CONSTRUCCIÓN DE UN ESCENARIO DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 DE COLOMBIA.

AUTORES

JUAN FELIPE OTALORA TOBAR
CHRISTIAN CAMILO ROMERO ROJAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2017

CONSTRUCCIÓN DE UN ESCENARIO DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 DE COLOMBIA.

AUTORES

JUAN FELIPE OTALORA TOBAR
INGENIERÍA AMBIENTAL

CHRISTIAN CAMILO ROMERO ROJAS
INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE GRADO

ING. PhD MARIO ANDRÉS HERNÁNDEZ PARDO
ING. DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ING. PhD IVÁN ORLANDO CABEZA ROJAS
CO-DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD SANTO TÓMAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2017

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____
Presidente del jurado

_____
Jurado

_____
Jurado

DEDICATORIA

En primer lugar dedicamos este proyecto de grado a nuestras familias, en cabeza de nuestros padres y hermanas que han sido un apoyo fundamental e incondicional a lo largo de nuestras vidas, realizando múltiples esfuerzos y sacrificios para lograr forjarnos como personas integrales.

A los docentes que a lo largo de la carrera con sus instrucciones y consejos nos han forjado una claridad y ética profesional que nos permitió llegar a estas instancias y en el futuro ser profesionales idóneos que realicen grandes aportes a la sociedad.

A ti América por tantas alegrías y tristezas que vivimos juntos, por demostrar que esto no es un simple sentimiento, es una pasión que me acompañará en todos los momentos de mi vida.

Por último queremos mencionar a cada una de las personas que estuvieron en este proceso de aprendizaje, ya que cada una de ellas realizó un aporte y acompañamiento para lograr cumplir este objetivo que nos hemos trazado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director Doctor Mario Hernández y nuestro codirector Doctor Iván Cabeza quienes fueron parte fundamental para desarrollar este proyecto de grado, por dedicarnos su tiempo y la confianza brindada, forjándonos como mejores profesionales y enseñándonos la importancia de la perseverancia y el esfuerzo.

A la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y principalmente a Diego Espitia quien gracias a su colaboración fue fundamental para el desarrollo de los objetivos propuestos para esta tesis.

A la Universidad Santo Tomás, los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental por la formación como profesionales y principalmente como personas integras.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 13

1. OBJETIVOS 15

1.1. OBJETIVO GENERAL 15

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS 15

2. MARCO TEORICO 16

2.1. Cambio Climático 16

2.2. Consecuencias del Cambio Climático 16

2.3. Panorama y Estrategia Mundial para el Cambio Climático 17

2.4. COP 21 18

2.5. Panorama y Estrategia Nacional para el Cambio Climático 20

2.6. Estrategia Nacional de Desarrollo Baja en Carbono (ECDBC) 21

2.7. Calculadora 2050 23

2.8. Inventario Nacional de GEI. 24

2.9. IPCC. 25

2.10. Árboles de cálculo. 26

2.11. Escenario BAU. 27

2.12. Plan de expansión de referencia generación- transmisión (2015- 2029). 28

2.13. Cargo por Confiabilidad. 28

3. METODOLOGÍA 29

4. ANALISIS Y RESULTADOS 32

4.1. IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GEI PARA EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO. 32

4.1.1. Industria de la Energía. **34**

4.1.1.1. Revisión de la Calculadora de carbono 2050 de Colombia para la Industria Energética. **38**

4.1.2. Sector Transporte. **39**

4.1.2.1. Revisión de la Calculadora de carbono 2050 de Colombia para el Sector transporte. **42**

4.2. INCLUSIÓN DE LAS MEDIDAS ADICIONALES EN LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 COLOMBIA. **42**

4.2.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BAGAZO **43**

4.2.2. BIOCOMBUSTIBLES **48**

4.3. MODELAMIENTO DEL ESCENARIO DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMATICO EN LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 DE COLOMBIA. **52**

4.4. CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI A PARTIR DEL ESCENARIO PLANTEADO. **55**

5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO DEL PROYECTO **59**

CONCLUSIONES **61**

RECOMENDACIONES **63**

REFERENCIAS **64**

ANEXOS **68**

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Emisiones de GEI por sector Colombia para el año 2012. 32

Gráfica 2. Porcentaje de Participación Emisiones Sector Energético 2012. 33

Gráfica 3. Reducción de emisiones con respecto al escenario BAU para el año 2030. 33

Gráfica 4. Composición del Sistema Integrado de Generación 2015.....34

Gráfica 5. Participación por tecnología en la matriz eléctrica. 35

Gráfica 6. Valor Esperado Factor de Emisión Escenarios a Largo Plazo Plan de Expansión de Referencia 2015-2029. 36

Gráfica 7. Distribución de Energéticos Sector Transporte 2012. 39

Gráfica 8. Reducción del 20% en emisiones de GEI con respecto al escenario base del sector energético. 54

Gráfica 9. Emisiones de GEI para el escenario planteado para el sector energético. 56

Gráfica 10. Distribución de las emisiones de GEI en el escenario BAU para el sector energético. 56

Gráfica 11. Distribución de las emisiones de GEI en el escenario planteado para el sector energético. 57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales diferencias entre el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de Paris 20

Tabla 2. Porcentaje de CO2 equivalente generadas de GEI en Colombia por Sectores y principales actividades. 25

Tabla 3.Factores de emisión para el sector energético para cada tipo de recurso utilizado en centrales térmicas. 36

Tabla 4. Comparación de la Capacidad Instalada del Escenarios 5 y 11 del Plan de Expansión Referencia 2015- 2029. 37

Tabla 5. Expansión adicional matriz eléctrica para 2029 Escenario 11- Plan de Expansión de Referencia (2015-2029) 38

Tabla 6. Energéticos por Modo de Transporte. 40

Tabla 7. Emisiones para diferentes mezclas del ACPM con biodiesel. 41

Tabla 8. Emisiones gasolina corriente y gasolina con una mezcla del 10% con bioetanol. 41

Tabla 9. Proyección de emisiones de GEI para el sector energético para el escenario BAU. 53

Tabla 10. Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica y Potencia, incluyendo Grandes Consumidores y Exportaciones Panamá. 54

Tabla 11. Demanda para combustibles. 55

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Componentes de la ECDBC. 22

Diagrama 2. Metodología. 31

Diagrama 3. Factor de Planta Implícito Para Hidrocarburos sólidos (Carbón-Biomasa), calculadora de carbono 2050 de México. 45

Diagrama 4. Condicional para Nueva Medida de Gestión Térmica en Termoeléctricas. 46

Diagrama 5. Energía Sin Generar Para Nueva Medida de Gestión Energética en Termoeléctricas 46

Diagrama 6. Generación Ciclo Combinado Calculadora de carbono Indonesia. ...47

Diagrama 7. Condicional mezcla gasolina con bioetanol transporte de pasajeros 51

Diagrama 8. Bioetanol disponible para la mezcla con gasolina en transporte de carga. 52

RESUMEN

Ante la problemática de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y las repercusiones que traen al medio ambiente y a la población mundial es necesario establecer medidas que permitan contribuir con la reducción de emisiones de GEI. Por este motivo se desarrolló el presente proyecto que identificó y realizó el modelamiento de medidas incluidas en la calculadora 2050 para generar un escenario de mitigación que permita la cuantificación de la reducción de emisiones de GEI.

La primera etapa consistió en una revisión bibliográfica que permitió identificar el sector energético como el adecuado para el desarrollo de las medidas, posteriormente se llevó a cabo una revisión de las calculadoras de carbono existentes, que permitió seleccionar las variables de generación de energía a partir de bagazo y biocombustibles como las medidas adecuadas para mejorar el modelo de la calculadora en Colombia. Para las medidas mencionadas se construyeron árboles de cálculo que permitieron determinar las mejoras que podía tener el modelo y como podría desarrollarse la construcción del escenario, utilizando como base lo establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para establecer las proyecciones relacionadas con la industria de la energía y el sector transporte.

A partir de este modelamiento se calculó la reducción de emisiones de GEI con respecto al escenario Business As Usual (BAU) que contempla la proyección de emisiones a nivel nacional para el año 2030, respecto al escenario planteado para el sector energético.

ABSTRACT

Owing to the issue of greenhouse gas (GHG) emissions and the impact they bring to the environment and the world population, it is necessary to establish measures to contribute to the reduction of GHG emissions, for this reason the present project was developed, which identified And performed the modeling of measures included in the 2050 calculator to generate a mitigation scenario that allows the quantification of the reduction of GHG emissions.

The first stage consisted of a bibliographic review that allowed identifying the energy sector as the adequate one for the development of the measures, later a review of the existing carbon calculators was carried out, which allowed to select the variables of power generation from Bagasse and biofuels to improve the existing model in Colombia. For the measures mentioned, calculation trees were constructed that allowed to determine the improvements that could have the model and how the scenario construction could be developed, using as base the established by the Unit of Planning Energy Mining (UPME) to establish the projections related to the Energy industry and the transport sector.

Based on this modeling, the GHG emission reduction was calculated with respect to the Business As Usual (BAU) scenario, which contemplates the projection of national emissions by 2030, in relation to the scenario proposed for the energy sector.

INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial se viene presentado un incremento en la temperatura media global, esto como resultado de un aumento de las emisiones de GEI como el dióxido de carbono (CO2), metano (CH4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFC) e hidrofluorocarbonos (HCFC). Estos gases atrapan una porción creciente de radiación infrarroja terrestre, por este motivo se presentará un aumento de la temperatura media global entre los 1,5 y 4,5 ºC en un tiempo cercano a 50 años. Este cambio de temperatura traería cambios en la precipitación y alteración de las corrientes marinas [1].

A nivel internacional se ha dado gran importancia al tema de cambio climático, una de las evidencias se presentó a finales del año 2015 donde se llevó a cabo la Conferencia de las Partes sobre Cambio Climático en París (COP 21) buscando "lograr un acuerdo legalmente vinculante y universal sobre el clima [2]", con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de 2ºC. Uno de los principales temas abordados en COP21 fue la reducción de las emisiones de GEI, como conclusión de este tema la conferencia llegó a un consenso que permitiera el compromiso de los 195 países participantes [2].

Colombia es un país considerado altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, ya que la mayor parte de su población se encuentra ubicada sobre las partes altas de la cordillera de los andes, donde se estiman problemas de insuficiencia del recurso hídrico e inestabilidad de suelos, en la parte costera el aumento del nivel del mar puede generar inundaciones llegando a afectar las ciudades ubicadas sobre la zona costera pacífica y caribe de nuestro país. Adicionalmente el país presenta una considerable recurrencia de eventos extremos que han presentado emergencias que dejaron miles de muertos, heridos y considerables pérdidas económicas [3].

Los escenarios de cambio climático de Colombia muestran tendencias de aumento de temperatura entro los 2 y 4ºC para el año 2070, esto traería repercusiones en la reducción de las precipitaciones cercanas al 30% en algunas zonas, generando un impacto considerable en la calidad de vida de la población colombiana principalmente en la población rural [3].

Por las razones anteriormente descritas y otras que se irán explicando en el presente documento, es necesario aumentar los esfuerzos que permitan reducir las emisiones de GEI en los principales sectores del país, dentro de los principales ejemplos se encuentra la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) que planea desligar el crecimiento económico con el incremento de las emisiones de GEI. Este trabajo presenta un escenario en el sector energético, ya que es uno de los principales emisores de GEI [4].

La primera parte del documento presenta la parte teórica comenzando con los objetivos planteados por parte de los autores, posteriormente se realizará una introducción de los temas que se deben tener en cuenta para un mayor entendimiento del trabajo y seguido de la metodología usada para el desarrollo del proyecto. En el trabajo encontrará la revisión bibliográfica realizada que permitió identificar las medidas, herramientas y el sector a trabajar, seguidamente se presenta el desarrollo de la inclusión de medidas que permitieran ser modeladas y cuantificables en cuanto a reducción de emisiones GEI y finalizando con las conclusiones del proyecto y las recomendaciones a tener en cuenta para próximos trabajos del tema.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Construir un escenario de mitigación de emisiones para el sector energético en Colombia a partir de la Calculadora de carbono 2050.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar medidas para el sector energético que conlleven a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, estableciendo los parámetros de relevancia para su modelación.
- Incluir en la Calculadora de carbono 2050 Colombia las medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero identificadas para Colombia en el sector energético.
- Generar un escenario de mitigación al cambio climático en la Calculadora de carbono 2050 con las medidas propuestas.
- Cuantificar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para Colombia a partir del escenario de mitigación desarrollado para el año 2030.

2. MARCO TEORICO

2.1. Cambio Climático

El cambio climático es uno de los problemas que actualmente genera más preocupación en la población mundial ya que con el transcurrir del tiempo se vienen evidenciando las consecuencias que trae consigo. Se trata de un problema antropogénico que comenzó en la época de la revolución industrial debido a la quema de combustibles fósiles que emiten GEI y que quedan atrapadas en la atmósfera. Con el pasar del tiempo y el incremento del uso de los combustibles fósiles también se incrementan las concentraciones de GEI en la atmósfera que son la causa del cambio climático [5].

Colombia es uno de los países que puede verse más afectados por las consecuencias generadas por el cambio climático, ya que gran parte de la población se ubica en las partes altas de la cordillera de Los Andes donde se esperan problemas de inestabilidad de suelos y falta de agua, mientras que la población costera puede sufrir los estragos del aumento del nivel del mar [5].

Los escenarios generados para el cambio climático en nuestro país muestran un aumento de la temperatura en general de 2 a 4 ºC para el año 2070 y reducción en las precipitaciones de hasta un 30% en ciertas zonas del país. El incremento en la temperatura afectarían de manera significativa el nivel de vida de gran parte de la población colombiana, porque las condiciones climatológicas serían cada vez más extremas [1] [6].

2.2. Consecuencias del Cambio Climático

El constante incremento de las emisiones de GEI trae una serie de alteraciones que presentan un impacto negativo en la calidad de vida de la población humana y la economía mundial, adicionalmente los ecosistemas se ven directamente afectados, a continuación se nombrarán algunas de las consecuencias más relevantes :

- Incremento en las temperaturas a nivel mundial: Debido a las moléculas de GEI presentes en la atmósfera y la capacidad que estas tienen para absorber y reemitir las radiaciones de onda larga (radiación infrarroja, la cual es eminentemente térmica) que proviene del sol y que se reflejan en la superficie de la Tierra hacia el espacio, controlando el flujo de energía natural a través del sistema climático. Al aumentar las concentraciones de GEI la radiación infrarroja que es absorbida en la tropósfera aumenta, generando aumentos en la temperatura global [7].

- Cambios adversos en el ciclo hidrológico: El aumento en la temperatura global acelera el ciclo hidrológico, lo que generaría en Colombia un cambio en las precipitaciones alterando la oferta hídrica [7].

- Biodiversidad amenazada: El cambio climático es una problemática que se ha convertido en una de las principales presiones sobre la biodiversidad, aumentando el riesgo de extinción de especies consideradas vulnerables al verse afectados los ecosistemas en que habitan [8].

- Aumento en el nivel del mar: Debido a los aumentos en las temperaturas se genera un incremento en el deshielo polar que conlleva a una expansión de los océanos generando un aumento en el nivel del mar, además de inundar y erosionar las costas [7].

2.3. Panorama y Estrategia Mundial para el Cambio Climático

El problema del cambio climático viene tomando una relevancia importante que ha permitido que las naciones se unan para luchar contra este, se denotaron sus primeras evidencias entre las décadas de 1960 y 1980 donde se recopilaron datos que demuestran el rápido aumento de dióxido de carbono en la atmósfera [9].

En 1988 por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial y su Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente se creó el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) que dos años más tarde presentó su primer

informe donde se afirmaba que el calentamiento global era un problema real y se debían tomar medidas inmediatas para su mitigación [9].

Después de la Convención Marco se han venido desarrollando múltiples reuniones de participación mundial en las que se busca la aprobación de los gobiernos en las acciones para la mitigación del cambio climático. En el desarrollo de este proyecto se tratarán más a fondo algunos de los documentos más importantes que se han publicado y la importancia que han tenido en la toma de decisiones acerca del cambio climático [9].

2.4. COP 21

Previamente a la COP 21 se debe tener en cuenta uno de los principales antecedentes como lo es el protocolo de Kyoto (1997), que fue un instrumento mediante el cual se pone en práctica lo establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, este protocolo tiene como fin que los países industrializados que son los mayores emisores de GEI se comprometan a reducir sus emisiones, estableciendo metas a través de instrumentos legislativos y políticas nacionales [10].

Este protocolo fue considerado como un gran avance hacia una reducción de emisiones de GEI, debido a que en las convenciones previas se analizaba muy superficialmente el tema del cambio climático lo que no llegaba a generar compromisos reales en los países industrializados, buscando la reducción de emisiones GEI [10].

La COP 21 es la conferencia de las Partes que se celebró en París del 30 de noviembre hasta el 11 de diciembre de 2015, esta reunión buscaba llegar a un acuerdo mundial que permitiera la reducción de los GEI. Ante las consecuencias que se están viviendo mundialmente por el cambio climático, la conferencia reconoció una responsabilidad que es compartida, teniendo en cuenta el nivel de desarrollo y las necesidades específicas de los países. Los países industrializados además de tener compromisos económicos, también deben facilitar la

transferencia de tecnología buscando la adaptación a una economía que sea menos carbono dependiente [11].

El acuerdo tiene como objetivo evitar un aumento de la temperatura media global de los 2°C respecto a los niveles anteriores a la industrialización, y mantener las medidas que se están llevando a cabo para limitar este aumento de temperatura a 1,5°C. Los países que emiten la mayor cantidad de GEI (Estados Unidos y China que aportan cerca del 40% de las emisiones globales) se sometieron a lo establecido en la COP 21, estas naciones se comprometieron a desarrollar estrategias de desarrollo bajas en GEI a largo plazo, siendo esta la primera vez que se llega a un acuerdo tan importante en la lucha contra el cambio climático [11].

Se estableció el 22 de abril del 2016 como la fecha en que se abrió a la firma de los Estados que han sido parte de la conferencia. En el año 2018 se planea un nuevo examen sobre las contribuciones que se realicen hasta ese momento y en el año 2020 entrarán en vigor el acuerdo [11].

Posteriormente a que entrara en vigor el Acuerdo de París, varios países han presentado las estrategias planeadas para lograr la reducción de emisiones que se plantearon en el acuerdo, ejemplos a resaltar son Canadá y Estados Unidos que presento la ruta a seguir para reducir sus emisiones al 80% en 2050 teniendo como base los niveles de emisión del 2005 [12].

Como se logra identificar en la Tabla 1 el Acuerdo de París presenta un mayor campo de actuación, porque vincula países en vías de desarrollo que no fueron tenidos en cuenta en el Protocolo de Kyoto y amplía los temas a trabajar, como resultado del avance en investigaciones de cambio climático que se ha presentado en los últimos años, teniendo en cuenta la adaptación, financiación climática y desarrollo y transferencia climática. Un mayor número de países están vinculados a este nuevo acuerdo, resaltando la participación de países como Estados Unidos y China que son los mayores emisores de GEI a nivel global [2] [10].

Tabla 1. Principales diferencias entre el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de Paris

Principales diferencias entre el P. de Kyoto y el A. de Paris		
	Kyoto	**Paris**
Universalidad	El Protocolo de Kyoto presentaba compromisos solo para países desarrollados	En el nuevo acuerdo se vinculan países desarrollados y en vías de desarrollo
Estados Unidos	No fue ratificado por Estados Unidos y China	Fue ratificado por Estados Unidos y China
Sanciones	Se establecían sanciones para las naciones que no cumplieran con lo establecido	No se establecen sanciones
Actuación	Principalmente se habla de mitigación	Se habla de adaptación, financiación climática y desarrollo y transferencia climática
Período	Primer período: 1997 - 2012	Revisión del acuerdo cada 5 años

Fuente: Elaboración propia con base en datos de las Naciones Unidas [12].

2.5. Panorama y Estrategia Nacional para el Cambio Climático

El país asumió una serie de compromisos para reducir la emisión de GEI a partir de los tratados internacionales de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)-1992 y el Protocolo de Kyoto-1997, ratificándolos en la Ley 164 de 1995 y la Ley 629 de 2000 respectivamente [13].

En virtud de la CMNUCC el país garantiza [13]:

- Recoger y compartir la información sobre la emisión de GEI, las políticas nacionales y las prácticas óptimas [13].

- Poner en marcha estrategias nacionales para abordar el problema de las emisiones de GEI y adaptarse a los efectos previstos, incluida la prestación de apoyo financiero y tecnológico a los países en desarrollo [13].

- Cooperar para prepararse y adaptarse a los efectos del cambio climático [13].

Con base en el diagnóstico realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT-2002), en el cual se revisó la capacidad institucional para abarcar los compromisos derivados de la CMNUCC y del Protocolo de Kyoto, se creó en 2002 la Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático, que hoy corresponde al Grupo de Mitigación de Cambio Climático del MAVDT, como instancia institucional específica que concentra y articula las acciones de mitigación con los temas de cambio climático a nivel nacional [13].

En términos generales, algunos planes y políticas que tienen en cuenta acciones para la mitigación del cambio climático son: el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2002- 2006. Hacia un Estado comunitario; la estrategia institucional para la venta de servicios ambientales derivados de la mitigación de cambio climático (Conpes 3242); el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006-2010 -Estado comunitario: desarrollo para todos; Visión Colombia II Centenario 2019; y los acuerdos de cooperación multilateral (principalmente relacionados con proyectos MDL) [13].

Adicionalmente se vienen desarrollando esfuerzos a nivel legislativo como el reciente Decreto 298 de 2016 que establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) que busca tener un control sobre los distintos proyectos y programas que tengan que ver con la adaptación al cambio climático y GEI. Una parte importante del Decreto es la conformación de nodos regionales que permitan coordinar acciones de mitigación de los GEI y proyectos que traten el tema de cambio climático [14].

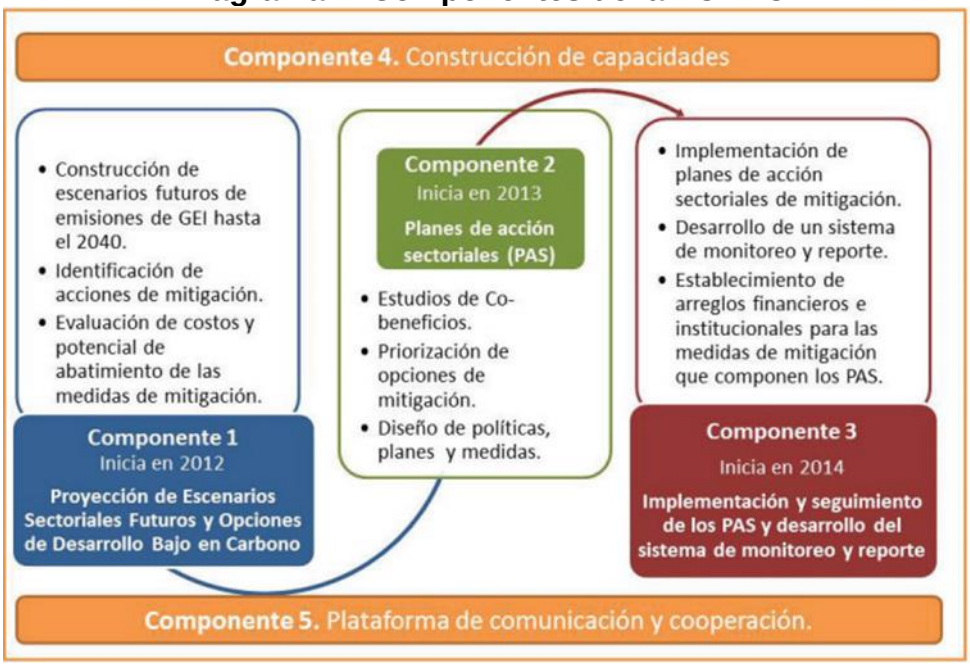
2.6. Estrategia Nacional de Desarrollo Baja en Carbono (ECDBC)

La ECDBC es un programa gubernamental liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en cabeza de la Dirección de Cambio Climático. El desarrollo del programa es a corto, mediano y largo plazo buscando identificar y valorar acciones que eviten el aumento de las emisiones de GEI [4].

Para el desarrollo de la ECDBC se han establecido cinco componentes. Los primeros 3 componentes se desarrollan de manera consecutiva, mientras que los dos últimos son transversales al desarrollo del proceso, como se evidencia en el están establecidas las fechas de inicio de los 3 primeros componentes, comenzando en el año 2012 con la proyección de los escenarios sectoriales y las opciones que existen de desarrollo bajo en carbono, terminando en el año 2014 con la implementación y seguimiento de los PAS y desarrollo de sistema de monitoreo .

Diagrama 1 donde están establecidas las fechas de inicio de los 3 primeros componentes, comenzando en el año 2012 con la proyección de los escenarios sectoriales y las opciones que existen de desarrollo bajo en carbono, terminando en el año 2014 con la implementación y seguimiento de los PAS y desarrollo de sistema de monitoreo [4].

Diagrama 1. Componentes de la ECDBC.



Fuente: [4].

- Primer Componente: Este componente busca la identificación y formulación de alternativas de desarrollo bajo en carbono para cada sector, esto se pretende hacer mediante estudios de costos de reducción de emisiones y del trabajo

desarrollado en las mesas con expertos en cada sector. Los resultados obtenidos de este componente son escenarios futuros de emisiones de GEI hasta el año 2040 identificando las acciones de mitigación por cada sector, evaluando los costos, el potencial y el co- beneficio de las medidas de mitigación previamente identificadas [4].

- Segundo Componente: Este componente busca el diseño y desarrollo de los PAS liderado por el MADS y trabajando conjuntamente con los Ministerios de Agricultura, Minas y Energía, Transporte, Comercio, Industria y Turismo, y Vivienda, ciudad y territorio para lograr la implementación de estos planes en corto, mediano y largo plazo [4].

- Tercer Componente: El objetivo de este componente es el diseño y establecimiento del sistema de monitoreo y reporte, que pueda realizar un seguimiento a todos los componentes de los PAS, teniendo en cuenta los avances, inversión, emisiones de GEI reducidas y co-beneficios entre otros [4].

- Cuarto Componente: En el año 2012 comenzaron las acciones para desarrollar este componente con las reuniones de expertos en cada sector productivo, en estas reuniones se construyeron y socializaron las capacidades que tenía cada sector respecto a la mitigación de cambio climático y la adaptación de la ECDBC, adicionalmente se logró una retroalimentación por parte de los actores principales en cada sector productivo desde la parte pública y la parte privada [4].

- Quinto Componente: En el último componente se busca la creación de una plataforma de comunicación y cooperación internacional, fortaleciendo de esta manera los acuerdos establecidos a nivel internacional que promueven el desarrollo integral de los objetivos de la ECDBC [4].

2.7. Calculadora 2050

La calculadora es una herramienta desarrollada dentro del marco de la ECDBC, la cual permite modelar escenarios de reducción de las emisiones de GEI, a través

de un balance de oferta y demanda de energía, y diferentes medidas de reducción de emisiones de GEI. Con el objetivo de disminuir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar el uso de energías renovables [15].

Adicionalmente, la calculadora permite identificar una serie de escenarios que puedan ser posibles en el futuro, esta herramienta es de acceso libre y cualquier persona puede desarrollar los supuestos de una modelación.

Para la construcción de esta herramienta se basaron en las calculadoras internacionales. Adicionalmente se realizaron estudios encabezados por la Universidad de los Andes y reuniones con paneles de expertos de cada uno de los sectores productivos incluidos en la calculadora, para establecer las acciones que debían ser implementadas dando veracidad a los resultados de la herramienta. La calculadora dispone de una herramienta en Excel que presenta las distintas acciones que fueron tenidas en cuenta para la construcción de las medidas implementadas en la herramienta web, adicionalmente se encuentra el cálculo de cada variable que fue utilizada para obtener las medidas.

Se decidió trabajar con la calculadora de carbono 2050 porque es una herramienta desarrollada por el MADS que contempla información verídica del comportamiento que pueden presentar los sectores nacionales en periodos de 5 años desde 2010 hasta 2050, calculando las emisiones de GEI a partir de los factores de emisión correspondientes establecidos en FECOC (Factores de Emisión de Combustibles Colombianos).

2.8. Inventario Nacional de GEI.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), MADS, DNP realizaron el Inventario Nacional de GEI para el año 2012 teniendo en cuenta la metodología del IPCC con el objetivo de reportar resultados que permitan ser comparados entre todos los países. Los principales grupos en los que se dividen las emisiones son: las provenientes del sector de la energía, procesos industriales, agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) y residuos [16].

En el documento se hicieron estimaciones de: CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, CO, NO_X, COVDM, SO_X [16].

Tabla 2. Porcentaje de CO2 equivalente generadas de GEI en Colombia por Sectores y principales actividades.

Categorías Principales	Porcentaje
Energía	44
Agricultura y otros usos de la tierra	43
Residuos	8
Procesos Industriales	5

Fuente: **[16]**.

Los resultados generales del inventario de emisiones son presentados en la Tabla 2 en la que se muestra el porcentaje de CO2 equivalente y las actividades que inciden en cada sector, siendo el sector energético el que mayor porcentaje emite (44%), seguido por AFOLU (43%), el tercer sector con mayor generación es el de residuos y por último se presenta el sector de procesos industriales (5%). El resto de actividades que no aparecen en la tabla y que completan el total del porcentaje, presentan un valor que no es significativo y por lo tanto no es tenido en cuenta en los resultados finales [16] .

2.9. IPCC.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 buscando proporcionar evaluaciones acertadas de carácter científico, técnico y socioeconómico en el tema de cambio climático. Con el paso del tiempo se han generado cinco informes de evaluación que son de carácter público, generando grandes contribuciones en los temas de impacto, adaptación, mitigación y vulnerabilidad frente al cambio climático. Adicionalmente de los informes de evaluación el IPCC genera informes especiales sobre temas específicos como impacto del cambio climático sobre una región específica o escenarios de emisiones, este último tema tiene una serie de análisis y apoyos a los países que busquen hacer estos escenarios ya que presenta una hoja de ruta

a seguir para la realización de estos informes y obteniendo gran información presentada de la misma forma [17].

Uno de los principales documentos generado por el IPCC son las directrices para inventarios nacionales de GEI en 2006 como una actualización del trabajo realizado en 1996 por invitación de la CMNUCC, con esto busca brindar metodologías internacionalmente acordadas para generalizar la información sobre las emisiones de GEI de cada país. En las directrices presentadas se realiza una introducción a los escenarios de cambio climático, los posibles métodos de estimación, la estructura que debe tener el documento, la calidad de los datos presentados, la compilación de información y la estructura del documento facilitando así el manejo de los datos presentados [18].

2.10. Árboles de cálculo.

Los árboles de cálculo son herramientas que permiten determinar los posibles resultados de un proceso, conociendo los datos, variables o elementos que forman parte del desarrollo del cálculo. Se presentan como ilustraciones gráficas que permiten identificar una visión sencilla y organizada, que proporciona una mayor comprensión de la forma en que se programa y establecen los cálculos para obtener los resultados. Se establecen los siguientes tipos de datos [15]:

- Variable de entrada: son datos establecidos a partir de los niveles de ambición correspondientes a cada medida, estos son estipulados de manera previa en una línea de tiempo desde 2010-2050 [15].

- Variable calculada: son resultados de operaciones matemáticas entre los datos establecidos para el modelamiento de cada medida dentro de la calculadora de carbono 2050 [15].

- Outputs (salidas): son aquellos resultados finales obtenidos de un sector, estos pueden ser utilizados en otras medidas [15].

- Supuestos fijos: representan valores obtenidos de fuentes confiables que soportan información técnica para ser utilizada en cálculos intermedios [15].

- Variable intersectorial: son datos calculados que pueden ser transversales para obtener resultados de diversos sectores que presentan correlación [15].

- Constante global: Valores estándar utilizados en la totalidad del modelo sin discriminar su procedencia [15].

En el proyecto actual los árboles de cálculo fueron empleados para representar gráficamente el procedimiento que tiene cada una de las medidas que fueron seleccionadas mediante una revisión bibliográfica, dimensionando los procesos que cada una de estas medidas presentaba.

2.11. Escenario BAU.

El escenario BAU proyecta las emisiones de GEI basado en los patrones y niveles de actividad actuales, este escenario sirve como base para determinar el impacto resultante de una medida o acción implementada y su comportamiento con el paso de los años [19].

Para la estimación de las proyecciones del escenario BAU el MADS realizó reuniones con expertos de cada sector productivo, teniendo en cuenta supuestos macroeconómicos, análisis de políticas actuales y prospectivas e información del IDEAM sobre la trayectoria que han tenido las emisiones de GEI históricamente. Adicionalmente este escenario proyecta esfuerzos de aumento de eficiencia energética en los sectores industrial, residencial y comercio, planteando una reducción en las emisiones fugitivas por la producción de petróleo y tendencias de una baja tasa de deforestación en escenarios de un post-conflicto [19].

2.12. Plan de expansión de referencia generación- transmisión (2015-2029).

Cada año la UPME realiza la revisión del Plan de expansión de los recursos de generación y de las redes de transmisión, con base en los planteamientos realizados de infraestructura eléctrica actual, proyectos de construcción, proyecciones nacionales y regionales de demanda de energía y potencia, recursos energéticos nacionales y fuentes no convencionales de energía renovable [20].

El Plan de expansión considera la diversificación de la matriz de generación de electricidad, adicionalmente el último plan de expansión (2015 – 2029), presenta un mejoramiento en la metodología de modelación de las fuentes renovables de la que resulta una reducción de costo marginal de la demanda, ofreciendo confiabilidad y un desplazamiento de la generación con precios más altos [20].

Teniendo en cuenta la dotación de recursos naturales, el registro de proyectos y las solicitudes de conexión en el país, la UPME estableció 8 posibles escenarios para la matriz energética de generación que presentaron como resultado una demanda entre 4208 y 6675 megavatios de expansión adicionales a los definidos mediante el cargo por confiabilidad para la próxima década [20].

2.13. Cargo por Confiabilidad.

Es un esquema de remuneración que posibilita aumentar la viabilidad de inversión en los recursos de generación eléctrica que son necesarios para asegurar el suministro de energía en situaciones de escasez. En este sistema se subasta entre los generadores la oferta de energía firme requerida para abastecer el sistema. El generador recibe una remuneración con la cual se garantice la prestación del servicio cuando el precio de la bolsa supere el umbral del precio de escasez, es decir, cuando la generación de energía hidráulica disminuye [21] [22].

3. METODOLOGÍA

El estudio que comprende esta tesis busca formular un escenario de mitigación al cambio climático para un sector en Colombia en una línea de tiempo desde el año 2010 hasta 2030, con la finalidad de ser un preámbulo para determinar el estado del sector en cuanto a las reducciones propuestas en la COP21 del 20% con respecto al escenario BAU, y así denotar si es viable alcanzar este propósito desde el sector que mayores emisiones de GEI genera. Para esto fin fue necesario plantear las siguientes etapas:

En la **primera etapa** se llevó a cabo una revisión bibliográfica del Inventario Nacional de GEI de Colombia 2012, sobre las principales fuentes generadoras de emisiones. Identificando el sector que mayores emisiones genera, y estableciendo las medidas que conlleven a una reducción en las emisiones de GEI para el año 2030 para alcanzar uno de los compromisos adquiridos por Colombia en la COP 21 [23].

En la **segunda etapa** se llevó a cabo una revisión bibliográfica para determinar las acciones llevadas a cabo por el gobierno nacional respecto al comportamiento del sector energético para el año 2030.

En la **tercera etapa** se realizó una revisión a la herramienta Excel de la Calculadora de carbono 2050 de Colombia, para determinar la relación existente entre las medidas seleccionadas en la primera etapa con las acciones establecidas por el modelo de la calculadora.

En la **cuarta etapa** se lleva a cabo una revisión a las herramientas web de las diferentes calculadoras de carbono 2050 que existen a nivel mundial (Bélgica, China, Corea del Sur, India, Indonesia, Japón, México, UK, Sur África, Taiwán), con el fin de determinar acciones que contengan las medidas de interés, y así denotar el modelamiento en otros países con respecto a las variables que se quieren adicionar y como estas pueden ser usadas en Colombia.

En la **quinta etapa** se desarrollaron los árboles de cálculo para identificar las acciones de las calculadoras de carbono 2050 de Colombia e internacionales que se relacionen con las medidas identificadas en la primera etapa, con el fin de lograr un análisis más detallado y preciso del funcionamiento de los modelos. Posteriormente se buscó una relación entre los árboles para construir las nuevas acciones, además de establecer los cambios pertinentes en las medidas que se vean afectadas por las nuevas variables. En esta etapa se identifican las medidas para reducir las emisiones de GEI en el sector energético y los parámetros relevantes para su modelación, cumpliendo así el primer objetivo específico.

En la **sexta etapa** se desarrollaron reuniones con el MADS para validar los modelos implementadas en la herramienta Excel de la calculadora de carbono 2050 Colombia con las nuevas acciones, adicionalmente se establecen los parámetros para que esta herramienta sea divulgada en la web del MADS. En esta etapa es publicada la herramienta Excel de la calculadora de carbono 2050 en la web donde son incluidos las nuevas medidas y los cambios realizados; cumpliendo así con el segundo objetivo específico.

En la **séptima etapa** se generó un modelo en la calculadora de carbono 2050 de Colombia con las acciones de esta herramienta que presentan relación con el sector establecido en la primera etapa y las Directrices para los Inventarios Nacionales de GEI del IPCC. Incluyendo las medidas establecidas en la quinta etapa y teniendo en cuenta las proyecciones de demanda para electricidad y combustibles de la UPME. Posteriormente se desarrollaron los cálculos de emisiones de GEI del nuevo modelo implementado. Cumpliendo así con el tercer objetivo específico.

En la **octava etapa** se cuantificará la diferencia emitida de GEI entre el escenario construido y el escenario BAU con respecto a la reducción del 20% de las emisiones proyectadas para el año 2030, y se establecieron las fuentes del sector energético en las que hace falta desarrollar más acciones en caso que la reducción no sea la esperada. Cumpliendo así con cuarto objetivo específico y el objetivo general.

Diagrama 2. Metodología.

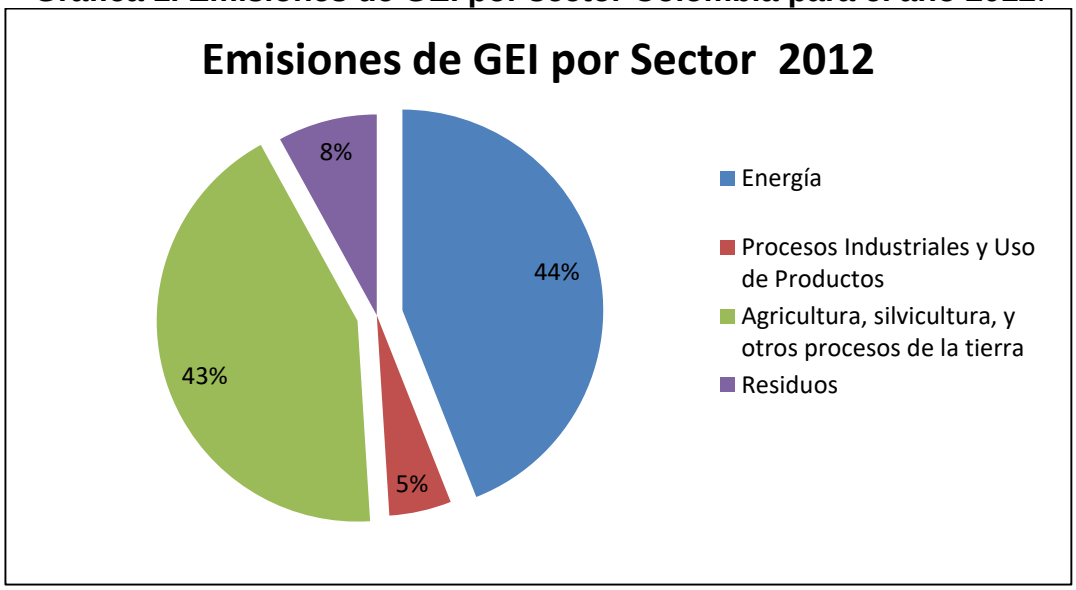
Fuente: Elaboración propia.

4. ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GEI PARA EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO.

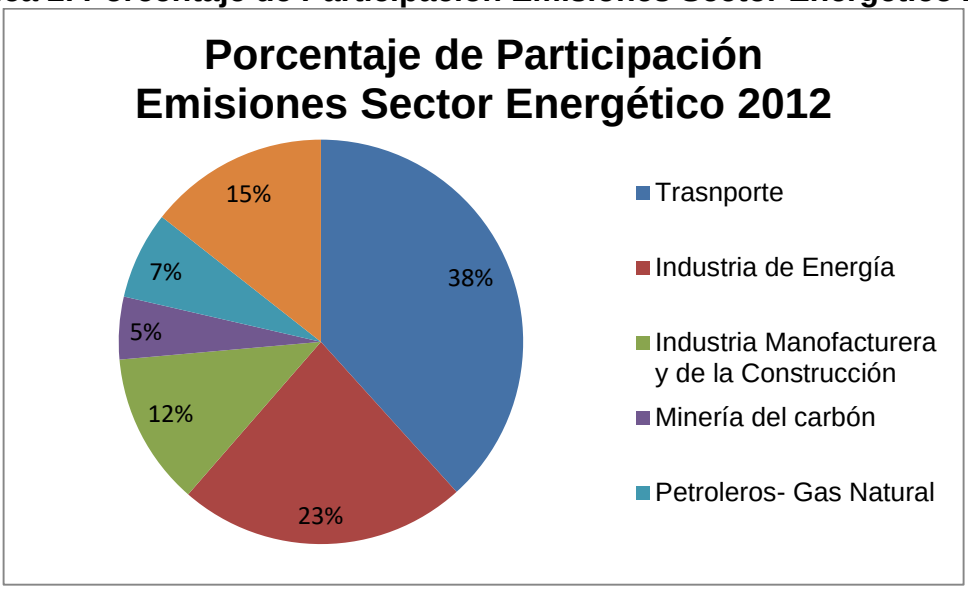
Se logra identificar en la Gráfica 1 que para el año 2012 los sectores que mayores emisiones de GEI generaron son el sector energético y AFOLU con el 87% de las emisiones nacionales. Al analizar el comportamiento histórico entre el 2004 y el 2012 se denota que el sector energético presenta un aumento del 24% en las emisiones de GEI representadas en 15 Mton CO_2eq, dejando de generar el 31% para el 2004 a generar el 44% de las emisiones nacionales para el año 2012; en comparación con el sector AFOLU para el mismo periodo de tiempo se presentó una disminución del 35% en las emisiones representadas en 42 Mton CO_2eq, dejando de generar el 59% para el 2004 a generar el 43% de las emisiones nacionales para el año 2012. Por lo anterior se considera que el sector energético es el más propicio para establecer medidas ya que históricamente tiende a presentar un aumento constante en las emisiones de GEI, a diferencia del sector AFOLU que presenta un decrecimiento en las emisiones generadas [16].

Gráfica 1. Emisiones de GEI por sector Colombia para el año 2012.



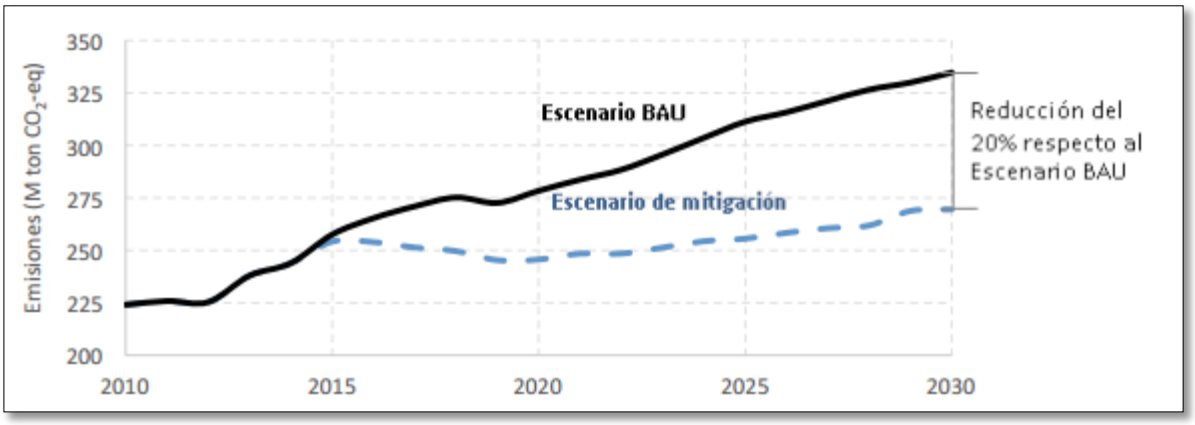
Fuente: [16].

Gráfica 2. Porcentaje de Participación Emisiones Sector Energético 2012.



Fuente: [16].

Gráfica 3. Reducción de emisiones con respecto al escenario BAU para el año 2030.



Fuente: [23].

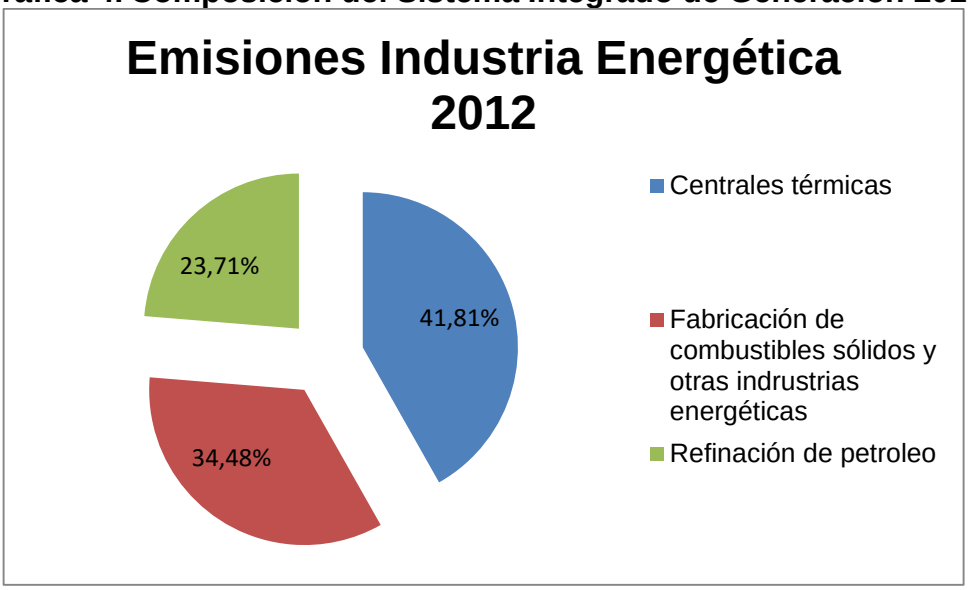
Las emisiones correspondientes al sector energético tienen la participación de la industria de la energía, transporte, industria manufacturera y de la construcción, y emisiones fugitivas, que representan el 44% de las emisiones nacionales con una distribución en el sector que se encuentra representado en la Gráfica 2; se logra identificar a la industria de la energía y al sector transporte como los mayores emisores de GEI del sector energético con un acumulado del 61%, que representa

el 29% de las emisiones nacionales para el año 2012, por lo que tomar medidas con respecto a estos dos sería fundamental para poder reducir el 20% de las emisiones nacionales proyectadas para el año 2030 como se muestra en la Gráfica 3 [16] [23] [24].

4.1.1. Industria de la Energía.

Para la industria de la energía se determinó que el 41,81% de las emisiones generadas se deriva de las centrales térmicas utilizadas para la producción de electricidad como se logra identificar en la Gráfica 4 representando el 12% de las emisiones nacionales, por lo que reducir la participación de las centrales termoeléctricas en la matriz eléctrica nacional reduciría las emisiones de GEI de manera fundamental [16].

Gráfica 4. Composición del Sistema Integrado de Generación 2015.

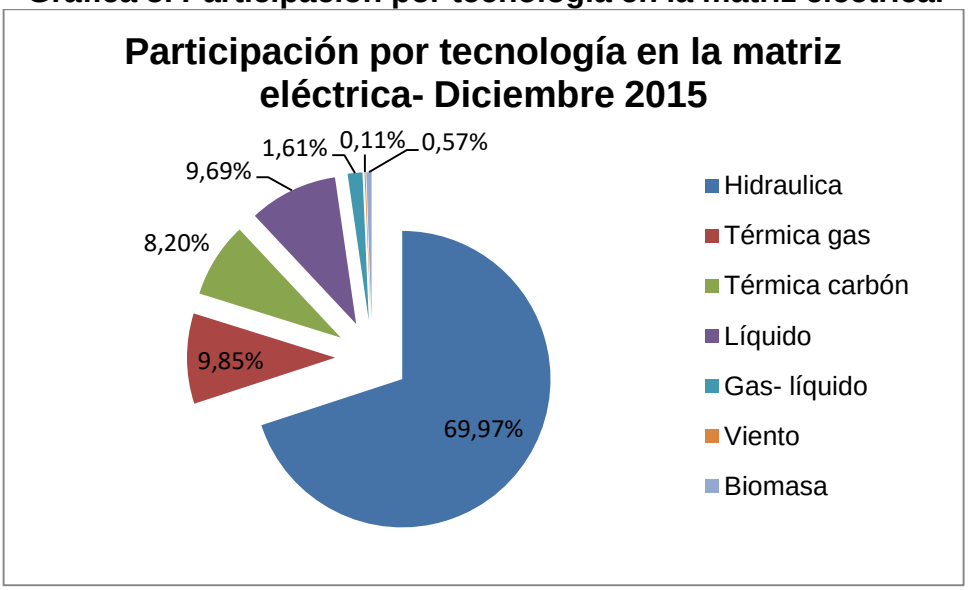


Fuente: Elaboración propia basado en datos del Inventario Nacional de Emisiones 2015 [16].

En el informe correspondiente al mes de diciembre del año 2015 sobre generación y mercado eléctrico colombiano publicado por la UPME, se logra identificar la generación por tipo de tecnología en el Sistema Integrado Nacional representada

en la Gráfica 5. Las centrales termoeléctricas presentan una participación del 28,58% en la matriz eléctrica, siendo la segunda fuente más importante en generación de energía eléctrica del país precedida por la hidráulica que genera el 69,97%, lo que implica que ante una reducción del recurso hídrico se presentaría un aumento en las emisiones del sector energético ya que aumenta la producción de energía eléctrica por centrales térmicas [25].

Gráfica 5. Participación por tecnología en la matriz eléctrica.



Fuente: [25].

La

Tabla 3, muestra los factores de emisión correspondientes a los diferentes recursos utilizados en las centrales térmicas, estos valores fueron establecidos por la UPME a través de FECOC, en dicha tabla se logra identificar al bagazo con un factor de emisión de 112929,718 para el CO_2. Este valor es informativo ya que como establece el IPCC en el documento Directrices Para Inventarios Nacionales de GEI estas emisiones son contabilizadas en el sector AFOLU por tratarse de la combustión de biomasa y con el fin de no hacer un doble conteo, las emisiones de CH_4 y N_2O se contabilizan y declaran en el sector energético. Identificando así al bagazo como el recurso que menores emisiones genera para la producción de energía eléctrica en centrales térmicas; adicionalmente se identifica al carbón como la mayor fuente de emisiones de GEI seguido por el ACPM y en tercer lugar el gas natural [25] [18].

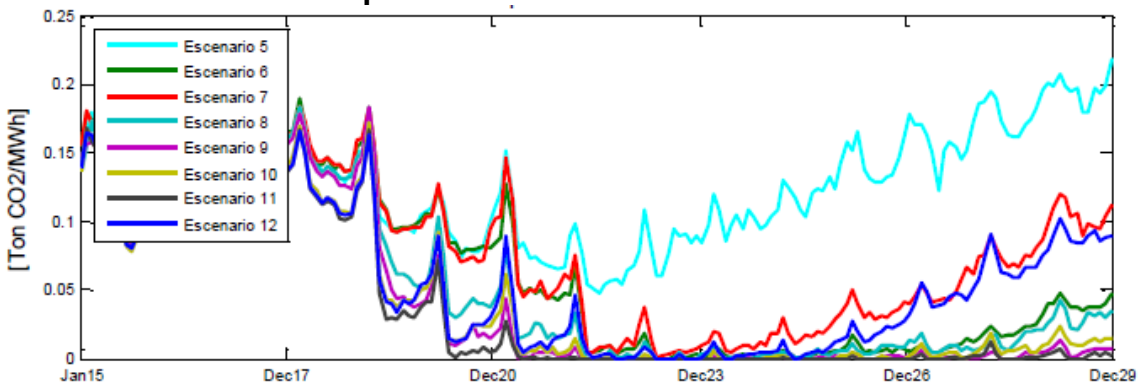
Para determinar la variación en la matriz eléctrica nacional para el año 2030 se llevó a cabo una revisión del Plan de Expansión de Referencia (Generación-Transmisión) 2015-2029 de la UPME, donde se plantean diferentes escenarios respecto a la generación eléctrica teniendo en cuenta la demanda proyectada, la disponibilidad de recursos, los proyectos a corto y largo plazo, y los costos por tipo de tecnología. Dentro de los escenarios a largo plazo planeados por el Plan de Expansión se identifica que el número 11 es el que presenta un menor factor de emisión como se hace notorio en la Gráfica 6 [20].

Tabla 3.Factores de emisión para el sector energético para cada tipo de recurso utilizado en centrales térmicas.

Recurso	Factor de emisión [Kg/TJ]		
	CO2	CH4	N2O
Bagazo	112929,7	30	4
Carbón	88136,06	1	1,5
ACPM	74293,48	1	0,6
Gas Natural	55539,09	1	3

Fuente: Elaboración propia basado en datos de FECOC [26].

Gráfica 6. Valor Esperado Factor de Emisión Escenarios a Largo Plazo Plan de Expansión de Referencia 2015-2029.



Fuente: [20].

En la Tabla 4 se observan las diferencias entre el Escenario 5 (Escenario con mayor factor de emisión) y el Escenario 11 (Escenario con menor factor de emisión) que en comparación a la capacidad total instalada para el año 2029, el Escenario 11 es el que mayor energía llega a producir ya que en este se tienen en

cuenta las fuentes no convencionales como la energía eólica, solar y geotérmica (con una capacidad instalada de 3420,2 MW) que en el Escenario 5 no están contempladas.

Al tener una mayor participación de fuentes convencionales como el ACPM, carbón y gas natural el Escenario 5 presenta un mayor factor de emisión, mientras que el Escenario 11 al suplir parte de la demanda energética con fuentes no convencionales disminuye la participación del carbón como fuente de generación de energía eléctrica, dándole un papel más importante a la energía eólica, lo que reduce las emisiones de GEI.

Tabla 4. Comparación de la Capacidad Instalada del Escenarios 5 y 11 del Plan de Expansión Referencia 2015- 2029.

Recurso	Base (MW)	Escenario 11			Escenario 5		
		Cargo por confiabilid	Expansión adicional	Total (MW)	Cargo por confiabilid	Expansión adicional	Total (MW)
Hidráulica	10315	1771,1	2173,8	14259,9	1771,1	1596,8	13682,9
Gas	3809,2	0	0	3809,2	0	115	3924,2
Carbón	717	574	0	1291	574	1700	2991
Menores	707,6	0	796,6	1504,2	0	796,6	1504,2
Cogeneración	77,2	0	285	362,2	0	0	77,2
Eólica	0	0	3131	3131	0	0	0
Solar	0	0	239,2	239,2	0	0	0
Geotérmica	0	0	50	50	0	0	0
Líquidos	0	88,3	0	88,3	88,3	0	88,3
TOTAL	15626	2433,4	6675,6	24735	2433,4	4208,4	22267,8

Fuente: Elaboración propia basado en datos de la UPME [20].

En la Tabla 5 se logra identificar que la expansión por tipo de recurso con respecto a la capacidad instalada para el año 2029 no presenta un aumento en el uso de combustibles líquidos para la generación de energía eléctrica, esto debido al aumento en la capacidad instalada en energía hidráulica, cogeneración, eólica y de plantas menores, además del aprovechamiento de nuevos recursos como la energía solar y geotérmica [20].

Identificadas las centrales térmicas como la mayor fuente emisora de GEI de la industria de la energía y en relación con el Escenario 11 del Plan de Expansión de Referencia (2015- 2029) de la UPME, se logra establecer que recursos como el gas natural y el carbón no presentan ningún aumento en la participación de la

matriz energética para el año 2029, y el ACPM no presenta una expansión para generar energía eléctrica, mientras que el bagazo presenta un aumento del 400% en la capacidad instalada para el año 2030 en relación al año 2015 [20].

Tabla 5. Expansión adicional matriz eléctrica para 2029 Escenario 11- Plan de Expansión de Referencia (2015-2029)

Recurso	Base [MW]	Cargo por confiabilid	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10315	1771,1	2173,8	14259,9
Gas	3809,2	0	0	3809,2
Carbón	717	574	0	1291
Menores	707,6	0	796,6	1504,2
Cogeneración	77,2	0	285	362,2
Eólica	0	0	3131	3131
Solar	0	0	239,2	239,2
Geotérmica	0	0	50	50
Otros	0	88,3	0	88,3
TOTAL	15626	2433,4	6675,6	24735

Fuente: [20].

Se establece al bagazo como un recurso fundamental para reducir las emisiones de GEI en las centrales térmicas, ya que presenta el menor factor de emisión en comparación con los otros recursos utilizados, además de presentar un incremento en la capacidad instalada para el año 2029 en relación al Escenario 11 del Plan de Expansión de Referencia (2015- 2029) de la UPME, lo que permite que el ACPM no presente un aumento en la capacidad instalada para la generar energía eléctrica y que fuentes como el gas natural y el carbón no aumenten su capacidad instalada. [20].

4.1.1.1. Revisión de la Calculadora de carbono 2050 de Colombia para la Industria Energética.

Al Identificar al bagazo como el tipo de recurso para reducir las emisiones de GEI en las centrales térmicas se lleva a cabo una revisión a la herramienta Excel y web de la calculadora de carbono 2050 de Colombia, donde se logra establecer una relación con la medida Gestión Energética en Termoeléctricas que establece 4

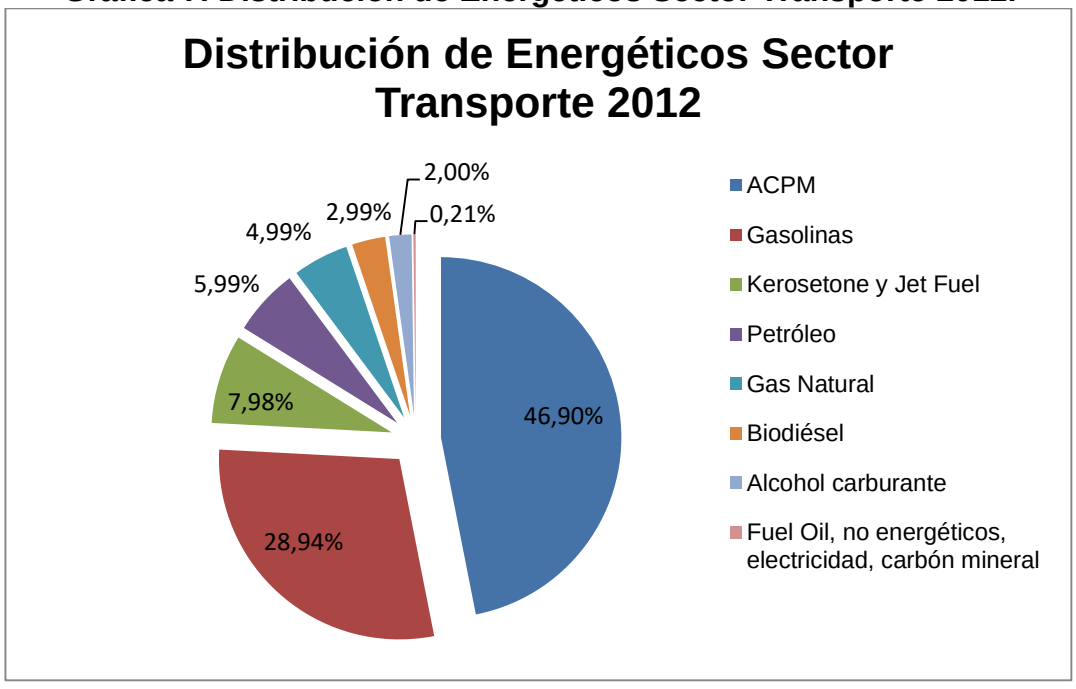
niveles de ambición para la generación de energía eléctrica en centrales térmicas, a partir de cuatro recursos: biomasa, ACPM, gas natural y carbón; esta medida contempla los 4 recursos de manera conjunta.

4.1.2. Sector Transporte.

Para determinar medidas que disminuyeran las emisiones del Sector transporte, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para determinar la distribución de energéticos y su aporte para suplir la demanda. Identificando en la Gráfica 7 que el ACPM y las gasolinas suplen el 76% de la demanda del Sector Transporte para los modos: carretero, fluvial, marítimo, ferrovial y aéreo [27].

El 85,11% de las emisiones correspondientes al sector transporte son producidas por el modo carretero supliendo la demanda por los siguientes energéticos: ACPM, gasolinas, gas natural, biodiesel, alcohol carburante y los no energéticos, como se logra identificar en Tabla 6 [16] [27].

Gráfica 7. Distribución de Energéticos Sector Transporte 2012.



Fuente: [27].

Para poder disminuir las emisiones de GEI correspondientes al sector transporte se hace necesario reducir las emisiones derivadas del uso de ACPM (Diésel) y gasolinas, debido a que la UPME plantea en la Proyección de Demanda de Combustibles en Colombia, que el ACPM y la gasolina seguirán siendo fundamentales para los diferentes modos de transporte. Por lo que aumentar la participación de biocombustibles seria de vital importancia para reducir las emisiones de estos combustibles fósiles como se establece en el CONPES 3510 de 2008. En las Tabla 7 y Tabla 8 se hace notorio que a medida que se alcance una mezcla del 10% entre ACPM con biodiesel y gasolina con bioetanol las emisiones se verán reducidas [27] [28].

Tabla 6. Energéticos por Modo de Transporte.

Energético	Modo de transporte
ACPM	Carretero, fluvial, marítimo y ferroviario
Gasolinas	Carretero, aéreo y fluvial
Kerosetone y Jet Fuel	Aéreo
Petróleo	Marítimo
Gas Natural	Carretero
Biodiesel	Carretero
Alcohol Carburante	Carretero
Fuel Oil	Marítimo y ferroviario
No energéticos	Carretero, aéreo, fluvial, marítimo y ferroviario
Electricidad	Ferroviario
Carbón Mineral	Ferroviario

Fuente: [27].

Para el caso colombiano el Decreto 2930 de 2007 establece que el ACPM y la gasolina tendrán una mezcla del 10% con biocombustibles además que los vehículos diésel (fabricados, ensamblados, importados y distribuidos) puedan funcionar con una mezcla del 20% para el año 2012, y según establece el Decreto 1135 de 2009 el parque automotor todos los vehículos que usen para su funcionamiento gasolina (fabricados, ensamblados, importados y distribuidos) para el año 2016 deberán funcionar de manera adecuada con una mezcla del 85%. Fedebiocombustibles informa que la mezcla de biocombustibles no se realiza de acuerdo a lo establecido al Decreto 2930 de 2007 ya que en Colombia se venden diferentes mezclas dependiendo de la zona del país, encontrando gasolina que

presenta concentraciones del 8- 10% y el ACPM entre el 7- 10%, esto debido a que la alta demanda de combustibles no permite suplir los porcentajes de mezcla [29] [30] [31] [32].

Tabla 7. Emisiones para diferentes mezclas del ACPM con biodiesel.

Compuesto	Diesel (g/Kg de combustible)	B-5 (g/Kg de combustible)	B-10 (g/Kg de combustible)	B-20 (g/Kg de combustible)	B-100 (g/Kg de combustible)
Monóxido de Carbono	34,02	31	31	29	18
Dióxido de Carbono	3,123	3,11	3,093	3,05	2,813
Hidrocarburos (HC) (metano, butano, benceno, benzopireno, benzofluoranteno)	100	96	92	89	40
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	15,22	15	17,94	18,29	14

Fuente: [33]

Tabla 8. Emisiones gasolina corriente y gasolina con una mezcla del 10% con bioetanol.

Compuesto	Gasolina corriente (g/kWh)	E-10 (g/kWh)
Monóxido de Carbono	59,1	49,5
Dióxido de Carbono	83,7	82,6
Hidrocarburos (HC) (metano, butano, benceno, benzopireno, benzofluoranteno)	4,1	3,5
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	2,5	2,2

Fuente: [33].

Se identifica a los biocombustibles como la fuente para reducir las emisiones de GEI derivadas de la combustión de ACPM y gasolina en el sector transporte, por lo que se establece llevar a cabo una revisión de la herramienta Excel y web de la calculadora de carbono 2050 de Colombia.

4.1.2.1. Revisión de la Calculadora de carbono 2050 de Colombia para el Sector transporte.

Se desarrolló una revisión de las herramientas Excel y web de la Calculadora de carbono 2050 con respecto a las medidas relacionadas con biocombustibles, logrando identificar que existen cuatro medidas que presentan relación: bioenergéticos, tierra dedicada para biocombustibles, transporte de pasajeros y transporte de carga. La medida bioenergéticos plantea una generación de energía a partir de diferentes tipos de residuos, tierra dedicada para biocombustibles desarrolla los cálculos correspondientes a los biocombustibles producidos a partir de unas áreas cultivadas y la generación de energía a partir de los residuos de estos cultivos, transporte de pasajeros y transporte de carga calculan la demanda de energía correspondiente a cada modo de transporte agrupándolos por energéticos (gasolina, diésel, gas natural y electricidad) [32] [15].

Se logró identificar que la generación de biocombustibles no presentó ninguna relación con el sector transporte, por lo que se hizo necesario plantear modificaciones que permitan generar una mezcla de los biocombustibles producidos con los combustibles fósiles demandados en los diferentes modos de transporte.

4.2. INCLUSIÓN DE LAS MEDIDAS ADICIONALES EN LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 COLOMBIA.

Para la inclusión de las nuevas medidas se contó con el apoyo de la Dirección de Cambio Climático del MADS, donde se lleva a cabo el manejo de la calculadora 2050, con quienes se establecieron reuniones de manera permanente para revisar los modelos desarrollados. Adicionalmente se construyeron los árboles de cálculo

correspondientes a las medidas de la calculadora de carbono 2050 de Colombia utilizadas en esta tesis ya que el MADS no contaba con esta información.

En primera medida se llevaron a cabo revisiones a las diferentes calculadoras de carbono 2050 del mundo para determinar las variables similares a generación de energía eléctrica a partir de bagazo y biocombustibles, estableciendo los parámetros pertinentes para su adecuada modelación y construyendo sus respectivos árboles de cálculo ya que esta información no se encontraba disponible.

4.2.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BAGAZO

La medida de energía eléctrica a partir de bagazo se llevó a cabo a través de una búsqueda en las diferentes calculadoras de carbono que existen a nivel mundial (Bélgica, China, Corea del Sur, India, Indonesia, Japón, México, UK, Sur África, Taiwán) encontrando que las medidas que presentaban una relación con la generación de energía eléctrica a partir de bagazo en centrales térmicas son: electricidad a partir de biomasa de la calculadora de carbono 2050 de México y centrales de ciclo combinado de la calculadora de carbono 2050 de Indonesia [34] [35].

Para el desarrollo del modelo se hicieron los árboles de cálculo a partir de las herramientas de Excel de las calculadoras correspondientes para las siguientes medidas: gestión energética en termoeléctricas de la calculadora de carbono 2050 de Colombia, electricidad a partir de biomasa de la calculadora de carbono 2050 de México y centrales de ciclo combinado de la calculadora de carbono 2050 de Indonesia, para identificar el respectivo funcionamiento de cada medida y analizar de manera detallada si se establecía alguna relación en los respectivos modelamientos [15] [34] [35].

En el árbol de cálculo correspondiente a electricidad a partir de biomasa de la calculadora de carbono 2050 de México (Anexo B) se logran identificar tres recursos para la generación de energía eléctrica: combustóleo, carbón- biomasa

(como un solo recurso), y gas natural; donde se establecen condicionales que regulan la oferta y la demanda, funcionando de la siguiente manera:

- Condicional de entrada, para determinar si es necesaria la generación de nueva energía a partir de la diferencia entre la oferta y la demanda, la oferta previa a este punto es producida por las fuentes de energía renovable disponibles en el país. En caso que el condicional dé como resultado que es necesario generar más energía eléctrica se procede a hacer el cálculo a partir de la capacidad instalada en combustóleo; en caso que no sea necesario producir más energía eléctrica la capacidad instalada de combustóleo, carbón-biomasa, y gas natural será 0.

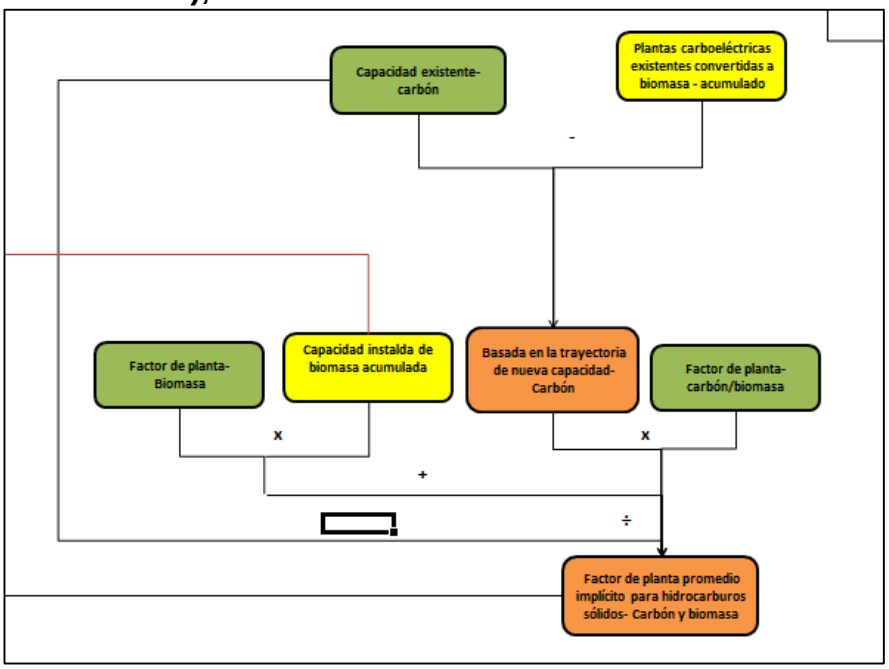
- En el segundo condicional se hace la resta de la oferta y la demanda, y al resultado se le resta la oferta efectiva de combustóleo para determinar si es necesario producir más energía eléctrica a partir de carbón y biomasa. En caso que sea necesario generar más energía eléctrica se procede al cálculo a partir de la capacidad instalada en carbón-biomasa; en caso que no sea necesario producir más energía eléctrica la capacidad instalada de carbón-biomasa, y gas natural será 0.

- En el tercer condicional se toma el valor correspondiente a la demanda remanente de la generación de combustóleo y carbón-biomasa, y se determinar si este valor es mayor a 0. En caso que el condicional de un valor mayor a 0 la electricidad generada con gas será igual a la demanda remanente; en caso que el valor sea menor a 0 no se genera energía eléctrica a partir de gas natural.

- A partir del análisis correspondiente a los condicionales se puede denotar una relación para la generación de energía eléctrica entre los diferentes recursos disponibles, dándole una prioridad a la generación por combustóleo seguido de carbón- biomasa y por último gas natural, lo cual tiene poca relación con la disminución de emisiones de GEI ya que se está priorizando las plantas con mayor factor de emisión [25] [35].

Se puede concluir que la modelación de la generación de energía eléctrica para los diferentes recursos en la calculadora de carbono de Colombia y México es similar, con la diferencia que en la segunda se hace necesario hacer cálculos para los factores de carga de las plantas, datos que el modelo colombiano ya posee, como es el ejemplo del Diagrama 3 donde se lleva a cabo el cálculo del factor de planta implícito para hidrocarburos sólidos (carbón- biomasa), cálculo que no es necesario en la calculadora de carbono 2050 colombiana ya que posee los datos correspondientes a factores de planta para biomasa y carbón que son calculados como variables independientes por lo que no se hace necesario un factor promedio para los dos tipos de planta.

Diagrama 3. Factor de Planta Implícito Para Hidrocarburos sólidos (Carbón-Biomasa), calculadora de carbono 2050 de México.

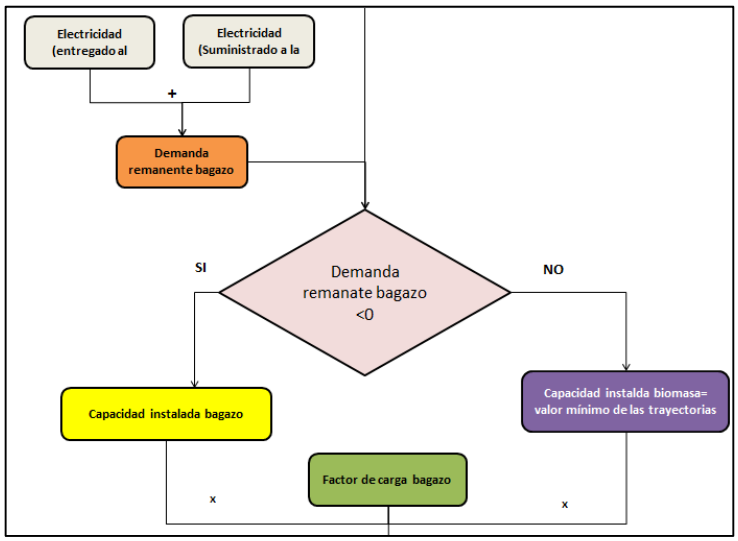


Fuente: Elaboración propia [35]

Para la nueva medida de generación de energía eléctrica a partir de bagazo (Anexo D) se utiliza como base el árbol de cálculo de gestión energética en termoeléctricas de la calculadora de carbono 2050 colombiana, añadiéndole condicionales como el que se muestra en el Diagrama 4, con el fin que cuando la oferta iguale la demanda las plantas operen con la menor capacidad instalada y así se reducirán las emisiones de GEI derivadas de su operación. Adicionalmente se priorizó la generación de energía eléctrica para aquellos recursos que tenían un

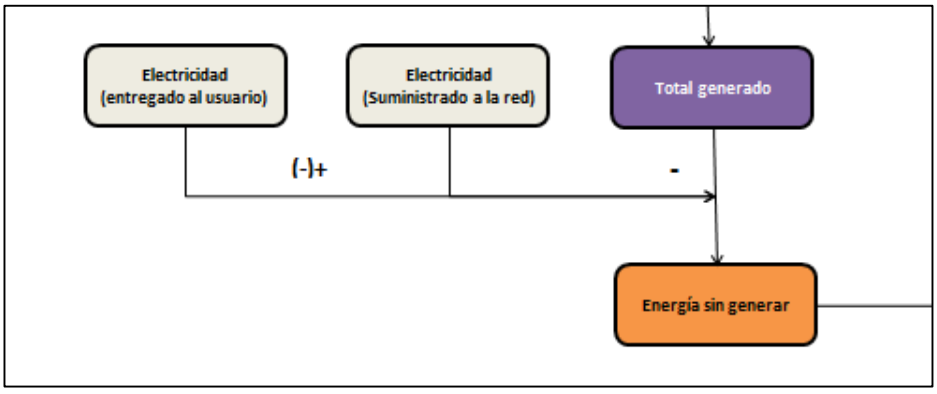
menor factor de emisión, obteniendo el siguiente orden: bagazo, gas natural, ACPM y carbón. Dentro del modelo se plantea que en caso que la oferta no iguale a la demanda la energía que no está siendo generada será producida con carbón, como se muestra en el Diagrama 5 para poder abastecer toda la demanda en Colombia [15].

Diagrama 4. Condicional para Nueva Medida de Gestión Térmica en Termoeléctricas.



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama 5. Energía Sin Generar Para Nueva Medida de Gestión Energética en Termoeléctricas

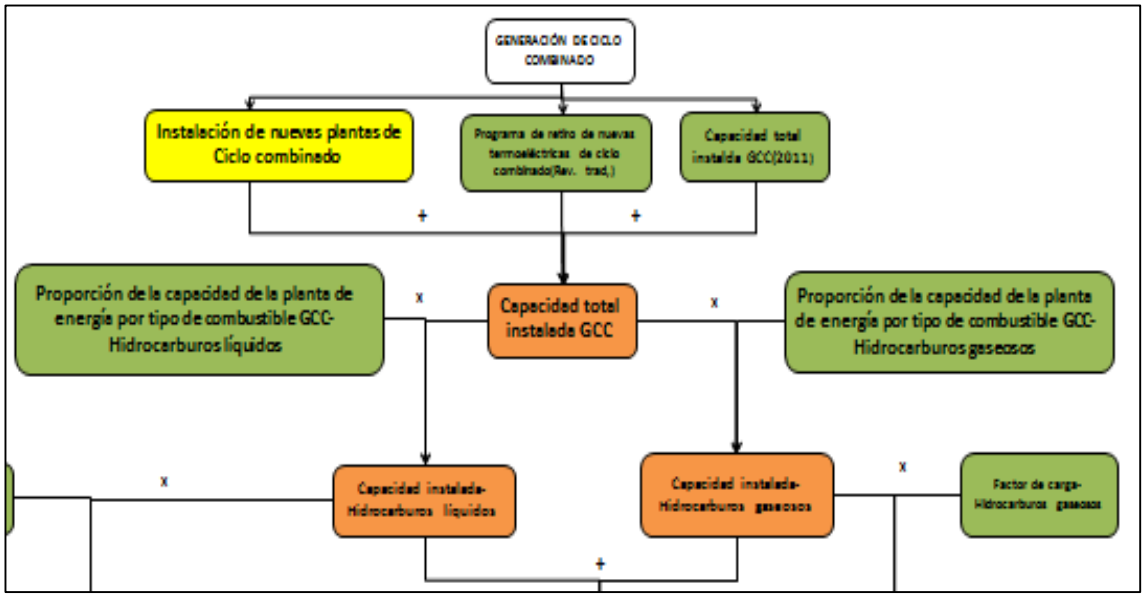


Fuente: Elaboración propia.

A partir del árbol de cálculo de Ciclo combinado de la calculadora de carbono de Indonesia (Anexo C) se logra determinar que no es posible establecer cambios para el modelo de generación de energía eléctrica a partir de bagazo ya que este funciona igual a la medida de Gestión Energética en Termoeléctricas, pero se asume que el 100% de la generación es por ciclo combinado y se calculan los porcentajes correspondientes de generación por combustibles líquidos y gaseosos como se muestra en el Diagrama 6**;** con los porcentajes correspondientes a los dos tipos de combustibles se asume la capacidad instalada y se empiezan los cálculos correspondientes a la generación de energía eléctrica igual que en el modelo colombiano.

La nueva medida desarrollada en relación a la generación de energía eléctrica a partir de bagazo se construirá dentro del mismo árbol de cálculo que la gestión energética (Anexo D), esto con el fin de priorizar aquellos recursos que tengan un menor factor de emisión y conlleve a la reducción de las emisiones de GEI de las centrales térmicas, esta nueva medida se planteó de la siguiente manera:

Diagrama 6. Generación Ciclo Combinado Calculadora de carbono Indonesia.



Fuente: Elaboración propia [34].

- Se utilizó como base el árbol de cálculo correspondiente a la Gestión Energética en Termoeléctricas de la calculadora de carbono 2050 de Colombia (Anexo A) ya que este plantea los cálculos para la energía generada, las emisiones de GEI y el consumo propio de las plantas.

- Se establecieron los condicionales antes mencionados con el fin de evitar emisiones de GEI innecesarias.

- Se priorizó la generación de energía eléctrica con recursos que tuviesen menor factor de emisión estableciendo el siguiente orden: bagazo, gas natural, ACPM y carbón.

- Se actualizó la información correspondiente a la capacidad instalada para el año 2015, ya que en el momento este no era un dato fijo, lo que generaba que se siguiera modelando dependiendo del nivel de ambición establecido en la calculadora de carbono 2050 Colombia.

4.2.2. BIOCOMBUSTIBLES

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de las calculadoras de carbono a nivel internacional, donde se encontró que las medidas que tenían una mayor relación con la nueva medida de bioenergéticas eran: Tierra dedicada para biocombustibles en la calculadora de carbono 2050 UK y Procesos de transformación de la bioenergía, presente en la calculadora de carbono 2050 de México, Bélgica, Indonesia, India y Corea del Sur [36] [35] [37] [34] [38] [39].

Para desarrollar el modelo se realizaron los árboles de cálculo de las medidas: tierra dedicada para biocombustibles, procesos de transformación de la bioenergía, transporte de pasajeros y transporte de carga presentes en la calculadora de carbono 2050 de Colombia a partir de la herramienta Excel (debido a que no existían estos árboles de cálculo), estas medidas fueron seleccionadas como base para la construcción de la nueva medida de biocombustibles ya que presentaban relación entre sí [15].

El árbol de cálculo que corresponde al proceso de transformación de bioenergía (Anexo E) permite identificar las corrientes que obtienen la energía producida y requerida de los procesos de bioenergía, a partir de: biomasa húmeda, biomasa seca, energía producida (cultivos energéticos de primera generación), energía producida (cultivos energéticos de segunda generación) y residuos gaseosos. A partir de estas cinco corrientes se establecen los hidrocarburos líquidos, sólidos y gaseosos producidos por cada una con el fin de determinar la cantidad de bioenergía suministrada por cada tipo de hidrocarburo.

El Anexo F árbol de cálculo de la medida de Tierra Dedicada para Biocombustibles elaborado a partir de la herramienta Excel de la calculadora de carbono 2050, presenta los dos recursos para la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiesel) que son producidos a partir del área sembrada de palma africana y caña de azúcar, y las respectivas proyecciones de crecimiento de acuerdo a las trayectorias previamente establecidas en la calculadora de carbono 2050 de Colombia. Se identifica que se llevaba a cabo el cálculo correspondiente a la energía que se podría generar a partir de los residuos de la generación de biocombustibles de caña de azúcar y palma africana, para el cálculo se utilizaron datos y supuestos fijos que están solventados en el trabajo de construcción de cada medida para la funcionalidad de la herramienta de cálculo, la mayoría de las operaciones realizadas en el desarrollo de la medida son simples operaciones aritméticas que obtienen la totalidad de la energía de biomasa del cultivo de palma africana y caña de azúcar, finalmente al sumar estos dos factores se obtienen los cultivos energéticos de primera generación que es la salida del árbol de cálculo de tierra dedicada para biocombustibles.

Los árboles de cálculo correspondientes al transporte de pasajeros y transporte de carga (Anexo G y anexo I respectivamente), establecen la demanda energética para cuatro tipos de energéticos (ACPM, electricidad, gasolina y gas natural), calculada a partir de tres supuestos para cada nivel de ambición que son: la distancia promedio de viaje para cada modo de transporte, la distribución para el total de viajes para cada modo de transporte y la distribución tecnológica para cada modo de transporte.

Se identificó que los árboles de cálculo de tierra dedicada para biocombustibles y bioenergéticos presentan relación para el cálculo del porcentaje de

aprovechamiento de los residuos derivados de los bioenergéticos y de los producidos de la producción de biocombustibles, además no presenta ninguna relación entre los biocombustibles producidos y los usados para las medidas del sector transporte (carga y pasajeros), lo que no permite reducir las emisiones derivadas de este sector por el porcentaje de mezcla establecido por el gobierno del 10% para gasolina y ACPM. [29].

Por lo anterior se implementaron condicionales para las medidas de transporte (pasajeros y carga) que permitieran hacer una mezcla de la demanda de gasolina y ACPM, con bioetanol y biodiesel respectivamente, funcionando de la siguiente manera:

- Se identifica la oferta energética en TWh generada por el bioetanol y biodiesel en la medida tierra dedicada para biocombustibles.

- A partir del total de la demanda energética de gasolina en TWh correspondiente al transporte de pasajeros, se calcula el porcentaje que la oferta energética de bioetanol podría abastecer.

- Se establece un condicional donde la mezcla de gasolina con bioetanol no sea mayor al 10%, en caso de que supere este porcentaje se resta únicamente el 10% para poder calcular el total de la energía de gasolina sin bioetanol, como se muestra en el Diagrama 7 correspondiente al anexo H nueva medida transporte de pasajeros.

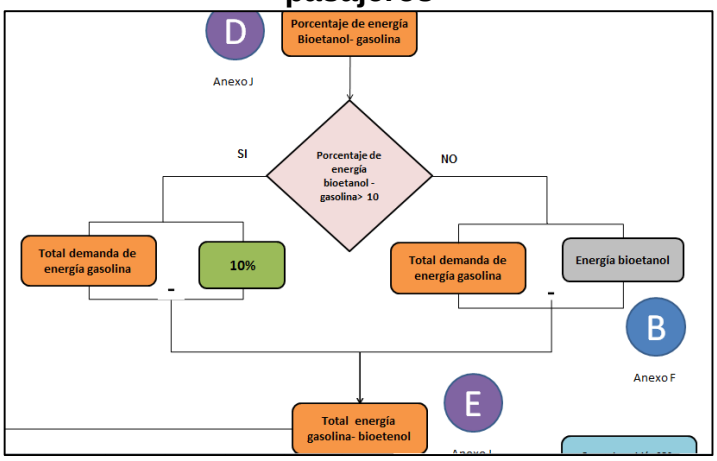
- Se repiten los pasos anteriores para el cálculo de la mezcla de ACPM con biodiesel.

- Calculados los valores respectivos para la demanda de energía de gasolina sin bioetanol y ACPM sin biodiesel se multiplican por los factores de emisión de CO_2, CH_4 y N_2O correspondientes para cada combustible. La fracción correspondiente a biocombustible es multiplicada por el factor de emisión de CH_4 y N_2O para cada tipo de combustible, las emisiones

correspondientes de CO_2 son contabilizadas en el sector AFOLU como establece el IPCC para evitar un doble conteo [40].

- Para la mezcla de biocombustibles en el transporte de carga se utiliza el porcentaje de mezcla calculado en transporte de pasajeros. Este valor es utilizado en un condicional para determinar si la mezcla entre bioetanol y gasolina fue mayor al 10% como se muestra en el Diagrama 8 correspondiente al Anexo J nueva medida transporte de carga.

Diagrama 7. Condicional mezcla gasolina con bioetanol transporte de pasajeros



Fuente: Elaboración propia.

- En caso de que la mezcla sea mayor al 10% se calcula el bioetanol disponible y el porcentaje que este representa para la demanda de gasolina en el transporte de carga, en caso que la mezcla sea mayor no se realiza ninguna acción.

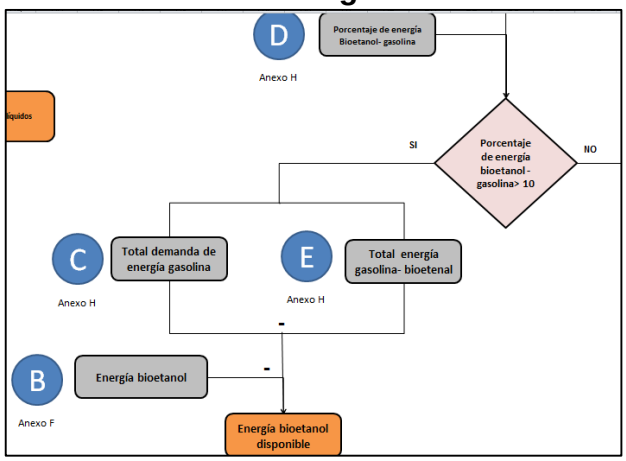
- Si el bioetanol disponible es mayor al 10% con respecto a la demanda de gasolina del transporte de carga, se le resta únicamente este porcentaje ya que es la mezcla que establece la normatividad, en caso que sea menor se resta el porcentaje obtenido.

- Se repiten los pasos anteriores para el cálculo de la mezcla de ACPM con biodiesel.

- Calculados los valores respectivos para la demanda de energía de gasolina sin bioetanol y ACPM sin biodiesel se multiplican por los factores de emisión de CO_2, CH_4 y N_2O correspondientes para cada combustible. La fracción correspondiente a biocombustible es multiplicada por el factor de emisión de CH_4 y N_2O para cada tipo de combustible, las emisiones correspondientes de CO_2 son contabilizadas en el sector AFOLU como establece el IPCC para evitar un doble conteo [40].

- En caso que se conserven biocombustibles disponibles al mezclar el bioetanol y el biodiesel con la gasolina y el ACPM respectivamente demandado por el transporte de pasajeros y carga, serán sumados a la oferta para el siguiente período de análisis.

Diagrama 8. Bioetanol disponible para la mezcla con gasolina en transporte de carga.



Fuente: Elaboración propia.

4.3. MODELAMIENTO DEL ESCENARIO DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMATICO EN LA CALCULADORA DE CARBONO 2050 DE COLOMBIA.

Para establecer las emisiones de GEI del sector energético se tomó como base las proyecciones del escenario BAU, estas estimaban los valores para los años 2010, 2025 y 2030, como se representa en la Tabla 9; para poder establecer el comportamiento para los años 2015 y 2020 se planteó una de tendencia polinómica de segundo orden (Se estableció esta línea de tendencia debido a que el valor correspondiente a R^2=1) que permita identificar el comportamiento en estos años. Para la reducción de emisiones de GEI del 20% para el año 2030 planteada por el gobierno no se estipula una reducción referente a cada sector por esto se asume que la reducción en todos los sectores será equitativa, debido a esto para plantear la reducción del sector energético se generó una línea de tendencia lineal a partir de las emisiones del año 2010 y una reducción del 20% para el 2030 del escenario BAU, como se muestra en la Gráfica 8 [19].

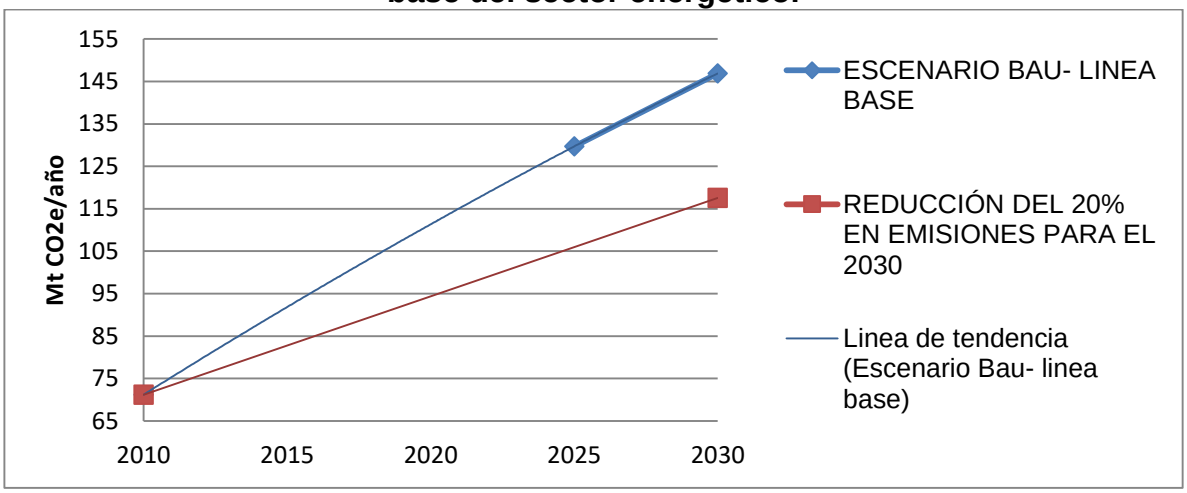
Tabla 9. Proyección de emisiones de GEI para el sector energético para el escenario BAU.

Escenario BAU - Línea Base	Emisiones (MTON CO2 eq)		
	2010	2025	2030
Generación de energía eléctrica (SIN+ZIN)	10,42	13,42	18,27
Refinerías	4,11	8,16	8,16
Coquerías	1,17	1,77	1,98
Otras industrias de la energía	3,94	6,36	6,28
Demanda - Industria	10,92	21,12	23,02
Demanda - Transporte	22,66	40,61	48,62
Demanda - Otros sectores	8,23	18,19	20,85
Fugitivas	9,76	20,03	19,72
TOTAL	71,21	129,66	146,9

Fuente: [19]

Para plantear el modelamiento del sector energético se identificaron las medidas de la calculadora de carbono 2050 de Colombia que debían ser contabilizadas para el sector según lo establecido por el IPCC, dicha clasificación ya se encontraba establecida en la herramienta Excel de la calculadora; se identificaron 23 medidas correspondientes a la industria de la energía, industrias manufactureras y de la construcción, transporte y emisiones fugitivas [18].

Gráfica 8. Reducción del 20% en emisiones de GEI con respecto al escenario base del sector energético.



Fuente: Elaboración propia basado en datos del escenario BAU [19].

Para el modelamiento de la oferta de la industria de la energía se tomó como base el Escenario 11 del Plan de Expansión de Referencia 2015-2029 de la UPME, ya que dentro de los 8 Escenarios de largo plazo planteados este era el que menor factor de emisión presentaba, esto con el fin de denotar el comportamiento de este escenario en un nivel alto de demanda. Se establecieron los valores de laTabla 5. Expansión adicional matriz eléctrica para 2029 Escenario 11- Plan de Expansión de Referencia (2015-2029) Tabla 5 para la oferta, estos valores son estimados para el año 2029 y serán asumidos para el año 2030. La demanda de la industria energética se encuentra plasmada en la Tabla 10, donde se estima la demanda de energía eléctrica más consumo de grandes generadores y exportaciones a Panamá; identificando que se presentará un aumento del 55,1% en la demanda de energía eléctrica (GWh) y del 33,9% demanda de potencia máxima (MW) [20].

Tabla 10. Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica y Potencia, incluyendo Grandes Consumidores y Exportaciones Panamá.

Año	Proyección GWh	Proyección MW
	Esc. Alto	Esc. Alto
2015	65.797	10.240
2029	102.111	14.337

Fuente: Elaboración propia [20].

Tabla 11. Demanda para combustibles.

Tipo de combustible	Demanda (BDC)			
	2015	2020	2025	2030
Gasolina	91167	110942	135853	161082
ACPM	116883	139067	166326	190254
	Demanda (MPCD)			
	2015	2020	2025	2030
Gas Natural	79	89	102	112

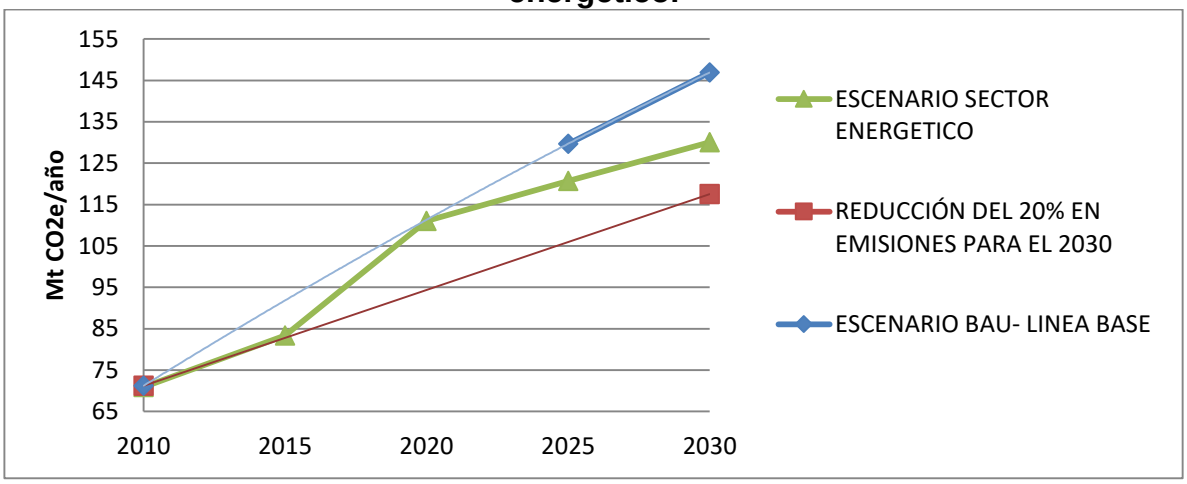
Fuente: Elaboración propia [27].

Para el modelo establecido en la calculadora de carbono 2050 del sector transporte la demanda es igual a la oferta por lo que se asumen los valores de la Proyección de Demanda de Combustibles en el Sector Transportes de la UPME, que establece los valores proyectados para ACPM, gasolina y gas natural. Se logró identificar la siguiente demanda de combustibles para el año 2030: ACPM: 144.190 Barriles Diarios de Consumo (BDC), gasolina: 118.062 BDC, y gas natural: 112 millones de pies cúbicos por día (mpcd) siendo el escenario de mayor demanda para el 2030; para los años intermedios se presentan los valores de la Tabla 11. Demanda para combustibles.Tabla 11 [27] [41].

4.4. CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI A PARTIR DEL ESCENARIO PLANTEADO.

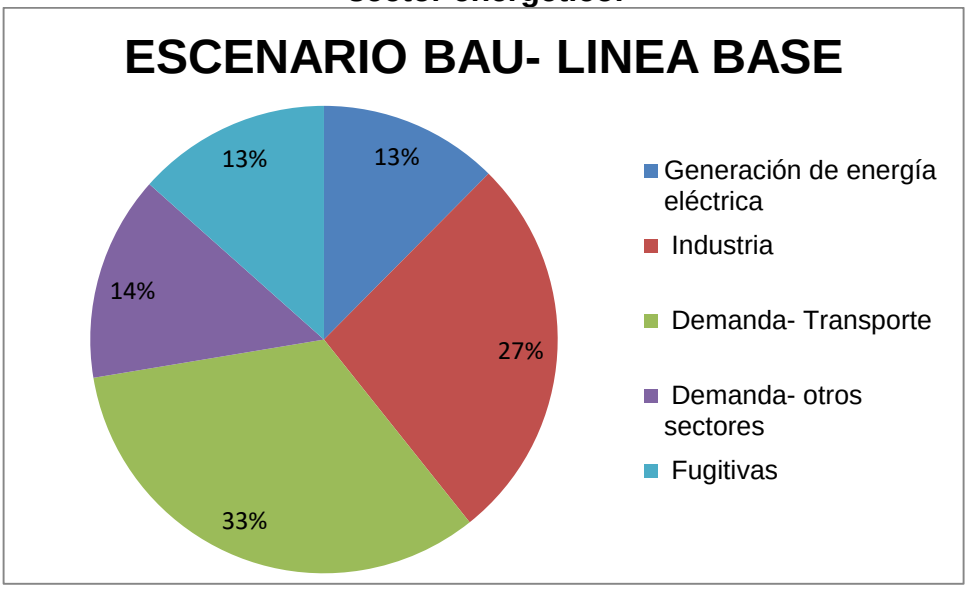
Como se logra identificar en la Gráfica 9, las emisiones de GEI estimadas para el año 2030 en el sector energético se reducirán 11,48% con respecto a lo estimado en el escenario BAU, dejando de generar 16,87 Mton CO_2eq, lo que indica que para cumplir con la reducción propuesta en la COP21 de reducir las emisiones en un 20% se deben sumar esfuerzos para dejar de generar 12,51 Mton CO_2eq (en caso que todos los sectores reduzcan un 20% de manera equitativa) o plantear medidas en los otros sectores que compensen el porcentaje que no se redujo en el sector energético, lo cual es bastante complejo considerando que según lo planteado en el escenario BAU el 44,15% de las emisiones serán generadas por el sector energético [19].

Gráfica 9. Emisiones de GEI para el escenario planteado para el sector energético.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 10. Distribución de las emisiones de GEI en el escenario BAU para el sector energético.

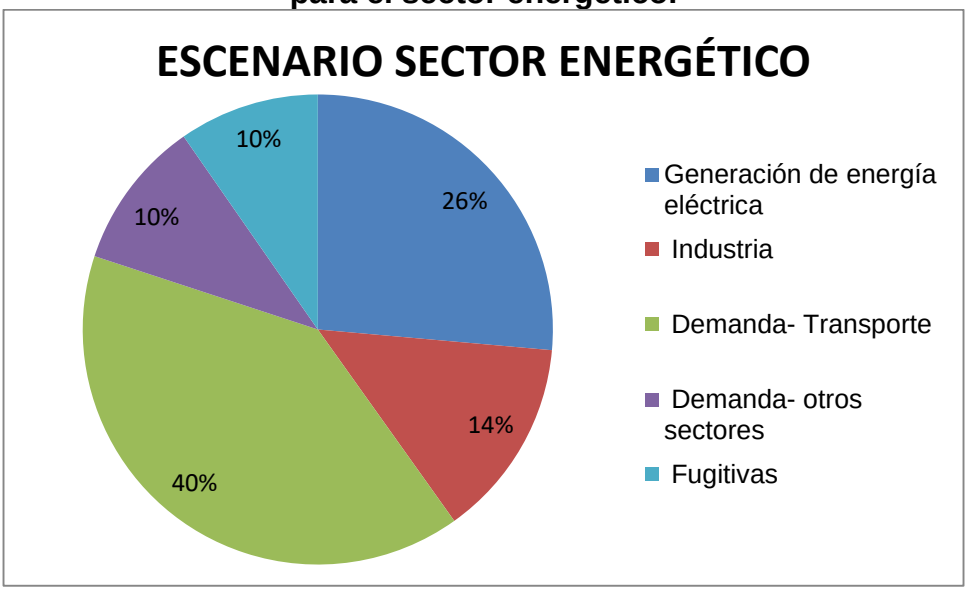


Fuente: Elaboración propia con datos de la iNDC de Colombia [19].

Para poder establecer una reducción mayor en las emisiones de GEI del sector energético se hace necesario implementar medidas relacionadas con la industria de la energía, ya que esta presenta un aumento del 3% en la distribución de emisiones con respecto al año 2012, esto debido en parte a que la demanda se

duplicó y las emisiones de plantas térmicas con carbón aumentaron de manera drástica. El sector transporte se mantuvo con la mayor distribución en emisiones del GEI en el sector energético, pasando de generar el 38% al 40% del total, debido a que la demanda de combustibles fósiles aumentó y no se plantearon medidas que redujeran su consumo, por el contrario la demanda de gasolina, ACPM y gas natural casi se duplicó. Las emisiones generadas por la industria, otros sectores y fugitivas conservan la misma distribución dentro del sector energético.

Gráfica 11. Distribución de las emisiones de GEI en el escenario planteado para el sector energético.



Fuente: Elaboración propia.

Comparando la distribución entre las emisiones de GEI del escenario BAU (Gráfica 10) y el escenario del sector energético (Gráfica 11), se logra identificar que se presenta un comportamiento similar en las emisiones generadas por el sector transporte, demanda- otros sectores y fugitivas, a diferencia de la industria de la energía que aumenta su distribución, esto debido a que la demanda se proyectó en el nivel más alto del Plan de Expansión Referencia (2015-2019) lo cual genera un aumento en las emisiones, para la industria se presentó una disminución en la distribución a pesar que se modeló con el nivel que mayor cantidad de emisiones generaba de la calculadora de carbono 2050 de Colombia,

lo que implica errores en los supuestos fijos asumidos por el modelo Excel de la calculadora ya que presenta un comportamiento atípico en comparación con el escenario BAU [20].

Para poder alcanzar la meta de reducir el 20% en las emisiones de GEI en el sector energético para el año 2030, se hace necesario alcanzar una generación de 117,52 Mton de CO_2eq, lo cual tiene una diferencia de 12,51 Mton de CO_2eq con respecto al escenario planteado. De las emisiones del escenario 51,9 Mton de CO_2eq se generan por el sector transporte, en parte se debe a que no se alcanza la mezcla del 10% de gasolina y ACPM con biocombustibles solo se llega al 6,6% y 5,9% respectivamente, a pesar de que las proyecciones de áreas cultivadas para biocombustibles se hicieron en el nivel más ambicioso que establecía un aumento en el 35% de las áreas cultivadas. Para una mezcla del 10% en ambos combustibles se emitirían 50,06 Mton de CO_2eq, lo que no reduciría de manera drástica las emisiones del sector por lo tanto para poder alcanzar menores emisiones se hace necesario poder disponer de medios alternativos de transporte además de mezclas más altas con biocombustibles. Las emisiones de la industria de la energía se deben principalmente a que la oferta del escenario 11 del Plan de Expansión de Referencia (2015- 2029) no alcanza a suplir el total de la demanda para el escenario alto proyectado por el mismo, lo que implica que esta energía deba ser generada en una termoeléctrica operada con carbón, generando 19,03 Mton de CO_2eq, un valor superior a la reducción del 20% planteada, por lo tanto se estima que con una matriz eléctrica que tenga una mayor capacidad instalada en energías renovables conllevaría a alcanzar la reducción esperada en el sector energético [20].

5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Con el crecimiento de las emisiones de GEI han aumentado una serie de problemas que venían afectando a la población mundial en especial a los sectores más vulnerables, que son más propensos a tener reducción en su calidad de vida. Anteriormente el problema de emisiones de GEI se consideraba únicamente de carácter ambiental, pero con el transcurrir del tiempo se vienen relacionando con problemas económicos, salud y sociales.

El aumento de emisiones de GEI puede conllevar a problemas como el incremento del nivel del mar, que se proyecta para el período 2050– 2060 en 40 centímetros para la costa Caribe y 60 centímetros para la costa Pacífica, en relación al promedio del período comprendido entre 1961– 1990. La población a nivel nacional que se encuentra expuesta a inundación es aproximadamente 1,4 millones, la mayoría ubicada en las principales ciudades costeras del país, siendo estás las más afectadas con el incremento del nivel del mar [7].

El sector agrícola presenta una vulnerabilidad considerable ante el posible aumento de emisiones de GEI, porque al presentarse una reducción del área de páramos se afectaría la oferta de agua para ciudades y zonas agrícolas ubicadas en las zonas de subpáramo. Estudios del IDEAM han identificado que el arroz, tomate de árbol, trigo y papa son los cultivos más vulnerables a los efectos del cambio climático [7].

Otro factor importante que incide en el impacto social es el aumento de temperatura que según investigaciones realizadas por el IDEAM se proyectan cerca a los 0,13ºC por década, este aumento traería cambios muy significativos principalmente en zonas de alta montaña donde se ubica la mayoría de la población a nivel nacional.

Por los motivos anteriormente citados y al ser Colombia un país vulnerable al cambio climático se hace necesario plantear diferentes escenarios de mitigación que ayuden a determinar las emisiones de GEI para el año 2030, mismo año en el que el país se comprometió a reducir las emisiones en un 20% con respecto al

escenario BAU. Estos escenarios de mitigación al cambio climático sirven como herramienta para establecer el comportamiento de los diferentes sectores productivos, además de ayudar a la toma de decisiones en cuanto a fuentes emisoras de GEI.

La toma de decisiones acertadas para el sector energético se hace fundamental en la búsqueda de una reducción de las emisiones de GEI para el año 2030 al ser el sector productivo que mayor cantidad emite.

CONCLUSIONES

- Se construyó un escenario de mitigación al cambio climático para el sector energético que sirve como herramienta para establecer el estimado de las emisiones de GEI para el año 2030, posibilitando así la toma de decisiones en cuanto a políticas energéticas que conlleven en conjunto con los demás sectores productivos a una reducción del 20% con respecto a las emisiones proyectadas en el escenario BAU.

- Se logró identificar que se alcanza una reducción del 11,48% en las emisiones de GEI para el año 2030 en el sector energético al modelar la demanda más alta de energía eléctrica proyectada por el Plan de expansión de referencia 2015-2029 (incluyendo grandes consumidores de energía y exportaciones a Panamá) y la proyección más elevada de la demanda de combustibles establecida en las Proyecciones de Demanda de Combustibles en el Sector Transporte en Colombia.

- Se determinó que la industria de la energía es el componente del sector energético que tiene la mayor capacidad para reducir las emisiones de GEI para el año 2030.

- Se determinó que el Escenario 11 del plan de expansión de referencia 2015-2029 no suple la demanda más alta propuesta en el mismo documento (incluyendo grandes consumidores de energía y exportaciones a Panamá).

- Se determinó que al hacer una mezcla del 10% entre ACPM y gasolina con biocombustibles la reducción en las emisiones de GEI para el sector transporte es mínima, por lo que se hace necesario plantear medidas que reduzcan el uso de combustibles fósiles o mezclas superiores, para alcanzar una reducción del 20% para el año 2030.

- Se logró identificar que para el escenario más ambicioso en cuanto a tierra dedicada a biocombustibles solo se alcanza una mezcla de 6,6% entre gasolina- bioetanol y 5,9% entre ACPM- biodiesel para el año 2030.

- Se logró identificar que no son congruentes las emisiones de GEI modeladas en la calculadora de carbono 2050 de Colombia con las estimadas en el

escenario BAU para el componente de la industria en el sector energético, ya que la medida fue modelada en el nivel menos ambicioso que supone unas altas emisiones de GEI, donde se establece una diferencia de -21,58 Mton de CO_2eq con respecto a las proyecciones del escenario BAU, lo que denota que los supuestos asumidos no reflejan el comportamiento de la industria en el sector energético.

- Se determinó que en el modelo actual de Gestión Energética en Termoeléctrica de la calculadora de carbono 2050 de Colombia no se establece una relación que priorice la generación de energía eléctrica a partir de fuentes con menores factores de emisión de GEI.

- Se logró identificar que no se hacía un conteo para las emisiones de CH_4 y N_2O generadas por la combustión de biomasa en termoeléctricas en la calculadora de carbono 2050 de Colombia a pesar que este cálculo está establecido en las Directrices para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero del IPCC.

- Se identificó que no existe una relación entre los biocombustibles producidos y los utilizados dentro de la medida de transporte por lo que no se ha realizado una mezcla respectiva para biodiesel y bioetanol dentro de la calculadora de carbono 2050 de Colombia.

- Se estableció que dentro de la medida de Gestión Energética en Termoeléctricas no existe un límite para la generación de energía eléctrica, por lo que se sigue generando energía de manera ilimitada aumentando las emisiones de GEI.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar una calculadora para el sector energético que permita en la herramienta web plantear diferentes niveles de ambición con respecto a la oferta de energéticos, además se puedan visualizar de manera detallada las fuentes de emisiones de GEI correspondientes al sector energético comparándolas con las proyecciones del Escenario BAU.

- Actualizar el modelamiento de la demanda y oferta de energía eléctrica cuando se encuentre disponible el Plan de expansión Referencia para el año 2030.

- Realizar una revisión del título de la matriz correspondiente a emisiones fugitivas de la hoja XIIc de la calculadora de carbono 2050 de Colombia ya que no se está haciendo un conteo de estas emisiones.

- Desarrollar los árboles de cálculo correspondientes a las medidas establecidas en la calculadora de carbono 2050 de Colombia, ya que únicamente existen para autogeneración solar fotovoltaica y autogeneración solar térmica.

REFERENCIAS

[1] J. D. Pabón Caicedo, «Cambio climatico en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.,* vol. 36, nº 139, 2012.

[2] COP 21, «COP 21,» 2016. [En línea]. Available: http://www.cop21.paris.org/about/cop21. [Último acceso: 2 12 2016].

[3] IDEAM, «Instituto de Estudios Ambientales y metereológicos,» 2014. [En línea]. Available: http://ww.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico. [Último acceso: 13 Noviembre 2016].

[4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Estrategia Colombiana de Desarrollo Baja en Carbono,» Bogotá, 2015.

[5] World Wildlife Fund for Nature, «WWF,» [En línea]. Available: http://www.wwf.org.co/que_hacemos/wwf_al_clima/?gclid=COOGo6_m7coCFZcdgQodBPQEEQ. [Último acceso: 2 Noviembre 2016].

[6] Naciones Unidas, «Portal de la labor de las UN sobre el Cambio climático,» [En línea]. Available: http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php. [Último acceso: 28 Mayo 2016].

[7] IDEAM, «Información tecnica sobre gases de efecto inverdero y cambio climático,» 2007.

[8] IPCC, «Cambio climático y biodiversidad- documento técnico V del IPCC-,» 2002.

[9] Naciones Unidas, «United Nations Framework Convention on Climate Change,» Naciones Unidas, 1992. [En línea]. Available: http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf. [Último acceso: 29 Noviembre 2015].

[10] Naciones Unidas, «Protocolo de kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas,» 1998.

[11] L. Fabius, «France-Diplomatie,» 2016. [En línea]. Available: http://www.diplomatie.gouv.fr/es/asuntos-globales/clima/paris-2015-cop21/cop21-el-acuerdo-de-paris-en-cuatro-puntos-clave/article/cop21-el-acuerdo-de-paris-en-cuatro-puntos-clave-un-avance-historico-para-el. [Último acceso: 10 Febrero 2016].

[12] United Nations Framework Convention on Climate Change, «Climate Change Newsroom from the UNFCC,» 17 11 2016. [En línea]. Available: http://newsroom.unfccc.int/es/acuerdo-de-paris/primeras-estrategias-clim%C3A1ticas-presentadas-ante-la-onu-bajo-el-acuerdo-de-paris/. [Último acceso: 2 12 2016].

[13] Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial; IDEAM, PNUD, GEF, «Informe ejecutivo segunda comunicación nacional de Colombia ante la CMNUCC,» 2010.

[14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,» 02 2016. [En línea]. Available: http://minambiente.gov.co/images /normativa/appdecretos/55-decreto%20298%20feb%20216.pdf. [Último acceso: 4 12 2016].

[15] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Calculadora 2050,» 2015. [En línea]. Available: http://www.calculadoracolombia2050.com/. [Último acceso: 11 Febrero 2016].

[16] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA., «Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia.,» 2015.

[17] IPCC, «IPCC Home,» 2016. [En línea]. Available: http://www.ipcc.ch/index.htm. [Último acceso: 20 Enero 2017].

[18] IPCC, «Directrices del IPCC de 2006 Para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero,» 2006.

[19] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Contribuciones Previstas y Nacionalmente Determinadas (iNDC) de Colombia - Documento Soporte-».

[20] UPME, «Plan de Expansión Referencia (Generación- Transmisión) 2015-

2029,» 2015.

[21] XM, «Cargo por confiablidad».

[22] M. I. Restrepo Estrada, S. Arango Aramburo y L. G. Veléz Alvarez, «La confiabiliad en los sistemas eléctricos competitivos y del modelo colombiano de cargo por confiabilidad,» *Revista electronica Universidad Nacional,* vol. 31, 2011.

[23] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostible, «El ABC de los Compromisos de Colombia para la COP21,» 2015.

[24] UPME, «Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050.,» 2015.

[25] UPME, «Informe Mensual de Variación de Generación y del Mercado Eléctrico Colombiano- Diciembre,» 2015.

[26] UPME, «FECOC 2016,» [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/calculadora.html. [Último acceso: 03 01 2017].

[27] UPME, «Proyección de Demanda de Combustibles en el Sector Transporte en Colombia,» 2015.

[28] *CONPES 3510,* 2008.

[29] *Decreto 2629,* 2007.

[30] *Decreto 1135,* 2009.

[31] Fedesarollo, «Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia,» 2012.

[32] FedeBiocombustibles, «FedeBiocombustibles,» [En línea]. Available: http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm. [Último acceso: 1 Diciembre 2016].

[33] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, «El programa de Biocombustibles en Colombia,» 2007.

[34] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, «Kalkulator Indonesia 2050,» [En línea]. Available: http://calculator2050.esdm.go.id/pathways/11111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111/primary_energy_chart/comparator/444444444444444444440111111104110110114101141100414141411. [Último acceso: 27 Agosto 2016].

[35] Secretaria de Energía México, «Calculadora México 2050,» [En línea]. Available: http://webtool.calculadoramexico2050.org/pathways/11111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111/primary_energy_chart/comparator/11010111111101111101100000111011011000110101103110101001100100000132. [Último acceso: 27 Agosoto 2016].

[36] Departament of Energy & Climate Change, «2050 Energy Calculator UK,» [En línea]. Available: http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/#/home. [Último acceso: 27 Agosto 2016].

[37] Société Bas Barbone, «Calculator 2050 Belium,» [En línea]. Available: http://2050-calculator-tool.climat.idweaver.com/. [Último acceso: 27 Agosto 2016].

[38] the Indian Government's Planning Commission, «Calculator 2050 India,» [En línea]. Available: http://iess2047.gov.in/pathways/22222222222222222222222222122222222222222112222222222222222/primary_energy_chart. [Último acceso: 27 Agosto 2016].

[39] South Korean University of Sejong, «Calculator 2050 South Korea,» [En línea]. Available: http://2050.sejong.ac.kr/pathways/10111111111111101111110011111101111011011101101110110111/primary_energy_chart. [Último acceso: 28 Agosto 2016].

[40] IDEAM, «Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero,» 2007.

[41] UPME, «Biocombustibles en Colombia,» 2008.

ANEXOS

ANEXO A. Árbol de cálculo gestión energética en termoeléctricas (Calculadora de carbono 2050 de Colombia) [15].

ANEXO B. Árbol de cálculo electricidad a partir de biomasa (Calculadora de carbono 2050 de México) [35].

ANEXO C. Árbol de cálculo centrales de ciclo combinado (Calculadora de carbono 2050 de Indonesia) [34].

ANEXO D. Árbol de cálculo de nueva medida gestión térmica en termoeléctricas.

ANEXO E. Árbol de cálculo tierra dedicada para biocombustibles (Calculadora de carbono 2050 de Colombia) [15].

ANEXO F. Árbol de cálculo Bioenergía (Calculadora de carbono 2050 de Colombia) [15].

ANEXO G. Árbol de cálculo transporte de pasajeros (Calculadora de carbono 2050 de Colombia) [15].

ANEXO H. Árbol de cálculo nuevo medida transporte de pasajeros.

ANEXO I. Árbol de cálculo transporte de carga (Calculadora de carbono 2050 de Colombia) [15].

ANEXO J. Árbol de cálculo nueva medida transporte de carga.

ANEXO K. Modelo del escenario de mitigación al cambio climático para el sector energético en la calculadora de carbono 2050 de Colombia.