Dt

DOCUMENTO DE TRABAJO

CRECIMIENTO VERDE EN EL SECTOR ENERGÉTICO Y SUS EFECTOS EN EL DESEMPEÑO ECONÓMICO GENERAL: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO PARA COLOMBIA
01/03/2017
N° 2017/07

CRECIMIENTO VERDE EN EL SECTOR ENERGÉTICO Y SUS EFECTOS EN EL DESEMPEÑO ECONÓMICO GENERAL: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO PARA COLOMBIA

Álvarez, A.
Burgos, J.
Sierra, D.

BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA

Dt

DOCUMENTO DE TRABAJO

BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA

CRECIMIENTO VERDE EN EL SECTOR ENERGÉTICO Y SUS EFECTOS EN EL DESEMPEÑO ECONÓMICO GENERAL: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO PARA COLOMBIA

Álvarez, A.
Burgos, J.
Sierra, D.

CAF - Documento de trabajo N° 2017/07
01/07/2017

RESUMEN

El cambio climático es uno de los mayores retos de la actualidad, siendo un tema de primera línea para los países y gobiernos comprometidos con generar políticas, materializadas en estrategias de desarrollo compatible con el clima. En este contexto, se requieren el surgimiento de nuevas formas de conocimiento, que brinden una perspectiva amplia sobre las consecuencias de la toma de decisiones en los diferentes planos del desarrollo, tomando en cuenta la realidad macro y micro para cada país; para este segundo tipo de escala, y asociado al tema del cambio climático, el sector energético se encuentra en un punto neurálgico, en tanto este/éste es la base para el crecimiento de la economía, pero, a su vez se constituye en el origen de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
En pos de ofrecer un cuadro de la economía y la influencia del sector de generación eléctrica (así como su relación), en un escenario de incorporación de energías no convencionales dentro de la matriz energética nacional para Colombia, se crea y corre un modelo de equilibrio general de naturaleza híbrida, que permite evaluar el efecto de medidas de política enfocadas a la reducción de emisiones de GEI sobre la matriz energética y el impacto sobre variables macroeconómicas. Primordialmente, los resultados de la política de cuota de penetración de energéticos renovables, exponen que se puede incrementar la actividad económica al fomentar la inversión, hay una entrada de energéticos renovables en la matriz energética, no obstante, estos sustituyen la generación hídrica y se mantiene la participación térmica, y, en lo que atañe a la dimensión ambiental, la reducción de GEI no es destacada a menos que se incorpore un precio al carbono sobre los hidrocarburos. En este último caso, se cumple el objetivo ambiental y hay un efecto positivo sobre la economía dependiendo qué usos se les dará el valor recaudado.

Pequeñas secciones del texto, menores a dos párrafos, pueden ser citadas sin autorización explícita siempre que se cite el presente documento. Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y de ninguna manera pueden ser atribuidos a CAF, a los miembros de su Directorio Ejecutivo o a los países que ellos representan. CAF no garantiza la exactitud de los datos incluidos en esta publicación y no se hace responsable en ningún aspecto de las consecuencias que resulten de su utilización.

© 2017 Corporación Andina de Fomento

Crecimiento verde en el sector energético y sus efectos en el desempeño económico general: desarrollo y aplicación de un modelo hibrido para Colombia

Andrés Camilo Álvarez Espinosa [ad], Javier Darío Burgos Salcedo [bd] y Diana Carolina Sierra Cárdenas [cd]

[a] *Economista – Magíster en Economía*
[b] *Biólogo – Magíster en Matemáticas Aplicadas*
[c] *Ecóloga – Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo*
[d] *Corporación para la Investigación y la Innovación CIINAS*

Marzo 1, 2017

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores retos de la actualidad, siendo un tema de primera línea para los países y gobiernos comprometidos con generar políticas, materializadas en estrategias de desarrollo compatible con el clima. En este contexto, se requieren el surgimiento de nuevas formas de conocimiento, que brinden una perspectiva amplia sobre las consecuencias de la toma de decisiones en los diferentes planos del desarrollo, tomando en cuenta la realidad macro y micro para cada país; para este segundo tipo de escala, y asociado al tema del cambio climático, el sector energético se encuentra en un punto neurálgico, en tanto este/éste es la base para el crecimiento de la economía, pero, a su vez se constituye en el origen de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En pos de ofrecer un cuadro de la economía y la influencia del sector de generación eléctrica (así como su relación), en un escenario de incorporación de energías no convencionales dentro de la matriz energética nacional para Colombia, se crea y corre un modelo de equilibrio general de naturaleza híbrida, que permite evaluar el efecto de medidas de política enfocadas a la reducción de emisiones de GEI sobre la matriz energética y el impacto sobre variables macroeconómicas. Primordialmente, los resultados de la política de cuota de penetración de energéticos renovables, exponen que se puede incrementar la actividad económica al fomentar la inversión, hay una entrada de energéticos renovables en la matriz energética, no obstante, estos sustituyen la generación hídrica y se mantiene la participación térmica, y, en lo que atañe a la dimensión ambiental, la reducción de GEI no es destacada a menos que se incorpore un precio al carbono sobre los hidrocarburos. En este último caso, se cumple el objetivo ambiental y hay un efecto positivo sobre la economía dependiendo qué usos se les dará el valor recaudado.

1. Introducción

Diversos países y organismos a nivel mundial hacen esfuerzos y procuran trabajar coordinadamente en favor de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con miras a sortear las consecuencias del cambio climático, en primera instancia, sobre un escenario de aumento de la temperatura cuyo límite no supere los 2 °C y claramente, con miras a evitar los 4°C, o temperaturas superiores, dada la incertidumbre que esto ocasionaría sobre el comportamiento (conocido) del clima y de los ecosistemas (Kuik, Brander, & Richard, 2009).

En este contexto, Colombia no es la excepción, pues en el año 2015 presentó su contribución nacionalmente determinada en la COP21, celebrada en la ciudad de París; donde se propuso una reducción del 20% de las emisiones de GEI para el año 2030 (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), puesto que de no hacer nada, el costo económico futuro para el país podría ser igual al 0,49% de su PIB anual (Álvarez Espinosa, y otros, 2015), proyección que surge de un análisis de los costos económicos asociados al impacto del fenómeno de La Niña (escenario de referencia), ocurrido durante el periodo 2010-2011 que, a pesar de estar relacionado con un ciclo natural asociado a un fenómeno regional, ilustra un escenario extremo de alteración del clima y sus secuelas materiales (DNP-BID, 2014).

En cuanto al panorama de las emisiones, a escala mundial, la quema de combustibles fósiles contribuye en mayor parte a las emisiones de GEI. Pues el uso de estos últimos es generalizado, a gran escala, para la obtención de energía. Por ejemplo, para 2010, el 64% de las emisiones (CO_2) tuvieron su origen en combustibles fósiles y procesos industriales (Olivier, Janssens-Maenhout, Muntean, & Peters, 2016); a nivel sectorial (datos EPA) el 76% de las emisiones de GEI para 2013, provinieron de los sectores de electricidad y calor (25%), industria (21%), transporte (14%), otros tipos de energía (10%) y construcción (6%), para los cuáles la mayoría de sus emisiones (dentro del sector de transporte,

alcanzaron hasta el 95%) provienen de la quema de este tipo de combustibles (United States Environmental Protection Agency, 2015). Igualmente, vale la pena destacar, también para 2013 (datos WRI), que el 72% de las emisiones totales de CO_2e –incluyendo AFOLU– es atribuible al sector energético, teniendo en cuenta que se contrasta con los sectores, industrial, agricultura, residuos, cambio en el uso de la tierra y combustibles "bunker, que aportan el resto (World Resources Institute, 2017).

Ya, para el caso de Colombia, teniendo en cuenta su perfil como país en vías de desarrollo, el porcentaje de emisiones, atribuibles al módulo de energía, corresponden al 44% del total en el año 2012 (más bajo frente a la tendencia mundial). Empero, es posible que en el largo plazo esta participación aumente, considerando las tasas de motorización del parque automotor –en tanto que dentro de este módulo la participación sobre las emisiones por cuenta del transporte es de un 38,3%- (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA, 2015); así como las reservas de carbón térmico existentes en el país y los requerimientos futuros de la demanda de energía asociados a estas, teniendo en cuenta: a) la reducción de importación de carbón a nivel mundial (-6%) por parte de países más destacables en la adquisición de este combustible, como lo son China (un -30% entre 2014-2015) e India (International Energy Agency, 2016); b) los fenómenos extremos asociados a sequías que pueden afectar la fuente principal de energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado –SIN- que primordialmente es de origen hidroeléctrico (Calderón, y otros, 2016), lo que podría (eventualmente) obligar a una activación de las termoeléctricas (base carbón) en el país y c) una carencia de normativa donde se desestimula el uso de carbón, sabiendo que en la última reforma tributaria (Ley 1819/2016) donde se grava el uso de combustibles fósiles con impuesto al carbono, sólo se tienen en cuenta los combustibles líquidos y gaseosos – Parte IX – Impuesto Nacional al Carbono (Congreso de la República, 2016), lo que excluye al carbón y por ende, lleva a pensar en su mayor uso en el mercado energético local en un futuro.

En contraste, en lo que concierne al uso de energías renovables, siendo este un punto neurálgico para la reducción de emisiones, para el año 2014 en el cuadro mundial, el total del suministro total de energía primaria (TPES) fue de 13.700 Mtep, de los cuales el 13,8%, o 1.894 Mtep (+ 2,6% en 2013), fue producido a partir de fuentes de energía renovables. Cabe destacar que dentro de esta categoría, el 72,8% corresponde a energía que tiene origen en biocombustibles, 17,7% es hidroeléctrica y tan sólo el restante 9,6% se reparte entre geotérmica (3,8%), eólica (3,3%) y solar-mareomotriz (2,5%), por lo cual, es evidente el largo camino en la vinculación de energías no convencionales (diferentes de biomasa) a la matriz mundial. Esto, sabiendo que existen casos particulares como la tendencia del aumento en el uso de energía eólica en países Europeos pertenecientes a la OCDE, la producción de electricidad con base en energía geotérmica por parte de Estados Unidos y Nueva Zelanda, y el papel destacado de Alemania, Japón, Italia, Estados Unidos y España (OCDE), en materia de generación de energía solar fotovoltáica (International Energy Agency, 2016) (van der Zwaan (b), y otros, 2016).

A pesar de lo expuesto en el panorama mundial de las renovables (por cuenta de la representatividad frente al total de las demás fuentes), es notable y positivo, el crecimiento que desde 1990 han evidenciado tales, a una tasa media anual de 2,2%, ligeramente superior a la tasa de crecimiento del suministro total de energía primaria (1,9%), siendo especialmente alto para la energía solar fotovoltaica y eólica, que creció a tasas anuales promedio del 46,2% y 24,3% respectivamente, desde sus bases, muy bajas en 1990 (International Energy Agency, 2016).

Para el caso específico de Colombia, la producción de energías renovables ha aumentado modestamente entre los años 1990 y 2014 en un 1,52%, presentando su máxima en 1996 con 8,49 Mtep (International Energy Agency, 2016). Pese a esta tendencia de bajo crecimiento en la producción de renovables, en lo que a producción para el consumo interno se refiere, para 1990 la matriz energética no vinculaba las energías solar y eólica, mientras que para 2013 estas aportaron el 0,06% y los biocombustibles pasaron de un 2% a 6% (en el mismo periodo), frente al total; para 2014 bajaron su participación las energías solar y eólica a un 0,05%. En cuanto a la participación de la energía hidroeléctrica, no ha presentado variaciones sustanciales, pues se ha reducido apenas en un 2% en el periodo 1990 – 2014 (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

De tal manera, teniendo en cuenta la perspectiva (a nivel general) expuesta en el cuadro internacional, así como la escena nacional, en el tema de generación/consumo de energía y emisiones de GEI, es probable que en el país puedan surgir "condiciones favorables" en pro el aumento en las emisiones de GEI y por ende, es indispensable hablar de la promoción y el uso de las fuentes de energía renovables y limpias, "no convencionales", como por ejemplo, solar, eólica, de biomasa y geotérmica, puesto es un aspecto fundamental en las estrategias de crecimiento verde en el mediano y largo plazo (Presidencia de la República de Colombia, 2017) y en el cumplimiento de la meta asumida en la COP21. De esta manera, algunas de las medidas de fomento para el uso de las fuentes renovables no convencionales, e incluso, de eficiencia

energética, pueden tener base en la adopción de instrumentos económicos que a su vez estén en capacidad de impactar otros sectores de la economía, las finanzas públicas y el consumo de los hogares-bienestar (van der Zwaan, Calvin, & Clarke, 2016).

Normalmente, teniendo en cuenta lo expuesto en líneas anteriores y lo importante de materializar escenarios posibles para mitigación de emisiones de GEI, los esfuerzos metodológicos de modelación de medidas de mitigación se han centrado principalmente en el desempeño del sector energético (desde una perspectiva microeconómica). Sin embargo, sería ideal, de forma paralela (o adicional), hacer un abordaje del escenario económico nacional (perspectiva macroeconómica) para visualizar el impacto de estos cambios en el sector en cuestión y viceversa, que es lo que pretende el presente estudio a través del cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Desarrollar un modelo de equilibrio general de naturaleza híbrida, que permita evaluar el efecto de medidas de política enfocadas a la reducción de emisiones de GEI sobre la matriz energética y el impacto sobre variables macroeconómicas.

- Identificar qué instrumentos económicos son efectivos para la penetración de energías renovables no convencionales en la matriz energética del país.

- Determinar el efecto del cambio tecnológico en el sector energético en variables económicas como el PIB, la demanda final, el déficit en cuenta corriente, entre otros.

2. Antecedentes

2.1. Modelos de evaluación

La modelación se ha desarrollado como una herramienta metodológica para predecir o pronosticar, explorar y evaluar las tendencias futuras y la viabilidad de escenarios deseables. En el caso de las medidas de mitigación de GEI, sirven para evaluar e identificar políticas adecuadas que fomenten el desarrollo bajo en carbono (reducir las emisiones de CO_2 por unidad de PIB) y no permitir que la temperatura media global se incremente en 2°C adicionales sobre el promedio de la era pre-industrial.

Los modelos aplicados para el sector energía son catalogados como “modelos Bottom-up”. Estos se basan en perspectivas técnicas y económicas representadas en una caracterización muy detallada de las tecnologías y reflejan el punto de vista de ingeniería o del progreso tecnológico en un horizonte de tiempo entre treinta y cincuenta años, por lo tanto, es usual que estos modelos sean de optimización dinámica (Shukla, 2013).

Sin embargo, estos modelos se centran en el propio sistema de energía y no en la relación con la economía en su conjunto. Pues, tienden a ser optimistas sobre el progreso de la tecnología, empero, no vinculan al sector energía con otros sectores y no capturan el *trade-off* ni efectos de comercio internacional en sus análisis, así mismo los precios resultantes no incorporan retroalimentación alguna.

Ahora, cada país presenta desafíos de desarrollo adicionales, como es el caso de la necesidad de fomentar el empleo, reducir la pobreza y la desigualdad, mantener el crecimiento económico, entre otros. Para analizar estos problemas se usan *“modelos Top-Down”* que son la representación agregada de la toda la economía en conjunto (Shukla, 2013). Este tipo de modelos endogenizan los efectos económicos, carecen de caracterización tecnológica, y en parte, reflejan un pesimismo inherente a los modelos económicos sobre el cambio tecnológico. Tales modelos son adecuados para evaluar el costo económico de políticas orientadas al mercado, como el impuesto sobre el carbono a escala nacional y mundial.

Los modelos *Top-Down* tienen asiento en la teoría del equilibrio general y en la base cuantitativa sólo se consideran los flujos monetarios, mientras se carece de flujos físicos de energía o de otras materias primas. El equilibrio dinámico del modelo ofrece precios de los productos. La desventaja de este tipo de herramientas, es que asumen un mercado perfecto; su soporte cuantitativo tiene piso en comportamientos históricos y dan por sentado que en el futuro esas relaciones se mantendrán de la misma manera. Por ende, hasta el momento, no se ha presentado la posibilidad evaluar el efecto de políticas sobre tecnologías particulares debido a su nivel de agregación.

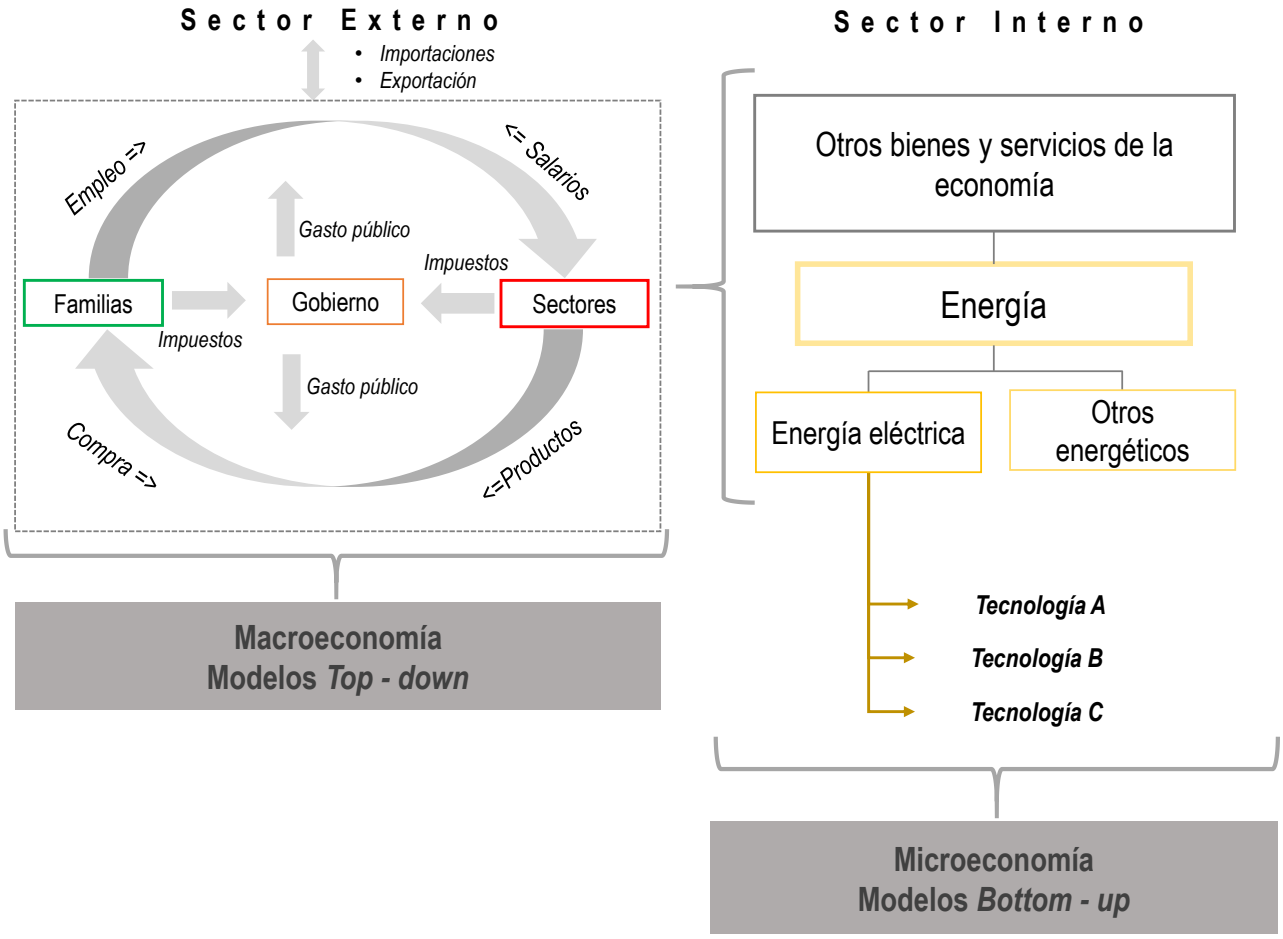
Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, los costos y beneficios de la mitigación en el sector energético, se estiman utilizando estos dos enfoques de forma independiente.

Considerando la desventaja de este tipo de modelos, se propone como agenda de investigación exploratoria, el desarrollo de un "modelo de equilibrio general híbrido" que mantenga la fortaleza de ambos enfoques metodológicos descritos y solucione gran parte de las desventajas de cada uno.

En el presente artículo se emplea la aproximación de Böhringer y Rutherford (2008), quienes combinan ambos tipos de modelación, en pro de crear un modelo híbrido que tiene las ventajas de las dos estrategias para estimar los impactos económicos de las políticas energéticas **(Figura 1)**.

De tal forma, **el argumento central del enfoque de Böhringer y Rutherford (2008) es el soporte del presente trabajo para la creación del modelo híbrido**, donde los mismos concluyen que "… la complementariedad es una característica más que una condición del equilibrio en el modelo Arrow-Debreu. Esta característica de la asignación de equilibrio motiva la formulación de modelos económicos en un formato de complementariedad mixta. Este enfoque permite además la integración directa del análisis de actividad ascendente (Bottom-up) en el que las tecnologías alternativas pueden producir uno o más productos sujetos a restricciones de capacidad orientadas al proceso."

Figura 1. Esquema conceptual – modelo híbrido



2.2. Modelos y evaluación de políticas de mitigación de GEI y su efecto sobre el sistema energético y la economía

2.2.1. Plano internacional

El rápido avance del conocimiento sobre las causas y los impactos del cambio climático, en particular los de índole económica global, demandan para su estudio abordajes alternativos a los de la economía tradicional tal cual como lo planteó hace cerca de una década Maréchal, donde entre sus conclusiones más destacadas hace énfasis en que se requiere "… una mejor comprensión de los factores clave que explican cómo y en qué contexto surge el cambio tecnológico para diseñar adecuadamente las políticas climáticas dirigidas a promover tecnologías amigables con el clima" (Maréchal, 2007), lo que insinúa (por parte del autor) la adaptabilidad de presentar modelos macroecómicos en conjunción con modelos micro (de tipo sectorial) que se relacionen directamente con medidas, acciones, políticas, entre otros, para mitigar emisiones de GEI.

Para poder hacer tales abordajes alternativos, es indispensable revisar cuidadosamente el comportamiento del sistema económico, para lo cual se recurre a los métodos matemáticos, que hacen parte del acervo de la economía actual. En lo que a esto respecto, no poco tiempo después de lo mencionado por Maréchal, surgieron otros estudios en los que se hizo la fusión de modelos computacionales de equilibrio general o modelos " Top-down" y las estrategias de análisis microeconómicos o modelos "Bottom-up", resultando en los denominados modelos "híbridos"; para los cuáles se pueden resaltar trabajos realizados para Estados Unidos, como: *(a)* el primer caso, en el que Wing estructura un modelo híbrido con base en las matrices social (SAM) y energética, en favor de integrar el detalle de la tecnología energética en el marco macroeconómico (Wing, 2008) y *(b)* para el segundo, (Tuladhar, Yuan, Bernstein, Montgomery, & Smith, 2009) se utiliza un modelo más especializado, pero flexible (MRN-NEEM), para examinar los escenarios adicionales que rodean las principales incertidumbres sobre la implementación y el impacto de las políticas de cambio climático, en lo que atañe al papel de las medidas de mando y control, la pérdida de mecanismos de flexibilidad bancaria, los límites de la tecnología de baja emisión y la disponibilidad de compensaciones, cuyos resultados demuestran, consistentemente, que las políticas que combinan los incentivos de reducción, orientados al mercado con una flexibilidad total, son las más rentables.

Igualmente, para Estados Unidos *(c)* Lutsey y Sperling, hacen un análisis para los gobiernos "subnacionales", donde se da un tratamiento con un enfoque que abarca desde las altas instancias de dichos gobiernos (Top-Down), y, puesto que existe falta de certeza en la efectividad de las medidas adoptadas desde este, se analizan escenarios más específicos de mitigación (Bottom-up; ejemplo, normas en emisión de vehículos), donde fue preciso disponer de numerosos datos, entre los que se destacan, las emisiones de GEI, poblacionales, de vehículos, de políticas (entre otros). Posteriormente, se concluye (globalmente) que la política del país era (a la fecha de publicación) muy compleja y de igual forma diversa, en tanto hubo gobiernos en los que se hizo un progreso significativo, mientras en otros, apenas se iba a dar inicio a la implementación de las políticas/acciones para el control de emisiones (Lutsey & Sperling, 2008).

A la par, Böhringer y Rutherford, en el año 2008, presentaron un trabajo en el que formularon el equilibrio del mercado "… como un problema de complementariedad mixta que representa explícitamente las desigualdades débiles y la complementariedad entre las variables de decisión y las condiciones de equilibrio…" por lo cual argumentaron que un "… formato de complementariedad permite a un modelo de energía-economía combinar el detalle tecnológico de un sistema de energía ascendente con una segunda mejor caracterización de la economía global", siendo este tipo de enfoque el punto de apoyo y referencia para autores como Wing (2008) , Tuladhar, Yuan, Bernstein, Montgomery & Smith (2009), e incluso, más recientemente, para Woollacott y Wing (2014; estudio que no sólo abordó el tema de GEI, sino que adicionalmente trató sobre los beneficios en salud pública de la implementación de medidas mitigación, en correspondencia con el descenso de emisiones de gases como NO_x y SO_x) quienes lo usaron de manera extensiva para evaluar la efectividad de las políticas públicas relacionadas con los esfuerzos de mitigación de GEI para países notorios en materia de emisores, como es el caso de China y los Estados Unidos, donde se tuvo en cuenta el planteamiento de escenarios hasta 2050 (Dai, Mischke, Xie, Xie, & Masui, 2016).

De otra parte, el uso del estudio de Böhringer y Rutherford ha permitido analizar los impactos globales de las continuas mejoras tecnológicas en energías alternativas y su conexión con la mitigación de GEI. En este último aspecto, Tapia-Ahumada, Octaviano, Rausch y Pérez-Arriaga (2015), utilizaron el modelo USREP del MIT, para identificar parámetros críticos y supuestos que subyacen en la formulación de equilibrio general con piso en la modelación Top-Down, esto en favor de la incorporación de energías renovables, teniendo como contexto la región de Nueva Inglaterra (Estados Unidos). Para el mismo, merece la pena hacer notable el argumento acerca del que los autores comentan que "… el enfoque de

equilibrio general es altamente sensible a parámetros clave que son a priori típicamente desconocidos o al menos altamente inciertos…", y por ende debe ser mejorado "…para evitar, potencialmente, tergiversar las implicaciones de las políticas climáticas futuras donde presumiblemente las energías renovables podrían participar a gran escala…".

Para el caso de China, Zhang, Karplus y Rausch (2015), usan el modelo base de Böhringer y Rutherford, fundamentalmente con fin parecido al expuesto en líneas anteriores, sin embargo, asumen que el productor de electricidad que utiliza combustibles fósiles representa una parte significativa del costo de las licencias de emisiones; su modelo es estructurado en un formato MCP. De forma similar, otro equipo (Dai, Mischke, Xie, Xie, & Masui, 2016), utiliza, para igual contexto, este tipo de modelo, habiendo armonizado las tendencias económicas y demográficas, así como una vía de impuestos sobre el carbono, y examina cómo ambos modelos (a 2050) responden a estas entradas exógenas idénticas, empleando una metodología de vinculación "suave" para "reducir la brecha" entre los resultados calculados por estos modelos (atribuible al uso de carbón como combustible en un escenario futuro).

A escala global, se presentan estudios que vinculan la opción de un modelo híbrido para el análisis en la mitigación de emisiones. *(a)* En el primer caso, un equipo de investigadores, primariamente europeos (Labriet, y otros, 2015), muestran el acoplamiento del modelo tecnológico TIAM-WORLD y el modelo de equilibrio general GEMINI-E3, con el objeto de visualizar los efectos de una determinada elección tecnológica encarnada en un conjunto de políticas climáticas que pueden impactar al sistema en términos macroeconómicos. *(b)* siguiente, (Cai, Newth, Finnigan, & Gunasekera, 2015), otro equipo (de origen Australiano) incorpora el diseño de la variante CSIRO del modelo de Comercio Global y Medio Ambiente (GTEM-C), siendo este "… un modelo híbrido que combina la representación macroeconómica de arriba a abajo de un modelo computable de equilibrio general, con los detalles de ingeniería de la producción de energía desde abajo hacia arriba. El modelo incluye una contabilidad detallada de los flujos globales de energía que están embebidos en los bienes energéticos comercializados, y ofrece un marco unificado para analizar el nexo entre energía-carbono-entorno".

2.2.2. América Latina

Para el cuadro de América Latina, existen estudios cuyo enfoque es de tipo macroeconómico, principalmente. En este caso se puede poner como máximo exponente el proyecto denominado CLIMACAP-LAMP, completado para el año 2015, desarrollado por equipos de modelación locales con ayuda de asesores de otros países y regiones en el mundo, cuyo objeto central consistió en hacer un ejercicio de comparación enfocado en la energía y la mitigación del cambio climático para América Latina bajo un enfoque de tipo energético-económico, destacando el rol de la región frente al contexto global y a la par haciendo el análisis de casos particulares a nivel país (Argentina, Brasil, Colombia y México, en específico) (Clarke, y otros, 2016) (van der Zwaan, Calvin, & Clarke, 2016).

Para CLIMACAP-LAMP, Fueron utilizados catorce tipos de modelos: ADAGE, E3ME, EPPA, GCAM, IMACLIM-BR, IMAGE, iPETS, LEAP- Argentina, MEG4C, MESSAGE-Brasil, Phoenix, POLES, TIAM-ECN y TIAM-WORLD y el trabajo llevado a cabo resultó en 11 escenarios agrupados en: (1) de referencia (líneas base clima, energía y compromisos políticos); (2) de trayectoria de precios de CO_2 (impuesto al carbono con mínima y máxima tarifa para diferentes años de referencia) y de reducción de emisiones, y de (3) objetivo de forzamiento radiativo (a concentraciones de 450, 55p y 650 ppm, respectivamente) (Clarke, y otros, 2016).

En el caso del contexto general de América Latina, con un enfoque en el potencial de mitigación desde el punto de vista económico, de acuerdo con el proyecto citado, se evidencia que el potencial de reducción (a 2050 teniendo como base 2010) es bajo, puesto que está influenciado por el estatus de la región en materia de desarrollo y su gran contribución se asocia con emisiones de gases diferentes del CO_2, relacionadas, en primera instancia, al uso de la tierra (este último punto clave no es abordado en el estudio citado). Así mismo, se hace énfasis, en que si bien se determina un comportamiento para la zona estudiada, es importante puntualizar el hecho de que las políticas en los diversos países que la conforman, tendrán una amplia variación en los resultados relacionados con dicha meta (Clarke, y otros, 2016).

Lo anteriormente expuesto, denota la necesidad de elaborar abordajes teóricos y modelos matemáticos asociados, que permitan generar escenarios comparables para las diferentes condiciones que se presentan en cada país.

2.2.3. Colombia

En la actualidad, la intensidad de carbono del sistema energético en Colombia es baja en comparación con otros países de América Latina, y al año 2015 la política climática en Colombia estaba en desarrollo y aún no se habían considerado instrumentos económicos como los impuestos y los objetivos de reducción (empero, para diciembre de 2016, la aprobación e implementación de la nueva reforma tributaria –Ley 1819- ha modificado dichas condiciones; además con la COP21 Colombia asumió nuevos compromisos de reducción a 2030). Sin embargo, esta tendencia (aún vigente) de baja intensidad de carbono para el país, puede cambiar debido a la proyección del crecimiento rápido de la economía y al posible aumento del uso de tecnologías basadas en el carbono (Calderón, y otros, 2016), en parte, por cuenta de fenómenos extremos de sequía (por ejemplo El Niño 2015-2016; sabiendo que la matriz energética está dominada por energía hidro) y a carencia de estímulos para el uso de fuentes de energía menos contaminantes (situación patente en la legislación ambiental, económica y tributaria). Por ende, dado este posible aumento en la intensidad, es de suma importancia explorar, desde diferentes ángulos, la introducción de medidas de mitigación de emisiones en el contexto nacional.

En la misma línea de los antecedentes expuestos en el numeral 2.2.2 y en relación con lo mencionado en el párrafo anterior, para Colombia se realizó un trabajo de investigación (Calderón, y otros, 2016), en el marco del proyecto CLIMACAP-LAMP, sobre los escenarios de emisiones de CO_2 y los efectos de la implementación de impuestos al carbono, en conexión con las metas de reducción de emisiones, enfocados en el sistema energético. Para tal fin, se comparan los escenarios de referencia y escenarios de políticas de dos modelos de equilibrio parcial de evaluación integrada, TIAM-ECN y GCAM y dos modelos de equilibrio general, Phoenix y MEG4C, ofreciendo una perspectiva de los futuros desarrollos y dinámicas del sistema energético colombiano.

El estudio esboza cómo los impuestos o las metas de reducción pueden lograr reducciones significativas de emisiones de CO_2 en Colombia, aunque estas pueden lograrse a través de diferentes vías, donde se promueva la entrada de fuentes de energía más limpias en el mercado y la reducción en la demanda final de energía mediante mejoras en la eficiencia energética (entre otras respuestas de la demanda). El análisis expone que es probable que los impuestos sobre el carbono tengan impactos significativos en toda la economía, ya que los modelos muestran que el PIB en el escenario fiscal podría ser menor que en el escenario base entre un 2% y un 3%. Por lo tanto, el diseño de una política climática integral que incluya impuestos, objetivos u otros instrumentos de política, debe incluir una evaluación de los costos y beneficios de estos instrumentos. (Calderón, y otros, 2016).

De tal forma, el sector de la energía eléctrica juega un papel importante en la reducción de las emisiones de CO_2 en Colombia, esto mediante el aumento de la energía hidroeléctrica, la introducción de tecnologías para viento y en el despliegue de captura y almacenamiento de CO_2 (CCS) para el uso de biomasa, carbón y gas natural. Este documento también evalúa las implicaciones de toda la economía de las políticas de mitigación, tales como las pérdidas potenciales en el PIB y el consumo. Una evaluación de los aspectos legales, institucionales y las barreras ambientales a las políticas de mitigación de toda la economía es crítica, pero este último aspecto no alcanza a ser cubierto por el estudio respectivo (Calderón, y otros, 2016).

2.3. Estrategia metodológica

La base conceptual del presente trabajo se encuentra en el artículo seminal desarrollado por Böhringer y Rutherford (2008) sobre el cual se plantean los siguientes objetivos específicos adicionales:

- Incorporar el componente de comercio internacional en la estructura de demanda de bienes. Esto es importante para Colombia ya que se cuentan con reservas de carbón en el largo plazo, así como gas y petróleo en el corto plazo, lo cual implica una fuente importante de divisas y rentas para el gobierno nacional.

- Calibrar el arquetipo de producción, de demanda final, comercio exterior, y gobierno del modelo propuesto con datos exclusivos para el caso colombiano.

- Incorporar el potencial de energía renovable no convencional del país con sus respectivos costos producción.

- Elaborar simulaciones de política económica de acuerdo a las capacidades del modelo. Se puede evaluar el efecto sobre la economía en general y la matriz energética de medidas tales como:

- Impuesto al carbono.
- Límite a las emisiones y comercio de las mismas.
- Subsidios del estado energía renovable no convencional.

La base cuantitativa y la calibración de parámetros se desarrollan con información del país, usando datos disponibles por parte de fuentes oficiales como la matriz de contabilidad social elaborada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), el balance energético de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la información tecnológica del modelo JEDI (National Renewable Energy Laboratory, 2015) y el modelo de equilibrio general de Perdomo-Strauch (Perdomo Strauch, 2008).

3. Marco teórico

El modelo híbrido de Böhringer y Rutherford (2008) considera un único bien no energético producido bajo retornos constantes usando como insumos trabajo, capital y energía. Este último toma en cuenta electricidad y tres combustibles fósiles a saber, petróleo, carbón y gas natural, los cuales se producen siguiendo retornos decrecientes con respecto a la escala de producción.

La demanda de consumo final incluye bienes no energéticos, electricidad y otros energéticos, para hacer más entendible el modelo; inicialmente no se consideran los impuestos o provisión de bienes públicos en la economía.

Siguiendo la estructura del modelo básico de Arrow-Abreu, se denotan las variables de decisión del modelo y se definen tomando en cuenta tres nociones: los niveles de actividad, los precios de mercado y los niveles de ingreso, de la siguiente manera:

Para los niveles de actividad se tiene:

Y producción del bien no energético
X_f provisión del combustible fósil
ELE_t producción de electricidad por tecnología t
C composición final del consumo
W utilidad

Con relación a los precios de mercado, se tienen las siguientes variables:

P_y precio del bien no energético
P_c precio final de consumo compuesto
P_{ELE} precio de la electricidad
P_f precio del combustible fósil f
P_L precio del trabajo o labor
r_K precio de renta del capital
P_W índice de utilidad de precios
u_t precio sombra de la capacidad de generación
r_f tasas de renta sobre los recursos de combustible fósiles f

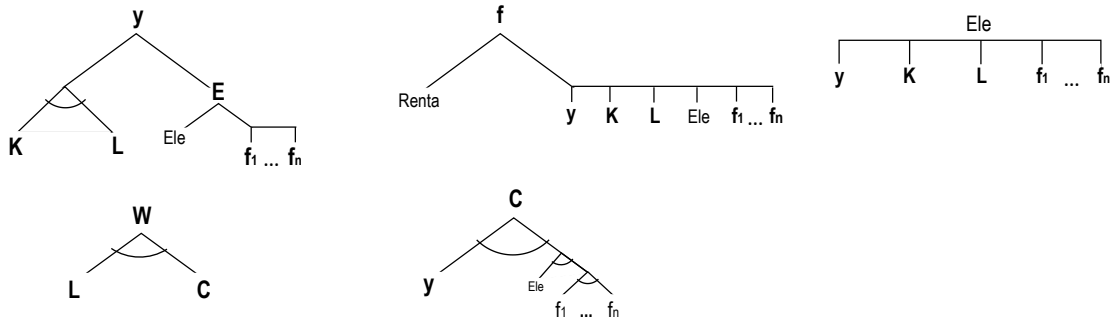
Finalmente, con relación a los niveles de ingreso se tiene:

M perfil de ingresos del hogar representativo

3.1. El modelo estático

En esta sección, el arquetipo o la función de producción de cada uno de los bienes de la economía, se evidencia en la **Figura 2**). De forma general, cada bien de la economía (Y, Ele, f_1) incorpora los factores de producción tradicionales (capital –K-y trabajo –L-) junto con el consumo intermedio de los demás bienes (Y, Ele, f_1), que para cada caso en particular adoptará una tecnología característica.

Figura 2. Arquetipo de producción (esquemas)



Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de la producción, las empresas suelen minimizar sus costos tomando en cuenta funciones de elasticidad en la sustitución CES que describen el uso, dependiente de los precios de los factores y las entradas intermedias. En la producción de bienes no energéticos, la elasticidad de sustitución en el comercio de los combustibles fósiles se toma como constante. La función de lucro unitario de la producción masiva de bienes es la siguiente:

$$\prod^{Y} = P_Y - \left\{ \theta^{KL} \left(P_L^{\theta_l} r_K^{1-\theta_L} \right)^{1-\sigma_Y} + (1-\theta_{KL}) * \left(\frac{P_{ELE}^{\theta^{ELE}} \left(\sum_f \theta_f^Y p^{1-\sigma_E} \right)^{1-\sigma_{ELE}}}{1-\sigma_E} \right)^{1-\sigma_Y} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_Y}}$$

Dónde,

θKL	costo compartido del valor agregado en la producción
θ_L	precio final de consumo compuesto
θELE	valor de la electricidad dentro de la demanda de producción de la energía agregada
$\theta_f Y$	costo del combustible fósil *f* dentro de la energía no eléctrica de producción
σ_Y	elasticidad de sustitución del compuesto de valor agregado y la energía en la producción
σ_E	elasticidad de la sustitución entre electricidad y la energía no eléctrica en la producción
Y	variable asociada complementaria

Los combustibles fósiles son producidos con un recurso específico y un “no-recurso” compuesto con una elasticidad constante de sustitución. La función de lucro unitario para la producción de combustible fósil es:

$$\prod_f^F = p_f - \left\{ \theta_f^R r_f^{1-\sigma_f} + \left(1-\theta_f^R\right) \left(\theta_f^L p_L + \theta_f^K r_K + \theta_f^Y p_Y + \theta_f^{ELE} p_{ELE} + \sum_{ff} \theta_{ff}^f \right)^{1-\sigma_f} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_f}}$$

Dónde,

θ_C	representa la cuota de gasto de no-energía
θ_{ELE}^C	valor de la electricidad en la cuota de energía demandada
θ_f^C	valor de la cuota de combustible fósil dentro de la demanda de energía no eléctrica
σ_C	elasticidad
σ_{ELE}^C	elasticidad compensada entre energía eléctrica y no-eléctrica en la demanda final
C	variable asociada complementaria

La demanda de consumo final se combina con el ocio a una elasticidad constante de sustitución para formar un bien de utilidad agregada. La función de lucro unitario para la utilidad agregada se escribe de la manera a continuación expuesta:

$$\prod^{W} = p_W - \left\{ \theta_W p_L^{1-\sigma_W} + (1-\theta_W) p_C^{1-\sigma^W} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_W}}$$

Dónde,

θ_W representa el valor de ocio compartido de la utilidad agregada
σ_W elasticidad compensada entre ocio y consumo final
W variable asociada complementaria

En el modelo propuesto, el hogar representativo está dotado con factores primarios como trabajo, capital y recursos para la producción de combustibles fósiles. El hogar representativo maximiza su utilidad a partir del ingreso disponible. El ingreso total del hogar consiste de factores de pago y rentas de escasez sobre las restricciones de capacidad, siendo su función la siguiente:

$$M = p_L \overline{Z} + r_K \overline{K} + \sum_f r_f \overline{R}_t + \sum_t u_t \overline{E}_t$$

Dónde,

$\overline{Z}$ representa el empoderamiento con el tiempo
$\overline{K}$ representa el empoderamiento de capital agregado
$\overline{R}_f$ representa el empoderamiento de recursos dl combustible fósil *f*
$\overline{E}_t$ denota la capacidad de generación para la tecnología *t*

Los precios flexibles sobre los mercados competitivos por factores y bienes aseguran el balance entre oferta y demanda. Empleando el lema de Hotelling, es posible derivar las funciones de bienes y factores como se expone líneas abajo:
Para las condiciones de despeje de mercado para la economía definida en el marco teórico, se tiene para el mercado de trabajo:

$$\overline{Z} - \frac{\partial \prod^W}{\partial p_L} W \geq \frac{\partial \prod^Y}{\partial p_L} Y + \sum_f \frac{\partial \prod^F}{\partial p_L} x_f + \sum_t a_t^L E_t$$

Donde p_L es la variable asociada complementaria.

En lo que respecta al despeje del capital de mercado:

$$\overline{K} \geq \frac{\partial \prod^Y}{\partial r_K} Y + \sum_f \frac{\partial \prod^F}{\partial r_K} x_f + \sum_t a_t^K E_t$$

Donde r_K es la variable complementaria asociada.

Con relación al despeje del mercado para los recursos combustibles fósiles:

$$\overline{R}_f \geq \frac{\partial \prod_f^F}{\partial r_f} X_f$$

Donde r_f es la variable asociada complementaria.

Con relación al despeje a la capacidad de generación de electricidad:

$$\mu t \overline{Et} \geq Et$$

Donde μ_t es la variable asociada complementaria.

En lo que respecta al despeje para los macro bienes no energéticos, se tiene:

$$Y \geq \sum_f \frac{\partial \prod^F}{\partial p_Y} x_f + \sum_t a_t^Y E_t + \frac{\partial \prod^C}{\partial p_Y} C$$

Donde p_Y es la variable asociada complementaria.

Para el despeje de mercado para combustibles fósiles:

$$X_f \geq \frac{\partial \prod_Y}{\partial p_f} Y + \sum_{ff \neq f} \frac{\partial \prod_F}{\partial p_f f} x_{ff} + \sum_t a_{ft}^F E_t + \frac{\partial \prod^C}{\partial p_f} C$$

Donde p_f es la variable complementaria asociada.

Para el despeje de mercado para la electricidad:

$$\sum_t X_t \geq \frac{\partial \prod^Y}{\partial p_{PELE}} Y + \sum_f \frac{\partial \prod^F}{\partial p_{ELE}} x_f + \frac{\partial \prod^C}{\partial p_{ELE}} C$$

Donde p_{ELE} es la variable asociada complementaria.

Ahora bien, con relación al despeje de mercado para el consumo final compuesto:

$$C \geq \frac{\partial \prod^W}{\partial p_C}$$

Donde p_C es la variable complementaria asociada.

Finalmente, con relación al despeje de mercado del bien agregado de utilidad:

$$W \geq \frac{M}{p_W}$$

Donde p_W es la variable complementaria asociada.

3.2. Extensión dinámica del modelo

Las políticas del sector energético pueden alterar sustancialmente los incentivos para inversión y ahorro. La evaluación de ajustes y efectos de equilibrio a largo plazo, inducidos por las regulaciones, requieren de una extensión dinámica del modelo propuesto.

El modelamiento dinámico requiere asumir cierto grado de visión prospectiva sobre los agentes económicos. En un modelo determinístico, una aproximación es la de asumir que los agentes en el modelo conocen tanto del futuro como lo hace el modelador: las expectativas de los agentes sobre los precios futuros corresponden a valores obtenidos por simulación. Dentro del modelo estándar de (Ramsey, 1928) de ahorros e inversiones, la noción de prospectiva perfecta se acopla con premisa de un agente de vida infinita, quien hace escogencias explícitas dentro de un margen de consumo que toma en cuenta tanto a las actuales como a las futuras generaciones. El agente maximiza su bienestar estando sujeto a restricciones intertemporales del presupuesto. Las tasas de ahorro igualan a los retornos marginales sobre la inversión y al costo marginal de la formación de capital. Las tasas de retorno se determinan de tal manera que la productividad marginal de una unidad de inversión y la utilidad marginal del consumo se igualan.

Para convertir el modelo estático en uno dinámico se requiere de unas pocas modificaciones: la formación del stock de capital e inversión, la colocación eficiente del capital (ej. inversiones en el tiempo) implica dos condiciones centrales de beneficio nulo, que se relacionan con el costo por unidad de inversión, el retorno de capital y el precio de compra de una unidad de stock de capital en un periodo τ.

En primer lugar, en equilibrio, el valor de mercado de una unidad de capital depreciado, comprado al inicio del periodo τ no puede ser menor que el valor de renta del capital a través del periodo y el valor de una unidad de capital vendido al inicio del periodo subsiguiente- condición de beneficio nulo de la formación de capital:

$$-\prod_\tau^K = p_\tau^K - (1-\delta)\, p_{\tau+1}^K \geq 0$$

En segundo lugar, la oportunidad de llevar a cabo inversiones en el año τ limita los precios de mercado del capital en el periodo τ +1 - condición de beneficio nulo de la inversión:

$$-\prod_\tau^I = -p_{\tau+1}^K + p_\tau^Y \geq 0$$

Además, el capital evoluciona de manera geométrica con respecto a la inversión y a la depreciación:

$$K_{i,\tau+1} = (1-\delta) K_{i,\tau} + I_{i,\tau}$$

Finalmente, las salidas de mercado en el modelo dinámico deben tomar en cuenta la demanda intermedia, la demanda de consumo final y la inversión final:

$$Y \geq \sum_f \frac{\partial \prod^F}{\partial p_Y} x_f + \sum_t a_t^Y E_t + \frac{\partial \prod^C}{\partial p_Y} C + I_\tau$$

Las anteriores ecuaciones han introducido tres variables adicionales, a saber:

p_τ^K es el valor de una unidad de stock de capital en el periodo τ
K_τ es la variable dual asociada que indica los niveles de stock de capital I_f variable que indica la actividad de la inversión agregada en τ

En el modelo dinámico las respuestas de la demanda surgen a partir del comportamiento decisorio consistente con la maximización del agente de vida infinita. Los consumidores asignan sus ganancias durante toda su vida, para poder maximizar su utilidad, resolviendo:

$$max \sum_\tau \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^\tau u\left(C_\tau\right)$$

Sujeto a:

$$\sum_\tau p_\tau^C C_\tau = M$$

Donde,

u denota la función de utilidad instantánea del agente
ρ es la tasa de tiempo preferencial
M ingreso durante el periodo de vida

Con la utilidad isoelástica durante el periodo de vida de la función de utilidad instantánea:

$$u\left(C\right) = \frac{c^{1-\frac{1}{\eta}}}{1-\frac{1}{\eta}}$$

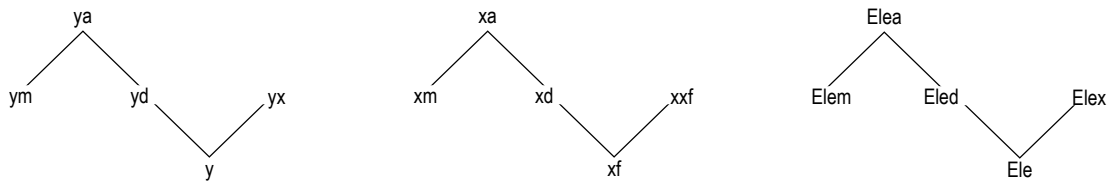
Donde η representa una constante intertemporal de elasticidad de sustitución.

3.3. Componente de comercio exterior

Tomando como base el modelo híbrido antes expuesto, el presente estudio incorpora el componente de comercio exterior, considerando venta doméstica, exportaciones e importaciones de energía (y demás bienes y servicios producidos), el cual no suele ser considerado en los diversos estudios que emplean aproximaciones Top-down y Bottom-up (BU, para Bottom-up) para generar escenarios de cambio climático conectados con los impactos de las políticas de mitigación de la producción de GEI, bien sea a escala regional o global.

El componente propuesto considera una resolución, mediante programación de complementariedad mixta, siendo esta, "… una característica más que una condición del equilibrio en el modelo Arrow-Debreu…" (Böhringer & Rutherford, 2008). De esta manera, se expone, el componente de venta doméstica y exportaciones, bajo condiciones de cero beneficios y vaciado de mercado. En segundo eslabón, se considera el componente de venta doméstica e importaciones, también bajo condiciones de cero beneficios y vaciado de mercado (**Figura 3**). El componente de comercio exterior incluye las ecuaciones de balance (ingresos-egresos) y la ecuación de cuenta corriente de la economía.

Figura 3. Funciones de transformación de elasticidad contante (CET, siglas en Inglés) y Armington



Fuente: Fuente: Elaboración propia con base en (van der Mensbrugghe, 2008)

Esto implica la necesidad de definir nuevos bienes producidos por la economía, con características que sean exportables o importados, de acuerdo a las funciones de comercio exterior.

Yx producción del bien no energético exportado
Xx_f provisión del combustible fósil exportado
ELEx producción de electricidad exportada

Yd producción del bien no energético destinado a consumo interno
Xd_f provisión del combustible fósil destinado a consumo interno
ELEd producción de electricidad destinada a consumo interno

Ym bien no energético importado
Xm_f combustible fósil importado
ELEm electricidad importada

Ya bien no energético para demanda final
Xa_f combustible fósil para demanda final
ELEa electricidad para demanda final

Así como las funciones descritas en el **numeral 3.1**, para este componente de comercio exterior se requieren un conjunto de parámetros adicionales, los cuales corresponden a la calibración de las funciones CET y Armington (ver **Figura 4**).

Figura 4. Parámetros adicionales – componente comercio exterior

Exportaciones

Parámetros Calibrados	Escalar	Variables	Variables exógenas
$Ø_{xy}$	σ_x	p_{xy}	PW_{Xy}
$Ø_{xxf}$	σ_{xxf}	p_{xxf}	PW_{Xxf}
$Ø_{xele}$	σ_{xele}	p_{xele}	PW_{XELE}

Importaciones

Parámetros Calibrados	Escalar	Variables	Variables exógenas
$Ø_{my}$	σ_m	p_{my}	PW_{My}
$Ø_{mxf}$	σ_{mxf}	p_{mxf}	PW_{Mxf}
$Ø_{mele}$	σ_{mele}	p_{mele}	PW_{MELE}

Otras variables

Variables	Variables exógenas
p_{ay}	TC
p_{axf}	fsav
p_{aele}	

Fuente: Elaboración propia con base en modelo (Böhringer & Rutherford, 2008)

3.3.1. Venta doméstica y exportaciones: cero beneficios

El conjunto de ecuaciones para las condiciones de cero beneficios bajo escenario de venta doméstica y exportaciones son las siguientes:

$$\Pi_y^d = P_y - \left[\beta_x P_{xy}^{1-\sigma_{xy}} + (1-\beta_x)\, p_{dy}^{1-\sigma_{xy}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{xy})}} ;\ yd \geq 0$$

$$\Pi_{ele}^d = P_{ele} - \left[\beta_{ele} P_{xele}^{1-\sigma_{xele}} + (1-\beta_{ele})\, P_{dele}^{1-\sigma_{xele}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{yele})}} ;\ eled \geq 0$$

$$\Pi_f^d = P_f - \left[\beta_{xff} P_{xff}^{1-\sigma_{xff}} + (1-\beta_{xff})\, P_{dff}^{1-\sigma_{xff}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{xff})}} ;\ xd \geq 0$$

$$P_{xy} = \overline{PW_{xy}} tc\,(1+ty)\,; P_{xy} \geq 0$$

$$P_{xele} = \overline{PW_{xele}} tc\,(1+t_{ele})\,; P_{xele} \geq 0$$

$$P_{xff} = \overline{PW_{xff}} tc\,(1+t_{xf})\,; P_{xff} \geq 0$$

3.3.2. Venta doméstica y exportaciones: vaciado de mercado

Para la condición de vaciado de mercado, se proponen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Y_x}{Y_d} \geq \left(\frac{P_{xy}}{P_{dy}}\right)^{\sigma_{xy}} \left(\frac{1-\beta_x}{\beta_x}\right)^{\sigma_{xy}} ; Y_x \geq 0$$

$$\frac{\sum_t Elex_t}{\sum_t Eled_t} \geq \left[\left(\frac{P_{xele}}{P_{dele}}\right)\left(\frac{1-\beta_{ele}}{\beta_{ele}}\right)\right]^{\sigma_{xele}} ; Elex_t \geq 0$$

$$\frac{X_{xff}}{X_{dff}} \geq \left(\frac{P_{xff}}{P_{dff}}\right)\left(\frac{1-\beta_{xff}}{\beta_{xff}}\right)^{\sigma_{xff}} ; X_{xff} \geq 0$$

3.3.3. Venta doméstica e importaciones: cero beneficios

En lo que respecta al escenario de venta doméstica e importaciones, el conjunto de ecuaciones correspondiente a la condición de cero beneficios, es expuesto a continuación:

$$\Pi_y^a = P_{ay} - \left[\theta_m P_{my}^{1-\theta_{my}} + (1-\theta_{my})\, P_{dy}^{1-\sigma_{my}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{my})}} ;\ Y_a \geq 0$$

$$\Pi_{ele}^a = P_{aele} - \left[\theta_{mele} P_{mele}^{1-\sigma_{mele}} + (1-\theta_{mele})\, P_{dele}^{1-\sigma_{mele}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{mele})}} ;\ elea \geq 0$$

$$\Pi_f^a = P_{af} - \left[\theta_{mff} P_{mff}^{1-\sigma_{mff}} + (1-\theta_{mff})\, P_{dff}^{1-\sigma_{mff}}\right]^{\frac{1}{(1-\sigma_{mff})}} ;\ X_{aff} \geq 0$$

$$P_{my} = \overline{PW_{my}} tc\,(1+t_{my})\,; P_{my} \geq 0$$

$$P_{mele} = \overline{PW_{mele}} tc\,(1+t_{mele})\,; P_{mele} \geq 0$$

$$P_{mff} = \overline{PW_{mff}} tc\,(1+t_{mff})\,; P_{mff} \geq 0$$

3.3.4. Venta doméstica e importaciones: vaciado de mercado

$$\frac{Y_m}{Y_d} \geq \left[\left(\frac{P_{dy}}{P_{my}}\right)\left(\frac{\theta_{my}}{1-\theta_{my}}\right)\right]^{\sigma_{my}}; Y_m \geq 0$$

$$\frac{\sum_t Ele_{mt}}{\sum_t Ele_{dt}} \geq \left[\left(\frac{P_{dele}}{P_{mele}}\right)\left(\frac{\theta_{mele}}{1-\theta_{mele}}\right)\right]^{\sigma_{mele}}; Elem \geq 0$$

$$\frac{X_{mff}}{X_{dff}} \geq \left(\frac{P_{dff}}{P_{mff}}\right)\left(\frac{\theta_{mff}}{1-\theta_{mff}}\right)^{\sigma_{mff}}; X_{mff} \geq 0$$

3.3.5. Ecuaciones de balance y de cuenta corriente

Las ecuaciones de balance corresponden a:

$$P_{my}Y_m + P_{dy}Y_d = P_{ay}Y_a; P_{ay} \geq 0$$

$$\sum_t P_{mele}Elem_t + \sum_t P_{dele}Ele_{dt} = \sum_t P_{aele}Ele_{at}; P_{aele} \geq 0$$

$$P_{mff}Y_{mff} + P_{dff}X_{dff} = P_{aff}X_{aff}; P_{aff} \geq 0$$

Finalmente, la ecuación de cuenta corriente es:

$$\left[P_{my}Y_m + \sum_t P_{elem} + \sum_{ff} P_{mff}X_{mff}\right] - tc\left[P_{xy}Y_x + \sum_t Elex_t P_{elex} + \sum_{ff} P_{xff}X_{xff}\right] - \overline{F}_{sav} = 0$$

4. Datos de país y calibración

Con el fin de realizar las simulaciones para el caso colombiano, se debe calibrar el modelo con información de país. En esta sección se describe la construcción de la matriz de contabilidad social, los costos agregados de los tipos de tecnología de generación eléctrica, y se mencionan otros parámetros estructurales que replican un escenario base:

4.1. Matriz de contabilidad social

Una matriz de contabilidad social (MCS) es una forma organizada de describir el conjunto de transacciones económicas realizadas en toda la economía durante un periodo de tiempo. La MCS permite la visualización del flujo circular del dinero mediante un arreglo lógico en la que se busca dar una lectura fácil de los vínculos entre las industrias, los factores de producción, los hogares y el gobierno (Burfisher, 2011) (Corredor & Pardo, 2008).

En Colombia se han realizado MCS para los años 1980 y 1985 (Cordi, La Matriz de Contabilidad Social. Deducción de los multiplicadores de contabilidad y su aplicación al caso colombiano en 1985., 1988), 1992 (Gutiérrez & Valderrama, 1996) y para los años 2003, 2004 y 2005 (Corredor & Pardo, 2008). Otros trabajos específicos de MCS aplicados a Colombia se han enfocado en realizar una desagregación regional (Cordi, 1999) incorporando el sistema financiero dentro de su estructura (Ramírez & Prada, 2000), con informalidad laboral (Céspedes, 2011), o con un ´énfasis en políticas de seguridad social en salud (Ramírez, Yepes, & Karl, 2000) o incorporando el recurso hídrico (Álvarez, Romero, Riveros, Melo, & Ordoñez, 2016)

Las principales funciones de las MCS son una herramienta analítica que captura la estructura económica para un año en particular, lo cual permite el análisis de multiplicadores y de productividad sectorial; y el ser una base cuantitativa para la construcción de los modelos económicos de equilibrio general. Para el caso específico del modelo presentado en la **sección 3** se elaborará una MCS con desagregación en bienes energéticos. Para el caso de Colombia la MCS se

construye a partir de cuatro componentes del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN): Matriz de oferta, Matriz de utilización, Cuentas económicas integrales, Cuentas ambientales económicas de energía y emisiones.

4.1.1. Matriz de oferta

La matriz de oferta (MO) muestra los componentes que genera la oferta total de cada bien. La oferta es compuesta por las importaciones (a precios CIF), la producción a precios de productor, los impuestos menos subvenciones a los productos, los impuestos y derechos a las importaciones, los márgenes de transporte y los márgenes comerciales.

4.1.2. Matriz utilización

La matriz de utilización (MU) detalla las demandas por cada una de las mercancías con clasificación en el sistema económico (CIIU 3.1) (DANE, 2006). Vale la pena señalar que un producto puede ser demandado como consumo intermedio, demanda final, ser exportado o asignado a la inversión. La MU también indica las fuentes del valor agregado requeridas por cada actividad (la remuneración de los asalariados, los impuestos y subvenciones a la producción, el ingreso mixto y excedente bruto de explotación).

4.1.3. Cuentas económicas integradas

Las cuentas económicas integradas (CEI) organizan la información en la cual se integran las cuentas de los sectores institucionales, las cuentas del resto del mundo y la cuenta de bienes y servicios (DANE, 2015). En las columnas de CEI aparecen las cuentas de los sectores institucionales.

4.1.4. Cuentas ambientales económicas de energía y emisiones

La Cuenta Ambiental y Económica de Energía (SCAE-Energía) (DANE, 2017) proporciona un marco para la evaluación de la generación y el consumo de energía. En la cuenta se consideran los flujos de insumos naturales (flujos del ambiente a la economía), flujos de productos de energía (en la economía) y flujos de residuos de energía (de la economía al ambiente). A diferencia del balance energético nacional, la información del SCAE-Energía está homologada a la estructura del sistema de cuentas nacionales. De esta forma garantizando que la información económica agregada sea uniforme por construcción.

A partir de los insumos indicados se adecua la MCS como base cuantitativa del modelo representado en la **sección 3**. La MCS se presenta en formato de flujos de ingresos o producción bruta de cada sector (valores positivos en la diagonal) y costos (valores negativos) de los agentes económicos (representados en cada columna). Las filas indican la mercancía que están pagando (ver **Tabla 1**).

Por ejemplo, la producción bruta del sector carbón fue de 10,65 billones de pesos colombianos, de los cuales 6,82 corresponden al pago o retribución a los propietarios de las rentas del recurso y 2,25 billones al pago de mercancías diferentes a bienes energéticos.

Tabla 1. Matriz de contabilidad social – Colombia 2010 (cifras en billones de pesos colombianos)

		Sectores económicos					
		Bienes no energéticos (Y)	Carbón (Coal)	Petróleo y derivados (Oil)	Electricidad (Ele)	Gas natural (Gas)	Consumo
Mercancías	Bienes no energéticos (Y)	450,99	-2,25	-6,84	-5,01	-1,77	-435,11
	Carbón (Coal)	-0,15	10,65	-0,14	-0,15	0,00	-10,21
	Petróleo y derivados (Oil)	-18,16	-0,15	48,47	-0,03	-0,01	-30,12
	Electricidad (Ele)	-8,43	-0,05	-0,10	15,91	-0,01	-7,32
	Gas natural (Gas)	-1,46	0,00	-0,45	-0,40	4,59	-2,29
	Trabajo	-293,53	-1,38	-2,78	0,00	-0,38	298,07
	Capital	-129,25	0,00	0,00	-10,32	0,00	139,57
	Renta	0,00	-6,82	-38,17	0,00	-2,43	47,42

Fuente: Elaboración propia a partir del sistema de cuentas nacionales (DANE, 2015)

A partir de la construcción de la MCS, se puede tener un panorama general de la estructura económica de Colombia (ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Composición del PIB – agregados macroeconómicos

Pago factores	486.892	89%
Impuestos indirectos	53.274	10%
Aranceles	4.758	1%
PIB	544.924	100%

Consumo	434.319	80%
Privado	*343.666*	*63%*
Público	*90.653*	*17%*
Inversión	120.571	22%
Exportaciones	86.955	16%
Importaciones	(96.921)	-18%
PIB	544.924	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de la **Tabla 1**

La cuenta corriente, en el año 2010 tiene un déficit de 2% y el gasto público o de gobierno central corresponde al 17% del PIB. Por otro lado, la inversión como proporción del PIB es del 22%. En cuanto a la participación sectorial, los sectores energéticos representan el 13% del PIB (ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Composición del PIB – Sectores económicos

Carbón	2%
Petróleo	5%
Refinados de petróleo	3%
Electricidad	2%
Gas natural	1%
Otros bienes	87%
PIB	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de **Tabla 1**

4.2. Costos de generación eléctrica

El otro conjunto de información relevante y necesaria para realizar las simulaciones con el modelo propuesto, atañe a los costos agregados de generación de las nuevas tecnologías. Pero, dicha información no hace parte del sistema de cuentas nacionales dado que en la actualidad no existen tales tecnologías en la matriz de generación; de tal manera que estos costos son incorporados en las mercancías agregadas a nivel macroeconómico. En esta sección se describen los escenarios de estructura de costos y valor de generación de electricidad a partir de las nuevas tecnologías disponibles. (Ver **Tabla 4**).

Para obtener la estructura de costos de las tecnologías evaluadas se tomó la información a nivel de *proyecto tipo* de generación de diversas tecnologías (NREL, 2016; Lazard, 2014). Los costos de los proyectos se agregaron en los tres productos del modelo, tal como se expone a continuación: el consumo intermedio se agregó como bienes no energéticos, el costo de los equipos y financiamiento en capital; finalmente, el costo de personal y demás asociados en trabajo.

En concordancia con lo esbozado en líneas anteriores, se construyen tres escenarios de estructura de costos, que se describen en el

Cuadro 1.

Cuadro 1. Escenarios de estructura de costos

Estructura uno (Estr.1): Cada *proyecto tipo o representativo de cada tecnología* tiene unos costos nivelados de la electricidad (LCOE) discriminado por varios rubros, y se agrega en distintos ítems. Luego, de cada ítem se obtiene su participación porcentual frente al costo total por kilowatt instalado. La fuente de información de los proyectos pilotos corresponde al modelo JEDI (National Renewable Energy Laboratory, 2015)
Estructura dos (Estr.2): En esta opción se toma el costo total de cada ítem de los proyectos piloto y su erogación/ejecución en el tiempo. Se usa la participación porcentual del valor presente, descontado al 5%, de cada uno de los ítems. La fuente de información de los proyectos pilotos corresponde al modelo JEDI (National Renewable Energy Laboratory, 2015)
Estructura tres (Estr.3): En este caso se toman los costos nivelados de la electricidad (LCOE) discriminado por varios rubros, y se agrega en distintos ítems. Luego, de cada ítem se obtiene su participación porcentual frente al costo total por kilowatt. En este caso la fuente de información del LCOE corresponde (Lazard, 2014).

Tabla 4. Estructura de costos

	Estr.1			Estr.2			Estr.3		
	Eólico	**Termo solar**	**Biomasa**	**Eólico**	**Termo solar**	**Biomasa**	**Eólico**	**Termo solar**	**Biomasa**
Otros insumos*	19%	16%	36%	25%	19%	36%	19%	14%	37%
Inversión/capital**	73%	70%	49%	67%	65%	45%	81%	86%	50%
Trabajo***	7%	14%	14%	8%	15%	19%	0%	0%	13%

* incluye materiales, desarrollos y otros costos
** incluye inversiones y costos financieros
*** incluye remuneración a trabajadores en la fase de construcción instalación y operación y mantenimiento.

Fuente: cálculos propios a partir de (National Renewable Energy Laboratory, 2015) y (Lazard, 2014)

La **Tabla 4** indica la estructura de costos por tipo de tecnologías renovables (eólico, termo-solar, biomasa) y escenario de costo. Por ejemplo, para la generación eólica con una estructura de costos del escenario uno sugiere que el 19% de los costos obedece a bienes no energéticos (hormigón armado, equipo, carreteras , preparación del sitio, transformador eléctrico, cableado, extensión de línea HV), el 73% a costos de capital (incluye turbinas, cuchillas, torres, equipos de transporte) y el 7% a costos relacionados con empleo (personal de preparación de campo, montaje, erección, gestión y supervisión de obra, otros salarios en fase de campo; administrativos, gestión y mantenimiento en operación).

La generación a partir de biomasa y tecnología termo-solar, tiene una proporción de costos laborales más alta que la generación eólica. Por otro lado, la remuneración al capital de las tecnologías tanto eólica como termo-solar, es similar y mayor a la de biomasa, y la generación a partir de biomasa requiere más (de otros) insumos, frente a las otras tecnologías.

Posteriormente, a partir de la información del sistema de información eléctrico colombiano (UPME, Universidad de Antioquia, 2015), se toma el factor adicional de costos de cada tecnología renovable en comparación al costo de generación del Sistema Interconectado Nacional (ver **Tabla 5**). El costo de generación (para el caso de Colombia) fue de $153 por KWh ($/KWh) generado en el año 2015, lo que indicaría que el costo de generación con energía eólica sería de 168,3 $/ KWh (153 x 1,1) en el escenario A y 290,7 $/ KWh (153 x 1,9) en el escenario B (ver **Tabla 5**). En este caso, la generación con tecnología termo-solar es la más costosa, referente a los costos relativos del Sistema Nacional Interconectado.

Tabla 5. Costo de la nueva tecnología frente al costo de generación del sistema

Opción	Eólico	Termo solar	Biomasa
A	1,1	2,2	1,0
B	1,9	4,3	1,6

Fuente: Cálculos propios a partir de (UPME, Universidad de Antioquia, 2015)

Finalmente, con la información consignada en la **Tabla 4** y la **Tabla 5**, se construyen los escenarios de costos de tecnologías renovables simulados de acuerdo al modelo descrito en la sección anterior. Estos costos están estandarizados en valores monetarios, es decir, por ejemplo, para producir una unidad de electricidad con tecnología eólica en el escenario 1A se requiere 0,1 unidades de trabajo, 0,8 de capital y 0,2 de otros insumos o bienes no energéticos, y así sucesivamente (ver **Tabla 6**).

Tabla 6. Escenarios de costos de electricidad por tecnología

		Estr.1			Estr.2			Estr.3		
		Eólico	Termo solar	Biomasa	Eólico	Termo solar	Biomasa	Eólico	Termo solar	Biomasa
A	Otros insumos	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4
	Inversión/capital	0,8	1,5	0,5	0,7	1,4	0,5	0,9	1,9	0,5
	Trabajo	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	-	-	0,1
B	Otros insumos	0,4	0,7	0,6	0,5	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6
	Inversión/capital	1,4	3,0	0,8	1,3	2,8	0,7	1,5	3,7	0,8
	Trabajo	0,1	0,6	0,2	0,2	0,7	0,3	-	-	0,2

Fuente: cálculos propios a partir de (National Renewable Energy Laboratory, 2015), (Lazard, 2014) y (UPME, Universidad de Antioquia, 2015)

4.3. Escenario base

El resultado de las dos políticas diseñadas se comparan contra un escenario base o sin intervención de alguna política. Los valores de los parámetros y elasticidades de sustitución en la producción y la demanda final se toman directamente del artículo de Böhringer y Rutherford (2008). Por otro lado, se asume un comportamiento económico base. Las principales características del escenario base se señalan en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Parámetros y elasticidades del escenario base

Parámetros y elasticidades	
Valor agregado del compuesto versus entradas para producción de macro bienes	$\sigma_Y = 0,5$
Combustibles fósiles en la producción del macro bien	$\sigma_E = 2$
Recurso versus otras entradas en la producción de combustible fósil	$\sigma_{COAL} = 0,5$ $\sigma_{OIL} = 0,25$ $\sigma_{GAS} = 0,25$
Energía versus entradas no energéticas en el consumo final	$\sigma_C = 0,75$
Electricidad versus energía no-eléctrica en el consumo final	$\sigma_{ELE} = 0,3$
Elasticidad de sustitución intertemporal	$\rho = 0,5$
Supuestos económicos para Colombia	
Tasa de interés anual	$r = 0,05$
Tasa de crecimiento potencial anual	$g = 0,03$
Tasa de depreciación anual	$\delta = 0,05$
Razón de la dotación de trabajo en la oferta laboral	1,75
Elasticidad de sustitución entre consumo y ocio	$\eta = 1,4$

Fuente: tomado de (Böhringer & Rutherford, 2008),

5. Simulaciones de política

Se plantean dos ejercicios de simulación del modelo para el caso de Colombia. En tal caso, ambas políticas inician en el año 2020 y culminan en el año 2030. **Se simulan hasta el año 2050, con el objetivo de analizar qué sucede con las variables de interés considerando la optimización dinámica del modelo.** Los dos ejercicios propuestos son:

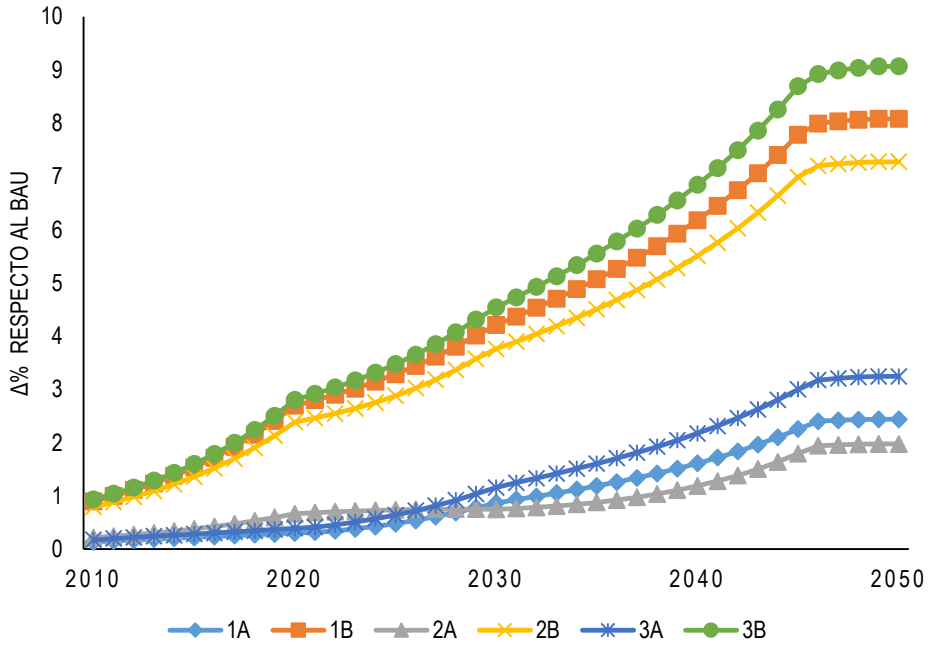
1. *Penetración de energéticos renovables no convencionales en la matriz de generación eléctrica:* La proporción de energía a partir de tecnologías renovables en la producción total de energía aumenta linealmente en 2% en el año 2020 hasta 2030, después se mantiene constante.

2. *Impuesto al carbono:* Se establece un impuesto a las emisiones de dióxido de carbono de combustibles fósiles, tal que se cumpla con el compromiso del gobierno nacional de reducir las emisiones en un 20% para el año 2030 (cuyo escenario base de referencia es el año 2010). El nivel de la meta nacional se asume igual para la meta del sector electricidad. La reducción de las emisiones frente al escenario base es lineal.

5.1. Penetración de renovables no convencionales – cuotas de participación

Este escenario asume que el gobierno nacional, mediante los mecanismos a su disposición, incrementa a discreción en 2% anual la participación de energéticos renovables no convencionales desde el año 2020 hasta 2030. El porcentaje de incremento anual se toma de un escenario alternativo de "¿Qué ocurriría si hubiese una posición sólida (ej. Mediante la aplicación de políticas en cifras conmensurables) del gobierno respecto de la inclusión de las energías renovables no convencionales en la matriz energética?", en tanto, en la actualidad este hecho es inexistente y se presenta en el presente trabajo como una cifra "optimista" teniendo en cuenta los datos históricos de penetración de energías renovables de acuerdo a la IEA (ver introducción sobre datos para Colombia) (International Energy Agency, 2016).

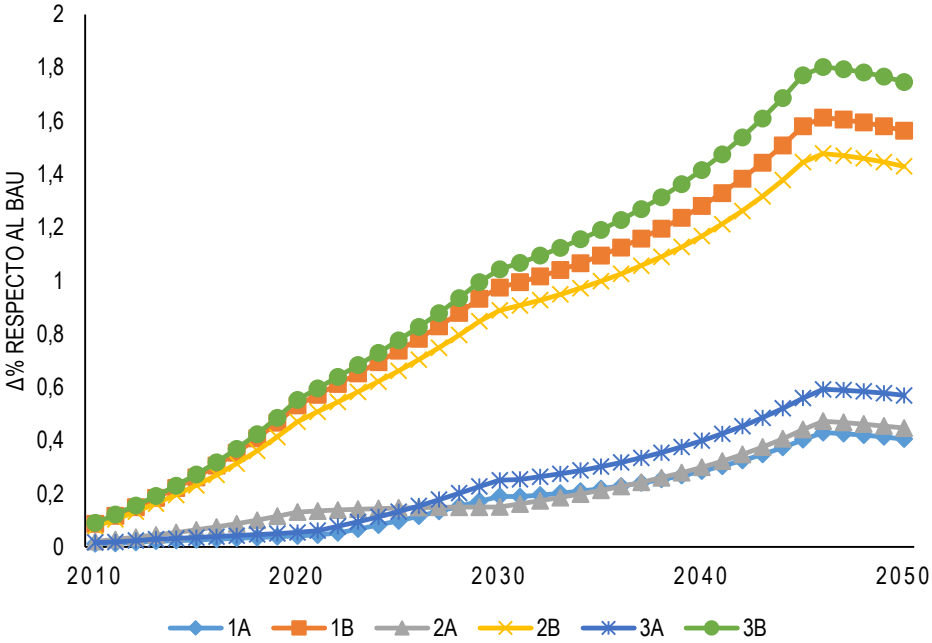
Frente al crecimiento económico del escenario base (3% anual, ver **Tabla 7**) y el nivel de penetración que se exige en el escenario propuesto (2% anual), es natural que la inversión requerida para toda la economía aumente (comprende incrementos entre 0,9% promedio anual en el escenario 2A y 4,8% en el escenario 3B frente al escenario base). En todos los escenarios de costos de energéticos (ver **Tabla 6**), la inversión es mayor frente al escenario base (sin cuotas) y a medida que los costos de generación aumentan (i.e. Esc.A y Esc.B), los requerimientos de inversión lo hacen de la misma forma (ver **Gráfica 1**).



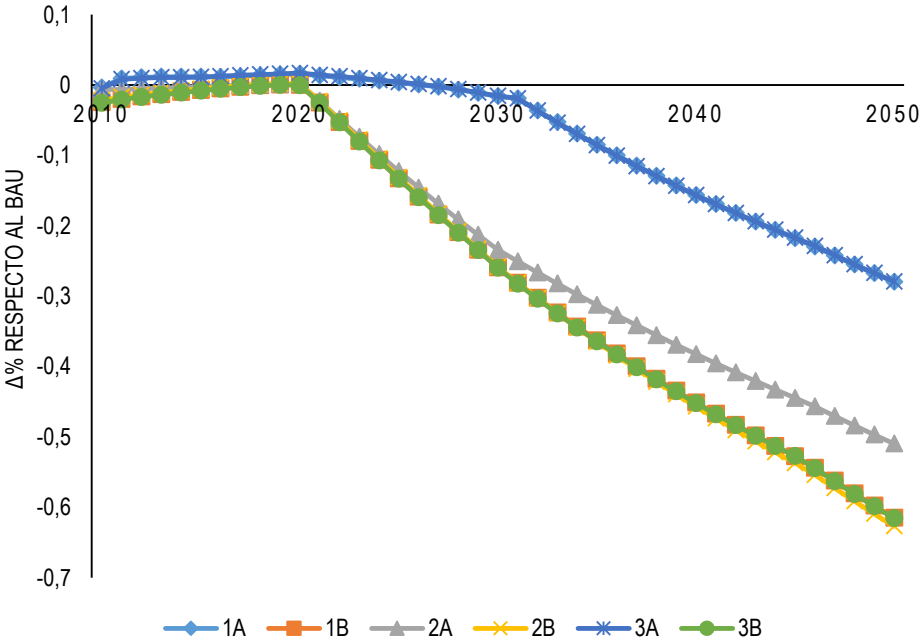
Gráfica 1. Cambio en la inversión (i) – cuota renovable

El aumento de la inversión en capital incide en el incremento del consumo intermedio y los requerimientos de otros factores productivos necesarios que hacen parte de la estructura de costos de cada tecnología. En el caso de los bienes

no energéticos, producidos localmente, hay un incremento promedio anual entre el 0,18% y el 0,99% adicional, frente al escenario base (ver **Gráfica 2**); contrario a lo que ocurre con la producción de bienes energéticos (hidrocarburos) con destino al mercado local debido a que se presenta una reducción promedio anual entre el 0,18% (Esc. 1A) y 0,26% (Esc. 3B) para el periodo 2010-2050 (ver **Gráfica 3**).



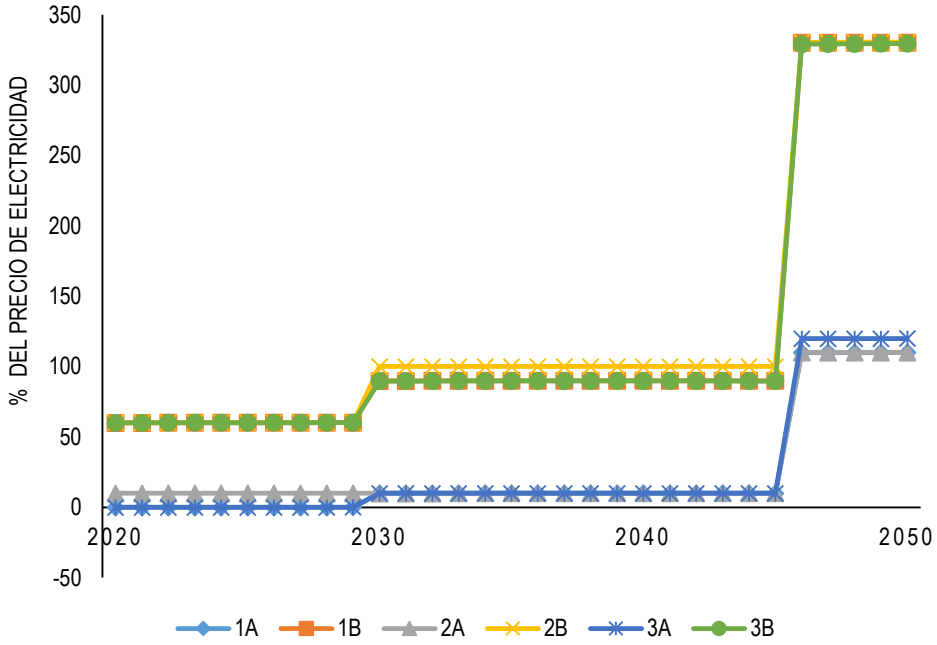
Gráfica 2. Cambio en el consumo intermedio de bienes no energéticos (Yd) – cuota renovable



Gráfica 3. Cambio en la demanda de bienes energéticos (Xd) – cuota renovable

Para que la cuota de participación de energía renovable no convencional sea cumplida, de forma discrecional, se establece un precio adicional (o subsidio) para las tecnologías renovables. Este ***subsidio óptimo*** depende del nivel de costos de la nueva tecnología respecto del costo de generación con las tecnologías actuales (o convencionales).

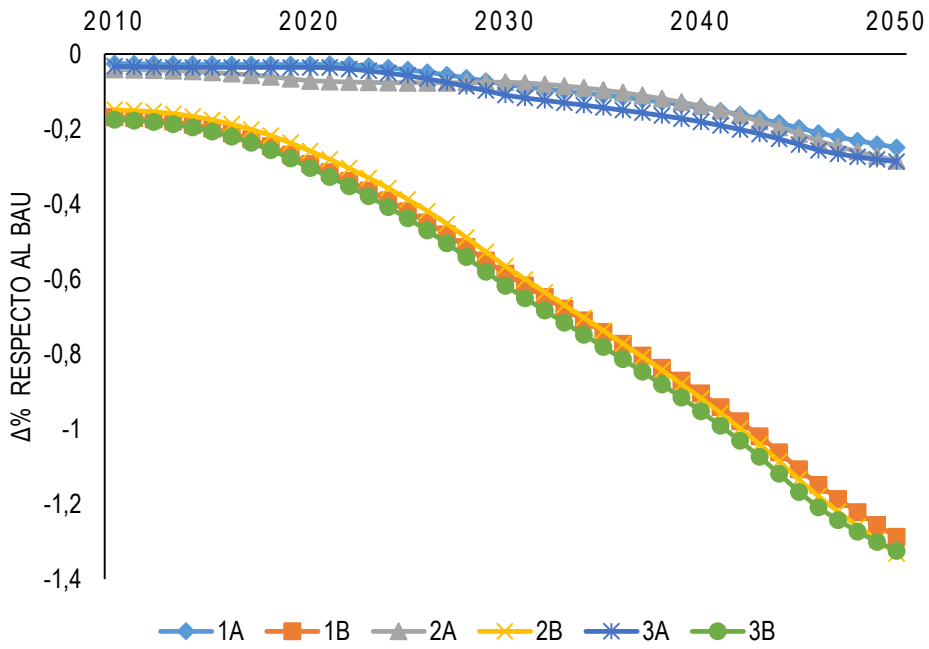
Para los escenarios 1A, 2A y 3A el precio promedio del subsidio (o valor adicional en la tarifa de energía eléctrica) antes de la entrada de la energía solar, en 2046, es de 6,2%, 10,0% y 6,1%, correspondientemente. Al entrar esta tecnología, el subsidio alcanza un promedio de 110% adicional frente a la tarifa de la energía del escenario base. Lo anterior quiere decir que, si la generación eléctrica plantea un costo en el país de $153 por KWh generado (unos USD0,05 KWh), el valor subsidiado que garantiza la penetración debería ubicarse entre $9,4 y $15.4 adicionales por KWh generado para las tecnologías renovables no convencionales (ver **Gráfica 4**).



Gráfica 4. Tasa de subsidio al precio de electricidad – cuota renovable

Para los escenarios 1B, 2B y 3B el precio promedio del subsidio antes que entre la energía solar es de 78,4%, 84,7% y 78,5%, respectivamente. Al entrar esta tecnología, el subsidio alcanza un promedio de 330% adicional frente a la tarifa de la energía del escenario base. El valor subsidiado que garantiza la penetración, debería ser entre $119,9 y $129,7 adicionales por KWh generado, para las tecnologías renovables no convencionales.

El valor adicional que se requiere pagar por parte de los usuarios finales de electricidad, reduce el bienestar al final del periodo simulado. La incorporación de energéticos renovables no convencionales (y el aumento de la inversión) genera una dinámica económica estable. Debido al pago del valor adicional, el bienestar de los hogares no se ve afectado inicialmente si los costos las tecnologías son bajos (escenarios 1A, 2A, 3A), empero, cuando los costos de generación aumentan (escenarios 1B, 2B, 3B) el bienestar de los hogares es menor (ver **Gráfica 5**).



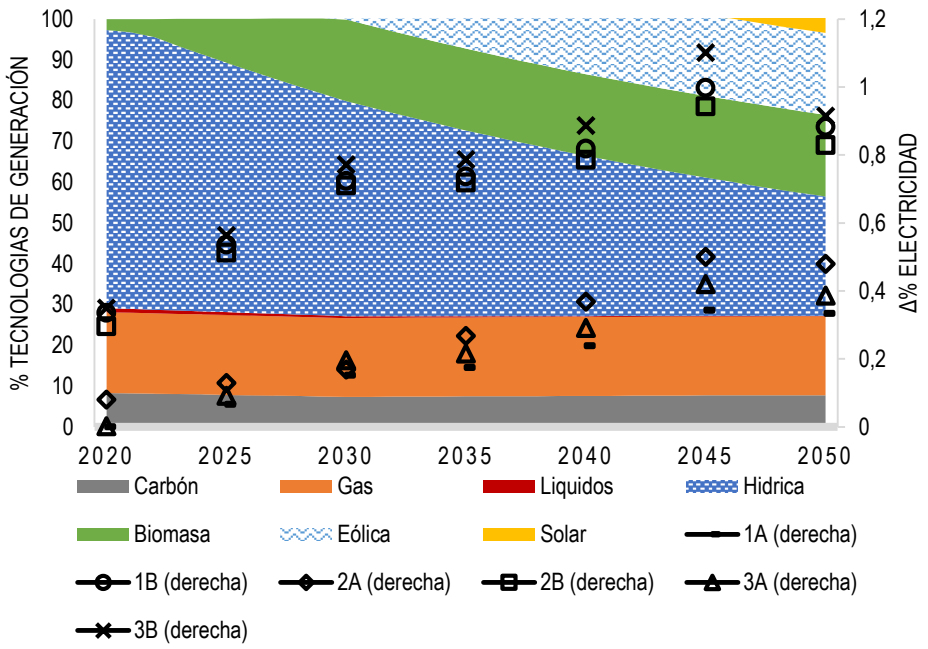
Gráfica 5. Cambio en el bienestar (W) – cuota renovable

Recapitulando, de acuerdo a lo expuesto en líneas anteriores, el panorama ha sido analizado desde el punto de vista del modelo *Top Down* o macroeconómico. Vale la pena no olvidar lo fundamental en este ejercicio de simulación con el modelo desarrollado, frente a otros ejercicios, que la demanda de energía eléctrica es **endógena**[1] **y hay características de un modelo sectorial**.

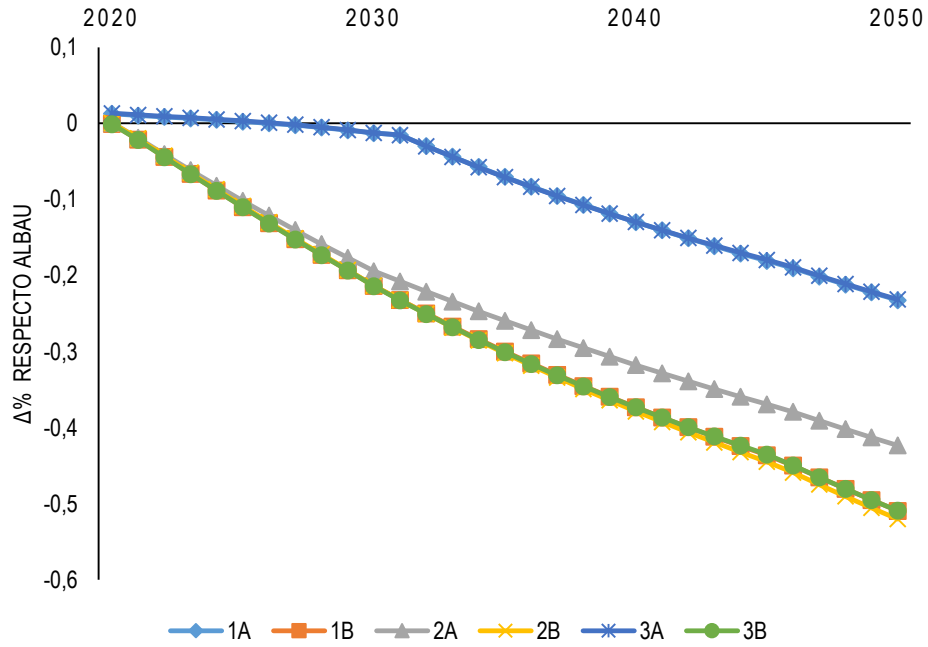
La dinámica en el consumo intermedio y la demanda final, generadas por las inversiones requeridas para lograr la cuota de participación de los renovables no convencionales, hacen que la economía *se electrifique*, es decir, aumenta la demanda de electricidad (Ver eje derecho **Gráfica 6**). Por ende, el nivel de inversión adicional está relacionado, positivamente, con los costos de las tecnologías y mientras más inversión para aplicaciones locales sea necesaria, más electricidad se requerirá. En el caso de los escenarios 1A, 2A y 3A la demanda de electricidad se incrementa en el año 2050 en un 0,33%, 0,48% y 0,39% respectivamente; mientras, para los escenarios 1B, 2B y 3B el incremento puede ser entre 0,88%, 0,83%, 0,92% en el año 2050, adicional a lo esperado en el escenario base. En todo el periodo simulado el efecto es positivo frente al escenario base (Ver eje derecho **Gráfica 6**).

Dada la estructura de costos de los energéticos renovables no convencionales usados (ver **Tabla 6**), la generación a partir de biomasa es aquella que inicialmente se incorpora en la matriz de generación eléctrica, reemplazando la generación por parte de hidroeléctricas. Tras alcanzar una participación de generación (aproximadamente 20%), se incorpora la generación eólica y, tras alcanzar una participación aproximada, ingresa al *mix* de generación eléctrica correspondiente a tecnologías solares (ver eje izquierdo **Gráfica 6**). Para este caso, en particular, debido a que la generación a partir de los recursos renovables no convencionales sustituye la generación hidroeléctrica (en lugar de la generación térmica), no hay efectos significativos en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico colombiano (ver **Gráfica 7**).

[1] Los modelos de este tipo son demanda dirigida, y la demanda de electricidad es una variable fija.



Gráfica 6. Matriz energética – cuota renovable



Gráfica 7. Cambio porcentual de las emisiones de GEI – cuota renovable

El mantenimiento de la participación de electricidad térmica (representada en líquidos, gas natural y carbón), se debe a dos elementos: 1) el nivel de confiabilidad/firmeza de las tecnologías renovables no convencionales y 2) el comportamiento en precios de los hidrocarburos, en particular, el carbón. Sobre este último punto, Colombia sería un exportador neto de energía (tanto renovable, como convencional) y **para que las plantas de térmicas dejen de ser parte de la matriz energética del país, sus costos de generación deben aumentar.**

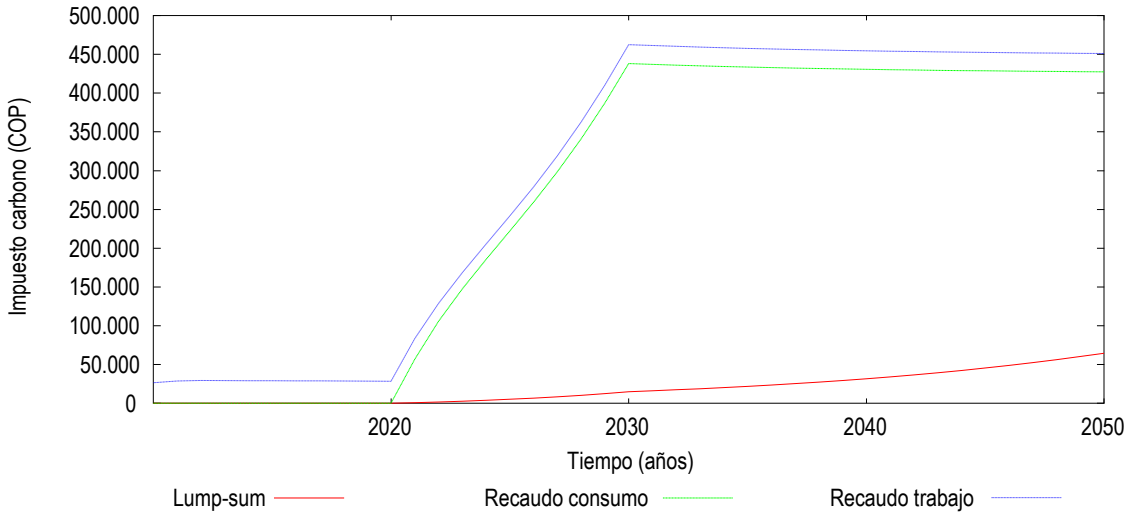
5.1. Impuesto al carbono

En el caso del impuesto al carbono, interesa determinar cuál es el nivel del impuesto en el cual, para el sector de generación de electricidad, se reducen las emisiones en un 20% (se asume que el compromiso nacional de reducción de emisiones establecida en la COP21 se distribuye sectorialmente). También, se supone que el impuesto se implementa en el año 2020 hasta 2030.

El impuesto al carbono implica el aumento del costo de generación. Los modelos "Bottom-up" (ver sección 2.1) analizan la posible o futura configuración de la matriz de energía eléctrica y el precio sombra de la electricidad. A partir de dichos análisis, se pueden dar indicios de, qué tecnologías fomentar y cuál es el costo adicional por ello. Sin embargo, se desconoce qué beneficios puedan resultar en los recursos recaudados, producto del impuesto, que provengan del gobierno nacional.

El modelo en este documento (ver sección 3) permite analizar, de forma simultánea, qué sucede con el recaudo y si regresa a la economía reduciendo otros costos. En este caso, se evalúan tres alternativas de uso del recaudo: la primera, la transferencia de suma fija a los hogares (lump-sum); en segundo lugar, la reducción en los impuestos al consumo (recaudo al consumo) y tercero, la reducción en los impuestos al trabajo (recaudo trabajo). **Sin pérdida de generalidad, se presentan solo los resultados para el escenario de costos 3B (ver Tabla 6)**

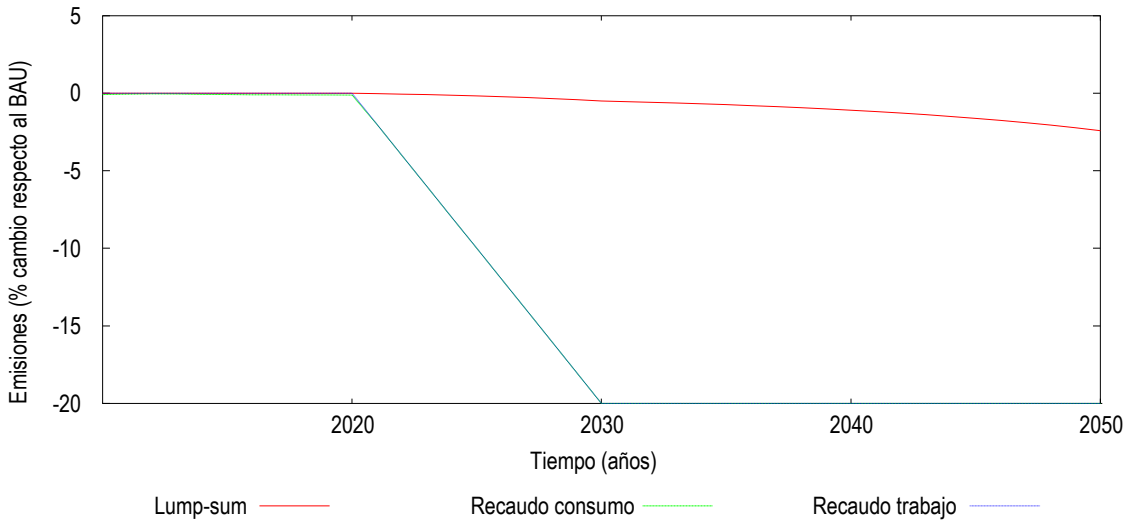
En cuanto al precio del impuesto al carbono, que determinaría la senda de reducción de emisiones en un 20% para el año 2030, respecto a las emisiones de línea base, este llegaría a ser de $ 450.000 pesos colombianos en el año 2030, aproximadamente USD155 por tonelada[2] -TRM 28 febrero 2017- (Superfinanciera, 2017) (ver **Gráfica 8** y **Gráfica 9**).



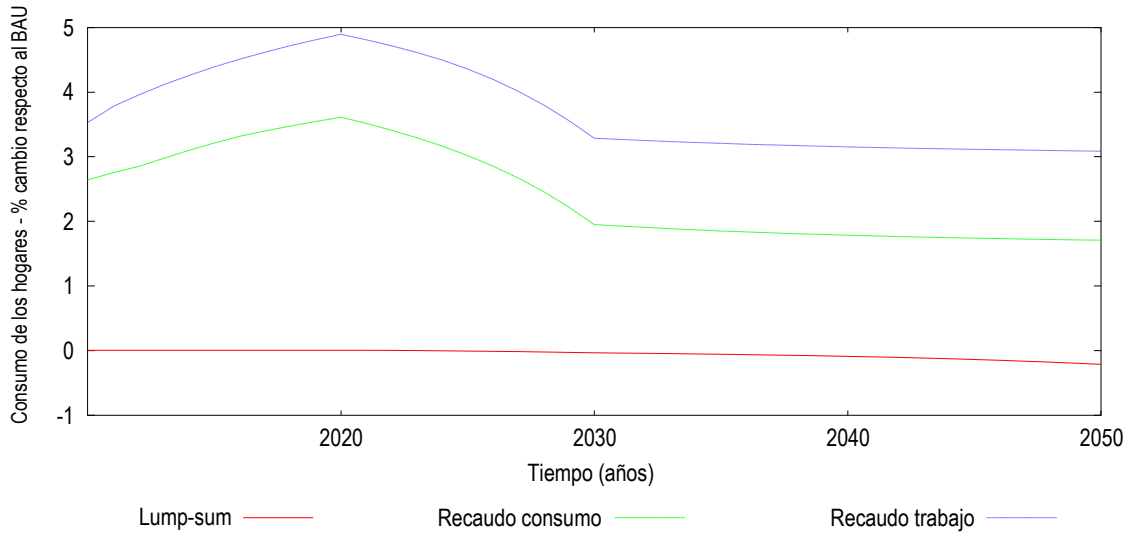
Gráfica 8. Precio impuesto al carbono – carbón tax

El doble dividendo, representado por el beneficio ambiental y económico, depende del lugar donde se re-incorporen los recursos recaudados por el impuesto al carbono en la economía. Sin embargo, en el caso colombiano y su estructura económica, **destinar los recursos para reducir los costos laborales, es más benéfico que incentivar la demanda** como se señalará más adelante (ver **Gráfica 10**, **Gráfica 11, Gráfica 12**).

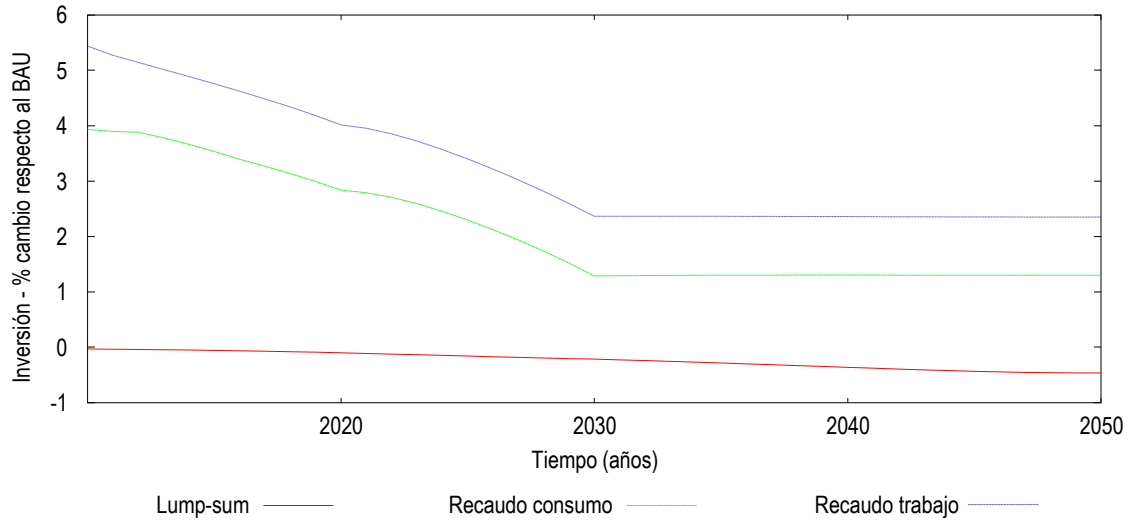
[2] El impuesto al carbono presentado aquí no corresponde a la estructura del *impuesto verde* establecido en la ley 1819 de 2016. Es un *impuesto verde*, y no al carbono, debido a que no se gravan energéticos con alto contenido de CO_2 como el carbón, se gravan energéticos de transición (gas natural). Es posible que el instrumento establecido sea un incentivo para que se fomente el uso de carbón mineral en actividades industriales y de generación eléctrica. Algo opuesto a lo que se desea con un impuesto al carbono.



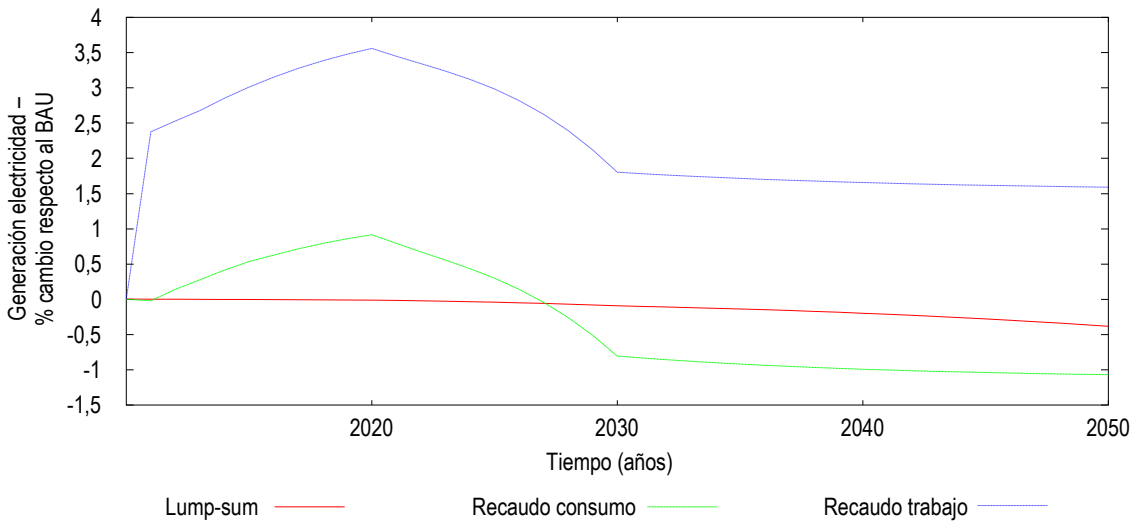
Gráfica 9. Cambio porcentual de las emisiones de GEI – carbón tax



Gráfica 10. Cambio porcentual en el consumo de los hogares



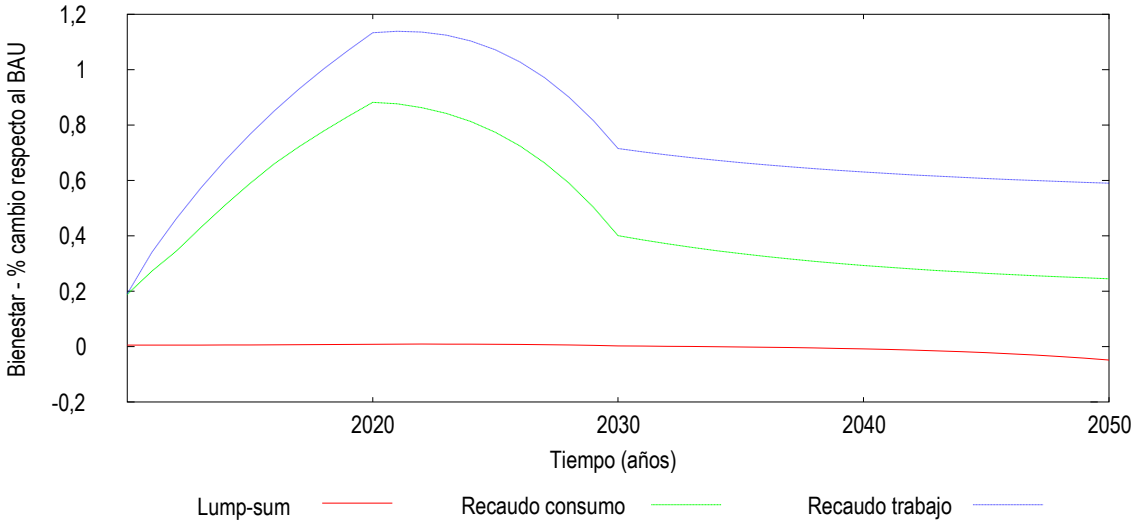
Gráfica 11. Cambio porcentual en el nivel de inversión – carbón tax



Gráfica 12. Cambio porcentual en el nivel de generación eléctrica – carbón tax.

En todos los casos, las variables económicas se incrementan porcentualmente (cuando existe la aplicación del impuesto al carbono) respecto al escenario sin impuesto al carbono. Esto, siempre y cuando el recaudo generado por el impuesto sea asignado a reducir los impuestos laborales o impuestos al consumo. Darle los recursos, en forma de transferencia, a los hogares no genera ningún impacto significativo.

Promocionar la participación de trabajadores locales y enviar los recursos de impuesto, para reducir los costos laborales (no el salario), tendrá un efecto positivo, fundamentalmente de desarrollo productivo; este factor se logra amplificar en otros sectores de la economía (ver **Gráfica 13** y **Gráfica 14**).



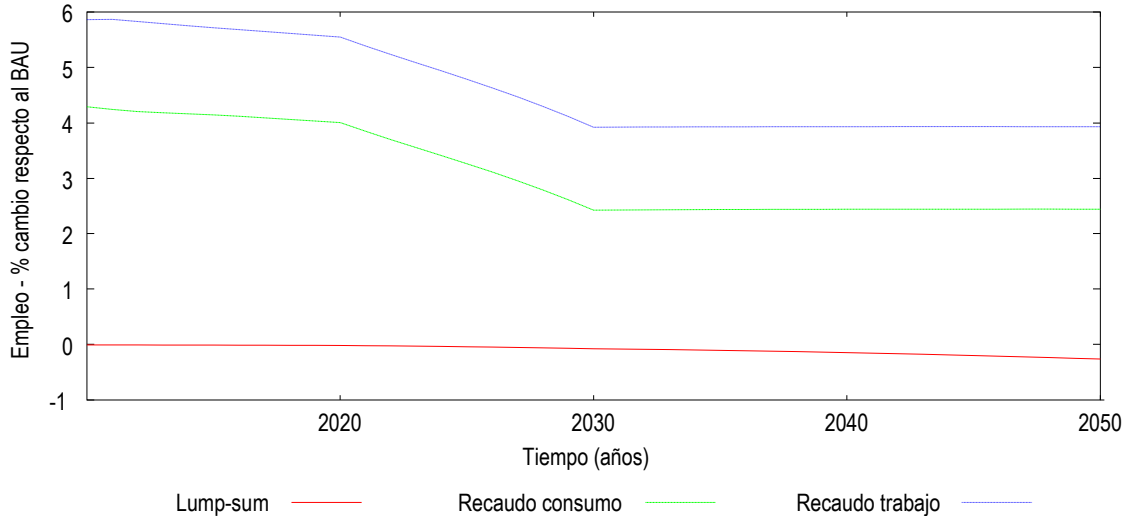
Gráfica 13. Cambio porcentual en el nivel de bienestar

5.1. Análisis de precios

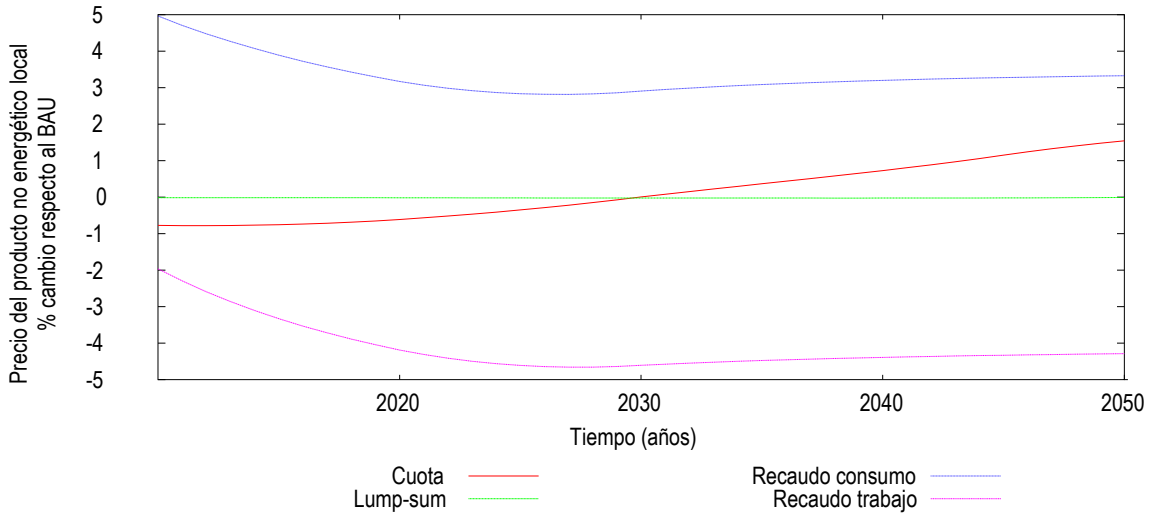
Para el análisis de esta sección vale recordar que los agentes tienen expectativas perfectas, por lo tanto, desde el inicio del periodo los resultados "se suavizan" (ver sección 3.2). En el caso de la cuota de mercado, los precios aumentan a medida que las tecnologías de generación más costosas ingresan al *mix energético* (ver **Gráfica 6**).

En el caso de que el recaudo del impuesto se destine a reducir los impuestos al consumo, el nivel de precios del bien no energético aumenta cerca de 5% inicialmente; lo que ocurre desde el inicio del periodo considerando que los agentes tienen plena información de los costos futuros que concebirá la política y por el porcentaje de bienes importados que

hacen parte de la cesta final del consumo. Caso contrario ocurre cuando el impuesto está destinado a la reducción de los impuestos, en este caso, el nivel de precios se reduce 2% desde el inicio del periodo (ver **Gráfica 15**).



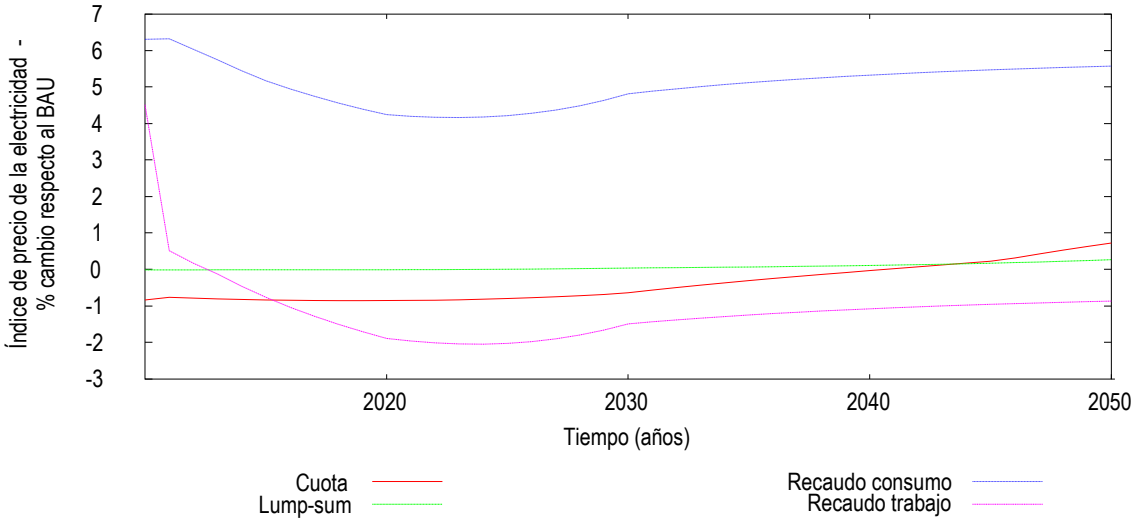
Gráfica 14. Cambio porcentual en el empleo



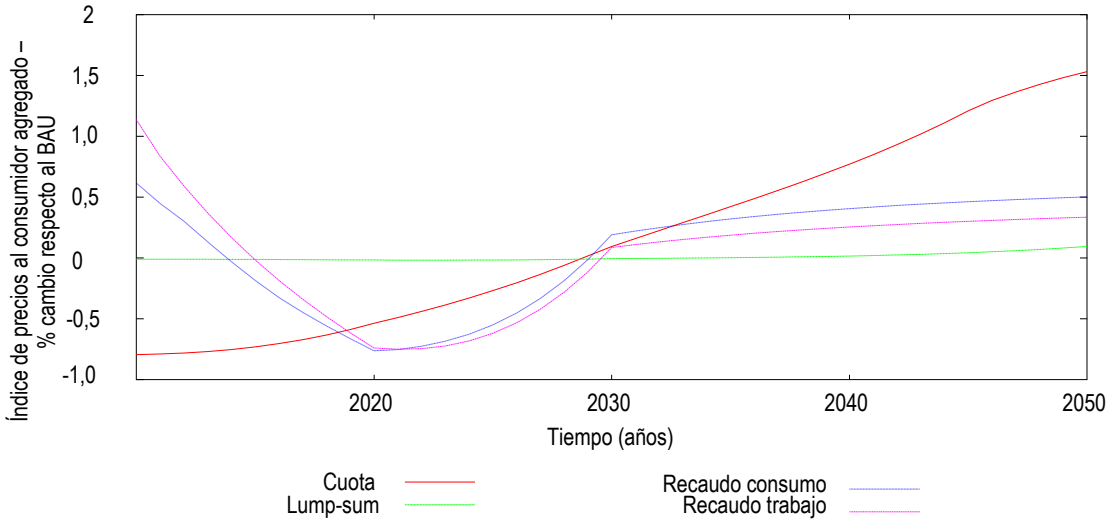
Gráfica 15. Cambio porcentual en precio del producto no energético local

Los precios de la electricidad tienen un comportamiento similar al precio del bien no energético en los distintos escenarios evaluados. Cuando los recursos están destinados a reducir los impuestos al consumo, el nivel de precios aumenta (ver **Gráfica 16**). Empero, el aumento de los costos de este conjunto de bienes, tiene un efecto relativamente bajo en el índice de precios generales del hogar representativo. Mientras se mantienen las medidas (2020-2030) el nivel de precio baja, posteriormente el nivel de precios se estabiliza en un 0,2% y 0,3% adicional al nivel de precios del escenario base (ver **Gráfica 17**).

El nivel de precios en el escenario con cuota es menor, pero igual, aumenta en el tiempo, lo que se ve reflejado en la reducción en bienestar consecuencia del incremento del valor del subsidio a pagar.



Gráfica 16. Cambio porcentual en el Índice de precio de la electricidad



Gráfica 17. Cambio porcentual en el Índice de precios al consumidor agregado

6. CONCLUSIONES

El crecimiento verde está definido como aquel crecimiento económico socialmente inclusivo y ambientalmente sostenible. Dicho tipo de crecimiento, para el presente estudio, se manifiesta en el desarrollo y aplicación del modelo propuesto por B y R para el sector eléctrico colombiano, brindando una aproximación sobre la efectividad de instrumentos de política en las dimensiones ambiental, social, y económica.

Los resultados de la política de cuota de penetración de energéticos renovables, exponen que se puede incrementar la actividad económica al fomentar la inversión. De esta manera, los efectos en la matriz energética indican que hay una entrada de energéticos renovables, no obstante, estos sustituyen la generación hídrica y se mantiene la participación térmica (gas, carbón) y por ende, si se analiza la dimensión ambiental a partir del indicador de reducción de emisiones de GEI, no hay un efecto fundamental sobre este ámbito de desarrollo. Adicionalmente, otro efecto que tiene la medida de cuota es el costo que asume, en este caso, la demanda final, al ver incrementada el precio de la electricidad, lo que se traduce en un cambio en el nivel de bienestar.

En este orden de ideas, para que las plantas térmicas dejen de ser parte de la generación eléctrica del país, sus costos de generación deben aumentar, en favor de no tener o crear un "incentivo perverso" para el uso de este tipo de energía, con precios bajos en comparación con otras alternativas energéticas. Y, si la meta de la dimensión ambiental se mide en reducción de emisiones de GEI, no es adecuada una política que exija una participación de renovables en la matriz energética, ya que los costos de operación de las tecnologías convencionales son bajos y sigue siendo costo-eficiente hacer uso de recursos que generan externalidades negativas.

Así, reiterando la idea de que, en el caso que el ámbito ambiental (en materia de generación de energía) sea *medido* con la reducción de emisiones de GEI, la política de cuotas no es la más acertada y se sugiere que sea aumentado el precio de los energéticos contaminantes. Bajo este contexto, el impuesto al carbono logra el objetivo ambiental y dependiendo de "en qué se usen los recursos recaudados", habrá efectos positivos sobre la estructura productiva, tal es el caso de, reducir los costos laborales (no reducir los salarios), lo que tendría un efecto positivo en materia de la estructura económica del país.

Una particularidad a destacar del trabajo realizado, es que se debe fomentar la oferta nacional, i.e. se debe generar que haya una industria que produzca los componentes requeridos por las tecnologías. Los resultados sobre la producción de otros productos no energéticos (como los industriales y servicios) se fomentan en ambos tipos de política lo cual implica un aumento de la demanda laboral. En el caso que aumente la participación de las importaciones en el consumo intermedio de las tecnologías, se espera que no haya efecto tan positivo sobre la economía.

El potencial de generación de cada tecnología puede ser incorporado en el análisis. En el caso del modelo, es de suponer que se inicia con tecnologías más baratas y estas pueden llegar hasta un nivel, en el caso de este ejercicio, que alcance aproximadamente 20% del total de generación, sin embargo, esto se debe contrastar con potenciales reales; similar ocurre con el potencial de energéticos eólicos y solares. Del mismo modo, las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) podrían ser una opción en el análisis futuro.

El tipo de tecnología solar incluida en este ejercicio tiene la característica de ser parte de un Sistema Interconectado. Sin embargo, hoy en día, existe un potencial de usuarios que pueden suplir sus requerimientos energéticos a partir de paneles solares, a pesar de esto, tales usuarios no hacen parte del análisis de este documento. En relación con este punto, en el ejercicio de cuotas, el bienestar de los hogares se reduce considerablemente, sin embargo, es posible que para satisfacer los requerimientos energéticos, los usuarios reduzcan su demanda de electricidad o aumenten su propensión a ser autogeneradores mediante paneles, no obstante, este tipo de análisis no es objeto del presente documento.

Otro aspecto a tener en cuenta, consiste en la generación de impactos ambientales en la implementación de tecnologías renovables no convencionales. Tal es el caso de los proyectos de biomasa, donde puede surgir un incentivo no adecuado para el uso del suelo, lo que podría desembocar en pérdidas de biodiversidad u otros servicios ecosistémicos en un país catalogado como megadiverso, con ecosistemas altamente sensibles. En la misma línea, para aquellas energías donde la principal característica es el uso tecnologías especiales, como es el caso de la solar (incluso la eólica, entre otras), es de considerar los impactos resultantes del ciclo de vida de dichas tecnologías, entre lo que destaca la producción de residuos de características especiales, para lo cual sería primordial crear y aplicar medidas de control, desde el gobierno (con participación de todos los sectores), en pro de asegurar su debido manejo y/o disposición.

Finalmente, cabe resaltar que la producción de bienes no energéticos, el menor uso de hidrocarburos, y el aumento en el empleo, son objetivos deseables para la sociedad que se logran a partir de consideraciones ambientales. No obstante, es evidente, en el presente ejercicio, que la dicotomía entre las dimensiones de desarrollo no existe, siendo inevitable que tales dimensiones estén íntimamente ligadas, poniendo de manifiesto la sensibilidad del sistema entero cuando alguna es modificada.

7. RECOMENDACIONES

El presente estudio presenta el desarrollo e implementación de un modelo híbrido que cubre la incorporación de energías no convencionales, empero su alcance es limitado (debido a su complejidad y a que este era el *target* de la propuesta original) y se recomienda hacer un modelo y análisis similar para la inclusión de transporte *más limpio* o bajo en emisiones.

Es importante abordar el impacto de la inclusión de la *autogeneración* por parte de los usuarios finales y también la entrada de los mismos en el mercado de energía cuando se generan excedentes y estos son vendidos a las empresas generadoras, proveedoras del Sistema Nacional Interconectado y se incorporan a este sistema.

Se sugiere hacer un estudio que tenga en cuenta el desarrollo y fabricación de tecnología a nivel nacional, como un nuevo *nicho de mercado*, esto porque se ha identificado su impacto en la generación de empleo, las capacidades que tiene el país para esto (y sus actuales potencialidades), así como las implicaciones que tenga en el comportamiento de la economía regional al poder abastecer a nuestros vecinos de tecnologías para energías no convencionales.

Por otro lado, es importante determinar los posibles impactos ambientales que pueden emerger de la puesta en marcha del uso de energías no convencionales y en su escenario *más evolucionado*, en el caso de que el país se volcara a la industria de la fabricación de tecnología, enfocándose en ciclo de vida completo la misma.

Así mismo, si bien es evidente en los resultados y conclusiones del estudio, que es imperativo el reducir a futuro el uso de carbón para la generación de energía térmica, se deben estudiar (a profundidad) los mecanismos para que ésta energía aumente su precio y por ende, se desestimule su uso, o se incluya tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. De otra parte, debe existir un abordaje del cómo incentivar (siendo un escenario deseable) un *reemplazo gradual* del sector de los hidrocarburos (alentando no sólo a su *no uso* sino a la baja de su extracción) por el sector de las energías no convencionales, que incluso, a largo plazo sea más rentable para el país, i.e. explorar si existe una fortaleza para la generación de energía solar fotovoltaica, sabiendo la posición del país en el globo en materia de radiación y brillo solar, donde se investigue acerca de las ventajas que pueden hallarse, suponiendo, además, que existe una optimización y avances en la tecnología, que en un escenario futuro pueda resultar en una ventaja competitiva para el país, haciéndolo destacado en la región para la generación de este tipo de energía.

Referencias bibliográficas

Álvarez Espinosa, A. C., Ordoñez, D. A., Nieto, A., Wills, W., Romero, G., Calderón, S. L., . . . Delgado, R. (16 de Diciembre de 2015). *Compromiso de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: Consecuencias económicas.* Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Econmicos/440.pdf

Álvarez, A., Romero, G., Riveros, L., Melo, S., & Ordoñez, D. (2016). Construcción de la matriz de contabilidad social de agua como insumo económico. *Departamento Nacional de Planeación - Archivos de Economía*(453).

Banco Interamericano de Desarrollo. (Octubre de 2016). *Conjunto de Datos: Base de Datos Energía*. Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo: http://www.iadb.org/es/temas/energia/base-de-datos-de-energia/base-de-datos-de-energia,19144.html?view=v18

Böhringer, C., & Rutherford, T. (2008). Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics, 30*, 574 – 596.

Burfisher, M. (2011). *Introduction to Computable General Equilibrium Models.* Cambridge: © Cambridge University Press.

Cai, Y., Newth, D., Finnigan, J., & Gunasekera, D. (2015). A hybrid energy-economy model for global integrated assessment of climate change, carbon mitigation and energy transformation. *Applied Energy, 148*, 381 – 395.

Calderón, S., Álvarez, A. C., Loboguerrero, A. M., Arango, S., Calvin, K., Kober, T., . . . Fisher-Vanden, K. (2016). Achieving CO2 reductions in Colombia: Effects of carbon taxes and abatement targets. *Energy Economics, 56*, 575 - 586.

Céspedes, E. (2011). Una matriz de contabilidad social con informalidad 2007: documentación técnica. *Departamento Nacional de Planeación - Archivos de Economía*(377).

Clarke, L., McFarland, J., Octaviano, C., van Ruijven, B., Beach, R., Daenzer, K., . . . van der Zwaan, B. (2016). Long-term abatement potential and current policy trajectories in Latin American countries. *Energy Economics, 56*, 513 - 525.

Congreso de la República. (29 de Diciembre de 2016). Ley 1819 - Reforma Tributaria Estructural. Bogotá D.C., Colombia: República de Colombia.

Cordi, A. (1988). La Matriz de Contabilidad Social. Deducción de los multiplicadores de contabilidad y su aplicación al caso colombiano en 1985. *Planeación y Desarrollo*, 79 - 120.

Cordi, A. (1999). ¿Se cumplen las verdades nacionales a nivel regional? Primera aproximación a la construcción de matrices de contabilidad social regionales en Colombia. *Departamento Nacional de Planeación, Archivos de Economía*(121).

Cordi, A. (1999). ¿Se cumplen las verdades nacionales a nivel regional?. Primera aproximación a la construcción de matrices de contabilidad social regionales en Colombia. *Departamento Nacional de Planeación - Archivos de Economía*(121).

Corredor, D. A., & Pardo, O. (2008). Matrices de Contabilidad Social 2003, 2004 y 2005 para Colombia. *Archivos de Economía*, 36.

Dai, H., Mischke, P., Xie, X., Xie, Y., & Masui, T. (2016). Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO2 emissions. *Applied Energy, 162*, 1355–1373.

DANE. (2006). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística.* Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/sen/nomenclatura/ciiu/CIIURev31AC.pdf: https://www.dane.gov.co/files/sen/nomenclatura/ciiu/CIIURev31AC.pdf

DANE. (2015). *Web Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de http://www.dane.gov.co/

DANE. (2017). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística.* Obtenido de Cuenta Satélite Ambiental - CSA: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/cuenta-satelite-ambiental-csa

DNP-BID. (2014). *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia -Síntesis-.* Bogotá: Nuevas Ediciones S.A.

Gutiérrez , J., & Valderrama, F. (1996). Multiplicadores de Contabilidad Derivados de la Matriz de Contabilidad Social. *Departamento Nacional de Planeación, Archivos de Macroeconomía*(41).

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. (2015). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación.* Bogotá, Colombia: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf?download

International Energy Agency. (2016). *Key Coal Trends Statistics - Excerpt from: Coal Information.* International Energy Agency. Obtenido de https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyCoalTrends.pdf

International Energy Agency. (2016). *Key Renewables Statistics - Excerpt from: Renewables information.* International Energy Agency. Obtenido de http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/renewables-information---2016-edition---excerpt---key-renewables-trends.html

Kuik, O., Brander, L., & Richard, S. T. (2009). Marginal abatement costs of green house gas emissions: A meta-analysis. *Energy Policy*, 1395-1403.

Labriet, M., Drouet, L., Vielle, M., Lou Lou, R., Kanudia, A., & Haurie, A. (2015). Assesment of the effectiveness of global climate policies using coupled bottom-up and top-down models. *Fondazione Eni Enrico Mattei. nota di Lavoro 23*.

Lazard. (2014). *Lazard: Financial advisory.* Recuperado el 09 de Diciembre de 2016, de Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis--Version 8.0: https://www.lazard.com/media/1777/levelized_cost_of_energy_-_version_80.pdf

Lutsey, N., & Sperling, D. (2008). America's bottom-up climate change mitigation policy. *Energy Policy, 36*, 673 – 685.

Maréchal, K. (2007). The economics of climate change and the change of climate in economics. *Energy Policy, 35*, 5181 – 5194.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (21 de Julio de 2015). *Colombia se compromete a reducir el 20% de sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030.* Obtenido de Portal Web Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible: http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1913:colombia-se-compromete-a-reducir-el-20-de-sus-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-para-el-ano-2030

National Renewable Energy Laboratory. (29 de Abril de 2015). *JEDI: Jobs and Economic Development Impact model*. Recuperado el 08 de Diciembre de 2016, de National Renewable Energy Laboratory: http://www.nrel.gov/analysis/jedi/download.html

Olivier, J. G., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J. A. (2016). *Trends in global CO2 emissions: 2016 Report.* The Hague: PBL and EC-JRC. Obtenido de http://edgar.jrc.ec.europa.eu/: http://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions

Perdomo Strauch, Á. (2008). Modelo Estándar de Equilibrio General Computable. *Deparamento Nacional de Planeación - Archivos de Economía*(342).

Presidencia de la República de Colombia. (1 de Febrero de 2017). *Puntos clave de la Misión de Crecimiento Verde.* Obtenido de http://es.presidencia.gov.co/noticia/170201-Puntos-clave-de-la-Mision-de-Crecimiento-Verde

Ramírez, J., & Prada, S. (2000). Matriz de Contabilidad Social 1996 para Colombia. *Documentos de Trabajo CEGA*(1).

Ramírez, M., Yepes, F., & Karl, C. (2000). Construcción de una matriz de contabilidad social para el análisis de políticas de seguridad social en salud. Borradores en investigación. *Serie de documentos en Economía CEGA*(89).

Ramsey, F. (1928). A mathematical theory of saving. *Economic Journal, 38*(152), 543–559.

Shukla, P. (2013). Review of linked modelling of low-carbon development, mitigation and its full costs and benefits. . *Research Paper MAPS programme*.

Superfinanciera. (28 de Febrero de 2017). *Superintendencia Financiera de Colombia.* Obtenido de Tasa de Cambio - TRM: https://www.superfinanciera.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=60819

Tapia-Ahumada, K., Octaviano, C., Rausch, S., & Pérez-Arriaga, I. (2015). Modeling intermittent renewable electricity technologies in general equilibrium models. *Economic Modelling, 51*, 242 – 262.

Tuladhar, S., Yuan, M., Bernstein, P., Montgomery, W., & Smith, A. (2009). A top–down bottom–up modeling approach to climate change policy analysis. *Energy Economics, 31*, S223–S234.

United States Environmental Protection Agency. (2015). *Green House Emissions*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency -EPA-: https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data

UPME, Universidad de Antioquia. (Noviembre de 2015). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano.* Obtenido de http://www.siel.gov.co/generacion_sz/geolcoe.rar.

van der Mensbrugghe, D. (2008). *The Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium (ENVISAGE) Model.*

van der Zwaan (b), B., Kober, T., Calderon, S., Clarke, L., Daenzer, K., Kitous, A., . . . Di Sbroiavacca, N. (2016). Energy technology roll-out for climate change mitigation: Amulti-model. *Energy Economics, 56*, 526 – 542.

van der Zwaan, B., Calvin, K., & Clarke, L. (2016). ClimateMitigation in Latin America: Implications for Energy and Land Use Preface to the Special Section on the findings of the CLIMACAP-LAMP project. *Energy Economics, 56*, 495 - 498.

Wing, I. S. (2008). The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: Electric power technology detail in a social accounting framework. *Energy Economics, 30*, 547 573.

Woollacott, J., & Wing, I. (2014). Greenhouse Gas Policy in the Electric Sector - Measuring the Costs and Ancillary Bene. *Working paper*, 1 28.

World Resources Institute. (2017). *CAIT Climate Data Explorer*. Obtenido de http://cait.wri.org/historical/Country%20GHG%20Emissions?indicator[]=Energy&indicator[]=Industrial%20Processes&indicator[]=Agriculture&indicator[]=Waste&indicator[]=Land-Use%20Change%20and%20Forestry&indicator[]=Bunker%20Fuels&year[]=2013&country[]=World&

Zhang, D., Karplus, V., & Rausch, S. (2015). *Capturing Natural Resource Dynamics in Top-Down Energy-Economic Equilibrium Models.* Cambridge: MIT.