energía y emisiones	66-70, 71-75, 76-80, 81-85, 85-88	Dinamarca	Coefficientes IO	Modelo monetario
9	Lenzen (1998)	Energía primaria y gases de efecto invernadero	1993	Australia	Coefficientes IO	Modelo híbrido
10	Garbaccio et al. (1999)	Relación energía producción	87-92	China	Coefficientes IO	Modelo híbrido
11	Mukhopadhyay y Chakraborty (1999)	Carbón, petróleo crudo y electricidad	73-74, 83-84, 91-92	India	Coefficientes IO de energía y no energía	Modelo híbrido y monetario
12	Tiwari (1999)	Carbón, petróleo, electricidad y combustibles	1983-84 y 1989-90	China	Coefficientes IO	Modelo híbrido
13	Kagawa and Inamura (2001)	Energía y no energía	1985-1990	Japón	Coefficientes IO	Modelo Híbrido
14	Lenzen (2001)	Trabajo y energía	1994-95	Australia	Multiplicadores	Modelo monetario
15	Albino et al. (2003)	Energía y contaminación	-	Dist. industrial Sur de Italia	Coefficientes IO	Modelo híbrido
16	Alcantára y Padilla (2003)	Consumo de energía final	1995	España	Elasticidades	
17	Kagawa and Inamura (2004)	Demanda. de energía	85-90	China y Japón	Coefficientes IO domésticos	Modelo monetario
18	Park y Heo (2007)	Requerimientos directos e indirectos de energía	1980-2000	República de Corea	Coefficientes IO	Modelo monetario
19	Roca et al. (2007)	Energía primaria y final	1990-2005	Cataluña	Coefficientes IO	Modelo híbrido
20	Pérez (2007)	Intensidad energética	2001	Cataluña	Coefficientes IO y multiplicadores	Modelo híbrido
21	Patiño (2008)	Consumo de energía primaria	2005	Colombia	Coef. IO y multiplicadores	Modelo híbrido

Fuente: Elaboración propia, 2015. Algunos autores son tomados de Hoekstra (2005).

Anexo 3A.2. Síntesis cronológica de los principales cambios de la normatividad vigente energética en Colombia, 2000-2014

Ley	Año	Descripción
Ley 629	2000	Por la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997
Ley 697	2001	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Persigue ampliar y optimizar el uso y cobertura de la energía mediante el fomento de la eficiencia energética, aprovechamiento de energías renovables y utilización de tecnologías avanzadas-
Ley 788 Incentivos tributarios	2002	Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones
Decreto 3683	2003	Por el cual se reglamenta la ley 697 de 2001 y se crea la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía, CIURE, con el fin de asesorar y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en la coordinación de políticas sobre uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales en el sistema interconectado nacional y en las zonas no interconectadas.
Resolución 180609	2006	Por la cual se definen los subprogramas que hacen parte del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, y se adoptan otras disposiciones
Decreto 46679	2007	Por medio del cual se dictan disposiciones para promover prácticas con fines de uso racional y eficiente de energía eléctrica
Resolución 180919	2010	Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto
Ley 1450	2011	Plan Nacional de Desarrollo
Resolución 0563	2012	Por la cual se establece el procedimiento y los requisitos para evaluar y conceptuar sobre las solicitudes presentadas al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con miras a la exclusión de impuestos sobre ventas IVA y/o reducción en la renta de elementos, equipos y maquinaria destinadas a proyectos, programas o actividades de reducción en el consumo de energía y eficiencia energética. UPME
Resolución 186	2012	De la generación y del uso racional eficiente de la energía, enmarcados en el Plan indicativo 2010-2015 del Ministerio de Minas y Energía
Resolución 778	2012	Requisitos para la exclusión del IVA en sistema de control ambiental, sistema de monitoreo ambiental y programa ambiental.
Resolución 779		Deducción de inversiones en medio ambiente.
Ley 1715	2014	Regulación de la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Anexo 3A.3. Tabla de uso a precios básicos. Colombia 1996 año base 2005 (en miles de millones de pesos corrientes)

Código	Sector	Exportaciones														Gasto en consumo final			Gobierno		Formación bruta de capital				Importaciones							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total ramas de actividad	Total Bienes y Servicios	Total consumo final	Hogares	ISFLS H	Total Gobierno	Colectivo	Individual	Total FBK	FBKF	Variación de existencias	Adquisición menos disposición de objetos valiosos	CIF básicos	Impuestos y derechos excluyendo el IVA	Total Producción Nacional		
1	Agricultura, silvicultura y pesca	816	0	7.257	149	174	0	20	0	1	21	152	719	0	0	9.309	880	0	3.820	3.820	0	0	0	788	783	5	0	-1.303	-27	13.467		
2	Energía	43	2.637	183	132	90	13	168	186	122	152	40	964	678	51	50	5.507	3.905	0	2.213	2.213	0	0	0	210	0	210	0	-533	-19	11.283	
3	Alimentos y tabac	892	0	2.365	109	15	0	148	0	0	8	0	2.533	0	0	1	6.070	2.180	0	11.977	11.908	0	69	0	69	332	0	332	0	-984	-67	19.508
4	Textiles y cueros	35	6	6	1.905	60	4	4	4	6	172	23	248	2	0	1	2.477	961	0	5.192	5.177	0	15	0	15	89	0	89	0	-1.454	-48	7.217
5	Madera y productos de madera	66	8	284	106	496	265	78	57	33	290	382	486	3	0	3	2.558	150	0	484	484	0	0	0	15	0	15	0	-438	-17	2.752	
6	Papel e impresión	2	13	95	16	14	46	44	4	6	35	1	647	2	0	2	926	143	0	447	447	0	0	0	20	0	20	0	-162	-3	1.371	
7	Química y petroquímica	612	44	229	263	103	48	1.342	92	57	632	159	1.064	1	0	5	4.650	741	0	3.475	3.049	0	426	0	426	109	0	109	0	-2.871	-112	5.992
8	Minerales no metálicos	24	13	128	2	2	0	45	488	41	70	2.798	86	0	0	0	3.698	388	0	96	96	0	0	0	-37	0	-37	0	-429	-20	3.696	
9	Hierro, acero y metales no ferrosos	86	3	154	14	20	5	78	39	1.123	647	1.333	101	3	0	0	3.607	752	0	324	324	0	0	0	332	244	88	0	-1.327	-69	3.618	
10	Industria no específica	108	145	525	126	153	28	240	157	184	1.481	975	2.205	506	51	47	6.931	721	0	3.187	3.187	0	0	0	5.877	5.631	246	0	-7.339	-548	8.829	
11	Construcción	66	300	6	4	0	1	3	3	2	4	235	1.145	30	1	3	1.802	0	0	0	0	0	0	0	15.252	15.252	0	0	0	0	17.054	
12	Otros sectores	961	797	2.809	1.526	643	470	1.730	526	741	1.877	2.604	21.604	1.957	90	390	38.726	219	601	62.533	45.849	407	16.277	10.016	6.261	2.007	2.007	0	0	-1.710	0	102.375
13	Sector transporte terrestre	240	650	570	163	139	36	300	190	74	402	381	776	15	0	23	3.959	160	24	3.193	3.193	0	0	0	41	41	0	0	17	0	7.394	
14	Sector transporte por agua	4	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114	72	301	0	521	0	49	234	234	0	0	0	0	0	0	0	0	-32	0	772
15	Sector transporte aéreo	13	7	17	12	3	3	12	6	4	14	4	567	0	0	40	702	0	300	172	172	0	0	0	0	0	0	0	0	-278	0	896
	Impuestos menos subvenciones	94	88	271	111	45	27	143	84	70	238	385	1.340	506	43	47	3.494	455	12	3.246	3.246	0	0	0	596	596	0	0	0	0	0	
	Ajustes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Compras directas en el exterior por residentes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.221	1.221	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.221	0	0
	Compras directas en el territorio nnal por no residentes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	693	532	-1.225	-1.225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Valor agregado	10.661	6.714	4.180	2.623	892	689	2.172	1.967	1.243	3.024	7.435	65.470	3.549	242	426	111.287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total producción	14.722	11.454	19.081	7.261	2.849	1.635	6.529	3.802	3.707	9.068	16.907	100.068	7.324	779	1.038	206.224	693	532	100.589	83.395	407	16.787	10.016	6.771	25.631	24.554	1.077	0	-20.064	-930	206.224

Fuente: Cálculos propios a partir de las cuentas nacionales del DANE, 2014.

Anexo 3A.5. Matriz Q y pruebas de verificación 1996

No.	Agricultura, silvicultura y pesca	Energía	Alimentos y tabaco	Textiles y cueros	Madera y productos de madera	Papel e impresión	Química y petroquímica	Minerales no metálicos	Hierro, acero y metales no ferrosos	Industria no específica	Maquinaria y equipo	Construcción	Otros sectores	Sector transporte terrestre	Sector transporte por agua	Sector transporte aéreo	e ^y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
1	1,0932419	0	0,760860984	0,0690654	0,2076379	0,0057139	0,00777414	0,0022916	0,008924639	0,0561861	0,0326375	0,38095508	0,1686245	0,0013206	0,0031829	0,0693347	0,53
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3	0,0501919	0	1,179573242	0,0339375	0,0405623	0,0026174	0,00746708	0,001636	0,004957658	0,0294799	0,0224634	0,14393417	0,1456423	0,0010558	0,0026115	0,0587439	1,04
4	0,0040692	0	0,008147381	1,3523209	0,0670341	0,0021091	0,00122124	0,0009828	0,003686728	0,0843262	0,0192499	0,09780322	0,0284744	0,0005388	0,0008455	0,0238235	0,46
5	0,0052176	0	0,023530471	0,0204019	1,2179188	0,0200883	0,00326097	0,003175	0,00617526	0,070265	0,0379909	0,32299374	0,0381971	0,0005898	0,0014162	0,0306132	0,01
6	0,0102672	0	0,067278274	0,0449141	0,111995	1,0328624	0,01396856	0,0048118	0,015007204	0,0800025	0,1116322	0,30986549	0,258776	0,0022596	0,0062487	0,160197	0,26
7	0,2748266	0	0,416208331	0,4641477	0,7753015	0,0581122	1,26923817	0,052389	0,110601437	1,369846	0,6664249	2,84071479	0,673542	0,0100248	0,0247077	0,5081624	0,73
8	0,0204633	0	0,081407671	0,0233211	0,0457842	0,0034205	0,01318611	1,1468959	0,041096041	0,0741248	0,2014463	13,5357586	0,1380295	0,0018001	0,0072011	0,0775784	0,00
9	0,0304858	0	0,085617409	0,0392891	0,1175264	0,0077035	0,01621257	0,0155313	1,423315533	0,2293419	0,9543489	4,60695796	0,1533399	0,0031574	0,0236702	0,1273811	0,00
10	0,0066414	0	0,030456374	0,0177952	0,0748023	0,002936	0,00522973	0,0036676	0,016442865	1,0839043	0,086824	0,38359019	0,0407265	0,0041052	0,0025494	0,0881454	0,11
11	0,004806	0	0,017480264	0,0170579	0,0300661	0,0032139	0,00404868	0,0057368	0,009044373	0,0385312	1,2381182	0,50372824	0,0905095	0,0020933	0,0288429	0,1030974	0,01
12	0,0004022	0	0,000664342	0,0004948	0,0008066	9,896E-05	9,5657E-05	6,665E-05	0,000179714	0,0009858	0,0008335	1,0186491	0,0051412	6,974E-05	0,0001478	0,0028047	0,11
13	0,0270898	0	0,095417199	0,1039685	0,1780495	0,0189058	0,02083285	0,0124193	0,038082668	0,1622261	0,1707214	1,03488515	1,3338706	0,0092275	0,0231227	0,4856872	1,41
14	0,1997044	0	0,64890581	0,4471455	1,2144212	0,0723627	0,12353148	0,124694	0,160557224	1,15702	1,001914	6,08809416	0,7890676	1,0125713	0,0369468	1,2772683	3,25
15	0,002869	0	0,00638442	0,0048615	0,0106085	0,0008498	0,00131489	0,0009475	0,00174142	0,0101277	0,0092626	0,05610858	0,0367066	0,0051411	1,6285545	0,0182412	0,07
16	0,0004443	0	0,001267821	0,0013995	0,0020282	0,000241	0,00027324	0,0001893	0,000448116	0,0021965	0,0022937	0,010581	0,0092796	7,04E-05	0,0001889	1,0439283	0,00
Total matriz Q	1,7	1,0	3,4	2,6	4,1	1,2	1,5	1,4	1,8	4,4	4,6	31,0	3,9	1,1	1,8	4	

Descripción	Agricultura, silvicultura y pesca	Energía	Alimentos y tabaco	Textiles y cueros	Madera y productos de madera	Papel e impresión	Química y petroquímica	Minerales no metálicos	Hierro, acero y metales no ferrosos	Industria no específica	Maquinaria y equipo	Construcción	Otros sectores	Sector transporte terrestre	Sector transporte por agua	Sector transporte aéreo
C Directo	0,000126528	0	7,70998E-05	9,67834E-05	5,8872E-05	0,000594371	0,000546929	0,000513242	0,000261408	6,1841E-05	6,1172E-05	7,38818E-06	2,2175E-05	0,00094742	0,00029067	2,5537E-05
C Total	0,000220234	0,000105225	0,000266673	0,000259635	0,00024697	0,000734923	0,000819428	0,000713337	0,000487538	0,00028027	0,00028281	0,00023454	8,8729E-05	0,00100931	0,00053236	0,00011062
Ce	1,7	1,0	3,5	2,7	4,2	1,2	1,5	1,4	1,9	4,5	4,6	31,0	4,0	1,1	1,8	4

C= E/Y C*= C/(I-A) Ce= C*/C

1ra. Verificación Ce= i'(I-Q)⁻¹

2da. Verificación E= Ce'e^y= 21

Fuente: Cálculos propios a partir de datos del DANE y la IEA, 2014.

Anexo 3A.6. Matriz Q y pruebas de verificación 2005

No.	Agricultura, silvicultura y pesca 1	Energía 2	Alimentos y tabaco 3	Textiles y cueros 4	Madera y productos de madera 5	Papel e impresión 6	Química y petroquímica 7	Minerales no metálicos 8	Hierro, acero y metales no ferrosos 9	Industria no específica 10	Maquinaria y equipo 11	Construcción 12	Otros sectores 13	Sector transporte terrestre 14	Sector transporte por agua 15	Sector transporte aéreo 16	e ^y
1	1.089293346	0	0.705239855	0.065437495	0.271676122	0.00521729	0.007075411	0.001487862	0.005788131	0.04179926	0.03180644	0.204654233	0.15715592	0.000984	0.00078383	0.0358095	0.51
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
3	0.067399056	0	1.21098328	0.041359435	0.083994699	0.00312422	0.008711622	0.001352898	0.005498774	0.03359986	0.03046938	0.106213904	0.16391197	0.00099706	0.0007963	0.0375343	0.94
4	0.008403856	0	0.011180076	1.412930264	0.195782046	0.003778382	0.001709795	0.00088889	0.005335724	0.08928741	0.03266643	0.093476647	0.04213524	0.0005336	0.00038294	0.01856281	0.38
5	0.003325073	0	0.011619037	0.006521359	1.263620159	0.015232007	0.00215639	0.00149239	0.003977223	0.03811247	0.02289139	0.139310606	0.02369493	0.00024777	0.00024915	0.01102441	0.01
6	0.014953637	0	0.069323433	0.045411039	2.23281542	1.042875092	0.018013821	0.004213808	0.016226653	0.0877393	0.10702949	0.249335057	0.31824516	0.00209681	0.00188813	0.11270376	0.27
7	0.601362256	0	0.715462013	0.645090646	2.700459611	0.107698128	1.550065389	0.062954477	0.191593245	3.32453372	1.53627937	3.975702778	0.96060319	0.01434106	0.01440677	0.48582846	0.11
8	0.025904529	0	0.085029996	0.023863594	0.105099448	0.004332034	0.019668104	1.142272798	0.041086247	0.09835242	0.30139012	12.59899656	0.16868629	0.00171319	0.00297088	0.05735312	0.10
9	0.024462824	0	0.071342326	0.0320638	0.201436884	0.006942082	0.01075927	0.010306554	1.529032129	0.1804471	1.29241892	3.425857229	0.14976675	0.00285597	0.00980324	0.10285166	0.10
10	0.008946858	0	0.036275936	0.018317555	0.218166087	0.004439388	0.006560508	0.002654647	0.025164504	1.0857834	0.12164459	0.425107168	0.04725769	0.00273365	0.00104132	0.0689019	0.08
11	0.005250952	0	0.014961935	0.015295434	0.057204134	0.003304906	0.00308202	0.003607073	0.008860364	0.03084624	1.40361187	0.346022153	0.08954281	0.0021685	0.01032809	0.08767623	0.00
12	0.000473664	0	0.000696377	0.000598297	0.001950359	0.000126383	0.000124946	7.96092E-05	0.000261401	0.00089488	0.0013594	1.015615247	0.00831947	6.7783E-05	5.7386E-05	0.00208577	0.13
13	0.026506208	0	0.072679025	0.082974968	0.272363051	0.018176191	0.016170014	0.008602926	0.036879619	0.12132101	0.18878283	0.655674892	1.34277696	0.00774284	0.00608583	0.26314712	1.18
14	0.228585841	0	0.659455725	0.437533368	1.960285673	0.097863634	0.128903512	0.100746549	0.30229567	0.95715879	1.20609046	4.888655056	0.97317846	1.01021772	0.01211364	0.7807419	3.46
15	0.002679068	0	0.004246204	0.003435321	0.012009808	0.000742503	0.000716206	0.00041812	0.001629612	0.00534556	0.00791811	0.028505288	0.04671735	0.00152535	1.19925838	0.00989979	0.08
16	0.000897922	0	0.001957714	0.002084204	0.006981277	0.00050265	0.00048964	0.000260622	0.000871713	0.00339534	0.00504217	0.014895662	0.0189284	0.00011572	0.00010287	1.05476943	0.01
Total matriz Q	2.1	1.0	3.7	2.8	7.6	1.3	1.8	1.3	2.2	6	6	28.2	4.5	1	1.3	3	

Descripción	Agricultura, silvicultura y pesca 1	Energía 2	Alimentos y tabaco 3	Textiles y cueros 4	Madera y productos de madera 5	Papel e impresión 6	Química y petroquímica 7	Minerales no metálicos 8	Hierro, acero y metales no ferrosos 9	Industria no específica 10	Maquinaria y equipo 11	Construcción 12	Otros sectores 13	Sector transporte terrestre 14	Sector transporte por agua 15	Sector transporte aéreo 16
C Directo	4.02956E-05	0	2.83304E-05	3.6522E-05	1.06889E-05	0.000195136	0.000193344	0.000213693	6.23112E-05	2.0624E-05	1.5777E-05	3.1676E-06	6.6195E-06	0.00029881	0.00028063	1.2153E-05
C Total	8.55072E-05	2.35095E-05	0.000105126	0.000104778	8.32585E-05	0.000257792	0.000344926	0.000289817	0.000137514	0.00012761	0.0001005	9.03874E-05	3.0631E-05	0.00031692	0.00035991	4.187E-05
Ce	2.1	1.0	3.7	2.9	7.8	1.3	1.8	1.4	2.2	6	6	28.5	4.6	1	1.3	3

C= E/Y C*= C'(I-A) Ce= C*/C

1ra. Verificación Ce = $\hat{r}(I-Q)^{-1}$

2da. Verificación E = Ce'e^y = 20.6

Fuente: Cálculos propios a partir de datos del DANE y la IEA, 2014.

Anexo 3A.7. Matriz Q y pruebas de verificación 2010

No.	Agricultura, silvicultura y pesca 1	Energía 2	Alimentos y tabaco 3	Textiles y cueros 4	Madera y productos de madera 5	Papel e impresión 6	Química y petroquímica 7	Minerales no metálicos 8	Hierro, acero y metales no ferrosos 9	Industria no específica 10	Maquinaria y equipo 11	Construcción 12	Otros sectores 13	Sector transporte terrestre 14	Sector transporte por agua 15	Sector transporte aéreo 16	e ^y	
1	1.083307	0	0.9106593	0.06811	0.270724	0.00625	0.01118	0.00189	0.0076605	0.05701	0.03558	0.480734	0.16652	0.00118	0.00077	0.05793	0	0.670
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
3	0.054118	0	1.2221964	0.03356	0.078705	0.00327	0.0113	0.00142	0.0057506	0.03668	0.02724	0.20925	0.13378	0.00093	0.00061	0.0468		0.925
4	0.007235	0	0.0120845	1.33935	0.195472	0.00392	0.001735	0.00084	0.005719	0.097	0.02816	0.172054	0.03133	0.00047	0.0003	0.024		0.396
5	0.002381	0	0.0127662	0.00512	1.269595	0.01701	0.002375	0.00142	0.0040632	0.04167	0.02138	0.266734	0.01892	0.00023	0.00021	0.01508		0.004
6	0.009022	0	0.0671563	0.03165	0.20345	1.04479	0.016513	0.0038	0.0137226	0.07689	0.09411	0.412582	0.22052	0.00167	0.00135	0.11355		0.199
7	0.302609	0	0.5150362	0.40232	2.012177	0.09158	1.452628	0.0497	0.1542432	2.7982	1.06156	5.759235	0.56241	0.01001	0.00922	0.50016		0.288
8	0.013777	0	0.069179	0.01387	0.075429	0.00321	0.017503	1.14802	0.0260079	0.08251	0.21784	20.30124	0.08892	0.00117	0.0019	0.05759		0.0
9	0.012168	0	0.0551095	0.01656	0.123857	0.00516	0.008842	0.00797	1.5000006	0.17162	0.85293	5.767314	0.07768	0.00197	0.00625	0.1229		0.123
10	0.005599	0	0.0350279	0.01336	0.20616	0.00458	0.006609	0.00243	0.0294172	1.08132	0.09898	0.723113	0.0318	0.00228	0.0008	0.08239		0.069
11	0.00322	0	0.0124081	0.01047	0.044776	0.00291	0.00313	0.00326	0.0076641	0.02644	1.35887	0.682071	0.06408	0.00212	0.00973	0.1619		0.0
12	0.000145	0	0.0002692	0.00019	0.000633	4.7E-05	4.68E-05	3E-05	9.408E-05	0.00033	0.00041	1.014497	0.00238	2.6E-05	1.5E-05	0.00093		0.077
13	0.023622	0	0.0917465	0.09092	0.308251	0.02271	0.021358	0.01092	0.0467724	0.15128	0.20148	1.58948	1.34606	0.00881	0.00559	0.40651		1.622
14	0.149975	0	0.6795444	0.35988	1.916222	0.10421	0.133073	0.10067	0.2770945	0.96592	1.02301	9.366721	0.74596	1.01021	0.00953	0.98335		4.293
15	0.002133	0	0.00471	0.0034	0.012324	0.00085	0.000846	0.00046	0.0018182	0.00599	0.00765	0.06198	0.04457	0.00136	1.2534	0.01428		0.099
16	0.000446	0	0.0013476	0.00122	0.004837	0.00034	0.000362	0.0002	0.0006092	0.00252	0.00311	0.021142	0.01074	7.5E-05	5.5E-05	1.04678		0.014
Total matriz Q	1.7	1.0	3.7	2.4	6.7	1.3	1.7	1.3	2.1	5.6	5	31.0	3.5	1	1.3	4		

Descripción	Agricultura, silvicultura y pesca 1	Energía 2	Alimentos y tabaco 3	Textiles y cueros 4	Madera y productos de madera 5	Papel e impresión 6	Química y petroquímica 7	Minerales no metálicos 8	Hierro, acero y metales no ferrosos 9	Industria no específica 10	Maquinaria y equipo 11	Construcción 12	Otros sectores 13	Sector transporte terrestre 14	Sector transporte por agua 15	Sector transporte aéreo 16
C Directo	4.02941E-05	0	2.01458E-05	3.18794E-05	8.67742E-06	0.000137043	0.0001229	0.000135184	3.92019E-05	1.4227E-05	1.3514E-05	1.03736E-06	5.7782E-06	0.00021969	0.00024509	6.5989E-06
C Total	6.77013E-05	1.59832E-05	7.52036E-05	7.71597E-05	6.00544E-05	0.000180756	0.00020885	0.000182648	8.27802E-05	8.106E-05	6.9049E-05	4.93695E-05	2.1071E-05	0.00023247	0.00032456	2.7244E-05
Ce	1.7	1.0	3.7	2.4	6.9	1.3	1.7	1.4	2.1	5.7	5	37.0	3.6	1	1.3	4

C = E/Y C* = C'(I-A) Ce = C*/C

1ra. Verificación Ce = (I-Q)⁻¹

2da. Verificación E = Ce'e^y = 21.28

Fuente: Cálculos propios a partir de datos del DANE y la IEA, 2014.