

**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS
ENERGÉTICOS A BASE DE NUCLEAR, BIOMASA Y GAS UTILIZANDO EL
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

JOHN FREDDY GALVIS MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS
ENERGÉTICOS A BASE DE NUCLEAR, BIOMASA Y GAS UTILIZANDO EL
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

JOHN FREDDY GALVIS MARTÍNEZ

**DIRECTORA DE TESIS
PhD. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que hicieron posible este triunfo, al Ecopetrol, al Semillero de Prospectiva Energética de Colombia, a la Dirección General de Investigaciones UPB quienes financiaron este camino, a mis amigos, a mis profesores, a mi tutora María Fernanda quien abrió esta puerta para mí, a mis padres Julio y Adriana que me acompañaron y apoyaron durante este proceso, a mi hermana quien con sus locuras e inocencia hizo de este trayecto más sencillo y a Dios quien puso ante mí esta gran oportunidad.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo general	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Estrategias de divulgación de resultados de este trabajo de grado	14
1.5 Metodología.....	16
1.6 Organización del documento	17
2 GAS NATURAL	19
2.1 Hechos emblemáticos.....	19
2.2 Gas natural en Colombia	20
2.2.1 Demanda de gas natural en Colombia	21
2.2.2 Oferta de gas natural en Colombia.....	23
2.2.2.1 Reservas de gas natural en Colombia.....	24
2.2.2.2 Producción de gas natural en Colombia	25
2.3 Impactos ambientales	27
2.3.1 Contaminación del aire.....	28
2.3.2 Contaminación del agua.....	30
2.3.3 Contaminación del suelo/ecosistema	31
2.4 Ciclo de vida del gas natural.....	32
2.4.1 Ciclo inicial del combustible	33
2.4.1.1 Exploración y extracción	33
2.4.1.2 Procesamiento.....	36
2.4.1.3 Transporte de materia prima.....	36
2.4.1.4 Emisiones durante el ciclo de vida inicial del combustible	37
2.4.2 Conversión de energía	38
2.4.2.1 Mezclas de gas natural.....	38

2.4.2.2	Gas natural de ciclo combinado (GNCC).....	40
2.4.2.3	Turbina de gas de ciclo simple (TGCS)	40
2.4.3	Emisiones totales del ciclo de vida.....	40
2.5	Alternativas de mitigación	42
3	BIOMASA	45
3.1	Tipos de biomasa	46
3.1.1	Biomasa sólida	47
3.1.2	Biogás	47
3.1.3	Residuos sólidos orgánicos.....	47
3.1.3.1	Biomasa residual en Colombia	47
3.1.4	Biocombustibles	49
3.1.4.1	Biocombustibles de primera generación	49
3.1.4.2	Biocombustibles de segunda generación	49
3.1.4.3	Biocombustibles de tercera generación.....	50
3.1.4.4	Biocombustibles de cuarta generación	50
3.2	Procesos de conversión biomásica energética.....	51
3.2.1	Procesos bioquímicos	51
3.2.1.1	Fermentación alcohólica	52
3.2.1.2	Fermentación metánica	52
3.2.2	Procesos termoquímicos.....	53
3.2.2.1	Combustión directa.....	53
3.2.2.2	Pirólisis	54
3.2.2.3	Gasificación	54
3.2.2.4	Co-combustión.....	55
3.3	Hechos emblemáticos.....	55
3.4	Biomasa en Colombia.....	57
3.4.1	Demanda de biomasa en Colombia	57
3.4.2	Oferta de biomasa en Colombia.....	59
3.4.2.1	Producción de biocombustibles en Colombia	59
3.5	Impactos ambientales	61
3.5.1	Contaminación del aire.....	61
3.5.2	Contaminación del agua.....	61
3.5.3	Contaminación del suelo/ecosistema	62

3.6	Ciclo de vida de la biomasa	63
3.6.1	Ciclo inicial del combustible	64
3.6.1.1	Cultivo.....	64
3.6.1.2	Transporte	64
3.6.2	Conversión de energía	65
3.6.2.1	Producción.....	65
3.6.2.2	Transformación.....	66
3.6.3	Infraestructura	66
3.7	Emisiones totales del ciclo de vida	67
3.8	Alternativas de mitigación	69
4	NUCLEAR.....	71
4.1	Generación de energía atómica.....	71
4.2	Combustible Nuclear.....	72
4.2.1	Requerimientos mundiales de uranio	72
4.3	Hechos emblemáticos.....	73
4.3.1	Alemania	74
4.3.2	Japón	75
4.3.3	Bolivia.....	75
4.4	Energía nuclear en Colombia	76
4.5	Impactos ambientales	76
4.5.1	Contaminación del aire.....	77
4.5.2	Contaminación del agua.....	78
4.5.3	Contaminación del suelo/ecosistema	79
4.6	Ciclo de vida de la energía nuclear.....	79
4.6.1	Ciclo inicial del combustible nuclear.....	80
4.6.1.1	Minería de Uranio	80
4.6.1.2	Molienda de Uranio.....	81
4.6.1.3	Conversión y enriquecimiento de Uranio	81
4.6.2	Construcción de la central nuclear	81
4.6.3	Operación de la central nuclear	82
4.6.4	Ciclo final del combustible nuclear	82
4.6.5	Desmantelamiento de la central nuclear	82
4.6.6	Emisiones totales del ciclo de vida.....	83

4.7	Alternativas de mitigación	84
5	COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	86
5.1	Comparación de análisis de ciclo de vida de los energéticos	86
5.2	Comparación de impactos ambientales según el método EPM o de Arboleda.....	88
5.2.1	Matriz EPM del gas natural	90
5.2.2	Matriz EPM de la biomasa	91
5.2.3	Matriz EPM de la energía nuclear	93
6	CONCLUSIONES	95
7	BIBLIOGRAFÍA.....	98
	ANEXOS.....	110

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Países productores de gas natural	20
Figura 2 Distribución de la demanda del gas natural en Colombia 2014	21
Figura 3 Demanda de gas natural en Colombia, 1997 - 2014	22
Figura 4 Reservas totales y variación de reservas en Colombia, 2000 - 2015	24
Figura 5 Producción de Gas Natural en Colombia	25
Figura 6 Gasoductos y campos de gas en Colombia.....	26
Figura 7 Ciclo de vida del gas natural.....	32
Figura 8 Distribución de la matriz de gas norteamericana	38
Figura 9 Aporte de los yacimientos convencionales a la matriz del gas natural	39
Figura 10 Aporte de los yacimientos no convencionales a la matriz del gas natural	39
Figura 11 Ciclo de vida del gas natural - gCO ₂ e/kWh	42
Figura 12 Procesos de conversión de la biomasa	51
Figura 13 Producción mundial de electricidad biomásica y de desechos 1980 - 2014	56
Figura 14 Demanda final de energía biomásica.....	58
Figura 15 Tendencia de los biocombustibles en Colombia.....	59
Figura 16 Indicadores de los biocombustibles en Colombia	60
Figura 17 Ciclo de vida de la biomasa	63
Figura 18 Ciclo de vida de la biomasa- gCO ₂ e/kWh	68
Figura 19 Recursos recuperables de uranio a 2013	73
Figura 20 Participación nuclear en la canasta eléctrica por país	74
Figura 21 Ciclo de vida de la energía nuclear.....	80
Figura 22 Ciclo de vida de la energía nuclear - gCO ₂ e/kWh	84
Figura 23 Comparación grafica del análisis de ciclo de vida de los energéticos	88
Figura 24 Impactos identificados - EPM gas natural.....	91
Figura 25 Impactos identificados - EPM biomasa.....	92
Figura 26 Impactos identificados - EPM energía nuclear.....	93

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Ponencias dentro del semillero	14
Tabla 2 Artículos desarrollados para el Semillero de investigación en Prospectiva Energética.....	15
Tabla 3 Participación en eventos externos	16
Tabla 4 Impactos de la producción de energía fósil.....	27
Tabla 5 Emisiones por combustión de los principales combustibles fósiles en libras por Billón de BTU.....	28
Tabla 6 Emisiones del ciclo de vida inicial del combustible	37
Tabla 7 Emisiones del ciclo de vida del gas natural.....	41
Tabla 8 Poder calórico inferior de la biomasa residual colombiana	48
Tabla 9 Poder calórico de la biomasa solida	53
Tabla 10 Poder calórico obtenido por oxidante.....	54
Tabla 11 Incrementos de la producción eléctrica biomásica mundial	57
Tabla 12 Combustible requerido para generar 18.5 MBTU	65
Tabla 13 Emisiones del ciclo de vida de la biomasa.....	67
Tabla 14 Comparación de la densidad de energía contenida.....	77
Tabla 15 Comparación de la generación de residuos y consumo de combustible planta de 1000MWe.....	78
Tabla 16 Ciclo de vida de la energía nuclear	83
Tabla 17 Comparación del análisis de ciclo de vida de los energéticos	87
Tabla 18 Criterios de evaluación matriz EPM o Arboleda.....	89
Tabla 19 Importancia del impacto	90
Tabla 20 Evaluación ambiental EPM del gas natural.....	90
Tabla 21 Evaluación ambiental EPM de la biomasa	92
Tabla 22 Evaluación ambiental EPM de la energía nuclear.....	93

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS A BASE DE NUCLEAR, BIOMASA Y GAS UTILIZANDO EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

AUTOR(ES): JOHN FREDDY GALVIS MARTÍNEZ

FACULTAD: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ph.D. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN

RESUMEN

La migración desde los combustibles fósiles hacia las energías renovables es una necesidad para la humanidad no solo por la volatilidad de los almacenamientos sino por el daño ambiental que genera la producción y uso de estos combustibles. Pero, no resulta viable un corte abrupto de estos energéticos, siendo entonces necesario un vínculo transicional entre los combustibles fósiles actuales y las energías renovables del futuro. Es en esta situación donde el gas natural brinda la posibilidad de realizar dicha transición, sus grandes ventajas ambientales y la versatilidad de sus usos lo hacen el energético ideal para suplir la demanda actual y la generada durante el proceso de transición. Por otro lado, los bioenergéticos o energéticos biomásicos pueden apoyar las labores transicionales del gas natural, pero su uso no sería periódico ni estacional, sino permanente sin que llegase a competir con los cultivos alimenticios o forestales, esto dado los avances tecnológicos en su producción. Así mismo, existe una fuente energética adicional, la energía nuclear la cual se concibe como una energía de emisiones nulas de gases efecto invernadero, pero el análisis del ciclo de vida de la misma establece lo contrario.

PALABRAS CLAVES:

Energía, Biomasa, Gas Natural, Nuclear, Impacto Ambiental, Ciclo de vida

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS BASED ON NUCLEAR, BIOMASS AND GAS USING LIFECYCLE ASSESSMENT

AUTHOR(S): JOHN FREDDY GALVIS MARTÍNEZ

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ph.D. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN

ABSTRACT

Migration from fossil fuels to renewable energy is a necessity for humankind not only because of the volatility of storage, but for environmental damage generated by the production and use of these fuels. But it is not feasible an abrupt cut of these energy, making it necessary a transitional link between today's fossil fuels and renewable energy of the future. In this situation natural gas provides the ability to make the transition, the great environmental benefits and versatility of use, make it ideal to supply the current demand and the generated during the transition energy. On the other hand, bioenergy or energy biomass can support the transitional tasks of natural gas, but its use would not be periodic or seasonal, but permanent without ever reaching compete with food or forest crops, that given the technological advances in production. In the same way, there is an additional energy source, nuclear power which is conceived as an energy of zero emissions of greenhouse gases, but the lifecycle assessment contradict that statement.

KEYWORDS:

Energy, Biomass, Natural Gas, Nuclear, Environmental Impact, LifeCycle Assessment

INTRODUCCIÓN

Los intereses de la comunidad internacional apuntan a la preservación del medioambiente como principal objetivo, esto se ve reflejado por las constantes innovaciones que buscan reducir los impactos negativos propiciados a los ecosistemas y el incremento de los mercados eco-amigables a nivel mundial (United Nations Industrial Development Organization, 2011), durante décadas se realizaron investigaciones y proyectos para la reducción del impacto ambiental de las actividades humanas, pero es a través del diagnóstico de los impactos ambientales analizados mediante el ciclo de vida del producto, proceso o actividad que realmente se puede conocer la verdadera incidencia en el medio ambiente de alguna situación o producto, no solo por el análisis de alguna de las variables como la producción, el desarrollo de sus procesos o su disposición final, entre otros.

1.1 Planteamiento del problema

La sociedad ha provocado un desequilibrio ambiental por un consumo excesivo de energía y una obtención de la misma a partir de combustibles fósiles altamente contaminantes. La UPME a través de su documento titulado Plan Energético Nacional-Colombia: Ideario Energético 2050, plantea una serie de alternativas aplicables a Colombia que involucran diferentes tecnologías para la obtención eficiente de energía, es este documento el que sirve de base para la postulación de la incógnita del presente estudio, ¿Cuál es el impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de gas natural, nuclear y biomasa durante el ciclo de vida de los mismos?

La Universidad Pontificia Bolivariana en convenio con la Universidad Industrial de Santander, la Universidad Autónoma de Bucaramanga y Ecopetrol, plantearon con la creación del semillero de Prospectiva Energética 2050 la búsqueda de las mejores alternativas para la generación de energía en el país; tomándose como energía no solo la electricidad, sino a cualquier tipo de energía que permita el desarrollo del territorio nacional. Resulta entonces, de suma importancia dentro del análisis de alternativas, la identificación de los impactos ambientales generados por el proceso de producción energético contemplado durante todo su ciclo de vida, lo cual permitirá finalmente determinar cuáles pueden ser los mejores elementos a implementar en la canasta energética local según su nivel de impacto ambiental.

1.2 Justificación

El planteamiento del problema expone la relevancia de la investigación de los impactos ambientales generados por diferentes sistemas de producción de energía. Toda actividad humana genera un impacto sobre el medio ambiente, la identificación de estos factores resulta de importancia para evaluar las características medioambientales que serán modificadas por la actividad, así como para diseñar posibles planes de mitigación. En la actualidad no resulta viable la realización de ningún tipo de proyecto que afecte directa e indirectamente el medio ambiente, sin que se realice una evaluación de sus impactos ambientales que permita el diagnóstico previo del área intervenida o de la situación a afectarse y proyectar un escenario futuro con las afectaciones generadas, desde donde se parte para el planteamiento de la estrategia de mitigación.

Mediante la investigación denominada “*COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS A BASE DE NUCLEAR, BIOMASA Y GAS UTILIZANDO EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA*” se pretende obtener el impacto ambiental que pueden generar dichos energéticos durante su producción y uso como fuente energética, es decir durante su ciclo de vida.

1.3 Objetivos

Para el desarrollo de la investigación se plantearon algunos objetivos que permitieron obtener los resultados buscados, estos objetivos se muestran a continuación:

1.3.1 Objetivo general

- Comparar el impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de vida.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los factores que generan impactos en la producción y el uso de material energético no convencional a base de nuclear, biomasa y gas.
- Identificar alternativas de mitigación de impactos generados por la contaminación ambiental por producción y uso de material energético a base de nuclear, biomasa y gas.
- Identificar hechos emblemáticos (lecciones aprendidas en el uso de sistema energético no convencional a base de nuclear, biomasa y gas).
- Aplicar el análisis del ciclo de vida para selección del mejor sistema energético no convencional.

1.4 Estrategias de divulgación de resultados de este trabajo de grado

Durante el curso de la investigación se hizo la socialización de los hallazgos en diversos espacios. Parte de la investigación se divulgó dentro de los espacios de ponencias desarrolladas dentro del Semillero de investigación en Prospectiva Energética, otra parte se realizó en eventos ajenos a los planteados por el mismo, aunque en algunos casos con el apoyo del semillero. Las ponencias internas desarrolladas en los eventos de socialización del semillero se listan en la Tabla 1.

Tabla 1 Ponencias dentro del semillero

Ponencia	Fecha
Comportamiento Ambiental del Gas Natural como Generador de Energía	28-mar-15
Biomasa, una alternativa bioenergética	30-may-15
Incidencia del fenómeno del niño en la generación eléctrica colombiana	14-abr-16

Así mismo se realizaron una serie de artículos e informes para el Semillero de investigación en Prospectiva Energética que sirvieron de apoyo para el desarrollo del presente estudio, dichos artículos se enumeran a continuación (Tabla 2).

Tabla 2 Artículos desarrollados para el Semillero de investigación en Prospectiva Energética

Artículo	Nombre	Mes
2015		
1	Comportamiento ambiental del gas natural como generador de energía	Marzo
2	Biomasa, una alternativa bioenergética	Abril
3	Tendencias contrarias: Bioenergías	Mayo
4	Energía Nuclear: Una alternativa no tan viable	Junio
5	Energía nuclear: impactos y actualidad	Julio
6	Uranio en Colombia	Agosto
7	Comparación ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de vida	Septiembre
8	Ciclo de vida de la biomasa y el gas natural	Octubre
9	Ciclo de vida de la Energía Nuclear	Noviembre
10	Alternativas y Prospectiva – Escenario Tendencial	Diciembre
2016		
11	Fenómeno del Niño en Colombia - 1	Marzo
12	Huella hídrica del gas natural, la biomasa y la energía nuclear	Abril
13	Avances tecnológicos de la Bioenergía	Mayo
14	Prospectiva de la energía nuclear	Junio
15	Prospectiva de emisiones anuales de la demanda de gas natural en Colombia – Escenario tendencial	Julio
16	Prospectiva de emisiones anuales de la demanda de biomasa en Colombia – Escenario tendencial	Agosto
17	Prospectiva de emisiones anuales de la producción y uso de la energía nuclear en Colombia – Escenarios alternativos	Septiembre

Por otro lado, como se mencionó anteriormente se realizó la socialización de los avances de la investigación en espacios externos a los planteados por el semillero, estas participaciones en eventos nacionales e internacionales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Participación en eventos externos

Evento	Ponencia	Año
RedColsi regional Santander	Comportamiento ambiental del gas natural como generador de energía	2015
Encuentro Internacional de Ingenierías Acofi 2015	Gas natural como energético alternativo	2015
Prospectivas energéticas	Prospectiva de emisiones para sistemas energéticos en Colombia	2016
Tercer simposio de energía y medio ambiente	Suelos y Bioenergías	2016

Además, la participación y los productos de este trabajo sirvieron para el apoyo en la elaboración del libro “*Prospectiva Energética Colombia 2050*”, el cual fue desarrollado como entregable principal del convenio. Así mismo, parte de los resultados finales de este trabajo han sido organizados en un artículo enviado para publicación en revista internacional y se está a la espera del veredicto de los evaluadores.

1.5 Metodología

La metodología planteada para el desarrollo del proyecto encaminado a las actividades realizadas en el semillero de prospectiva energética 2050, abarca diferentes aspectos para la correcta culminación del mismo. Dichos aspectos son enumerados a continuación:

1. Revisión bibliográfica sistemática de los avances desde el 2000 a la fecha o anteriores.
2. Identificación de impactos y estrategias de mitigación a partir de la revisión bibliográfica.
3. La evaluación de los impactos se realiza a través de la comparación de los resultados de los ciclos de vida seleccionados y la cualificación de los mismos por la metodología de la matriz EPM o de Arboleda.

1.6 Organización del documento

Este documento consta de siete capítulos desarrollados secuencialmente en los cuales se presenta la investigación realizada, dicha investigación se basó principalmente en revisión bibliográfica y un aporte comparativo de evaluaciones ambientales a través del ciclo de vida y la matriz Arboleda de las diferentes fuentes energéticas, igualmente esta investigación sirvió de base para la elaboración del capítulo 12 del Libro “*Prospectiva Energética Colombia 2050*”, denominado “*Escenarios alternativos para la Reducción de Emisiones de los Recursos Energéticos*”.

El primero capítulo del presente documento corresponde a la introducción del estudio, en el cual se plantea la información básica del origen del mismo, así como las labores ejecutadas en el Semillero de investigación en Prospectiva Energética, los productos desarrollados y las socializaciones realizadas. Los capítulos dos, tres y cuatro hacen parte del cuerpo del documento y corresponden a los capítulos de gas natural, biomasa y nuclear respectivamente, estos presentan la situación mundial y nacional de cada energético, los impactos en el aire, el agua y el suelo de los mismo, el ciclo de vida de cada fuente de energía estudiada, así como algunas estrategias de mitigación. Una vez analizados los energéticos, se hizo necesaria su comparación en el capítulo cinco a través de la equiparación de los resultados de las emisiones de los ciclos de vida establecidos y la verificación mediante el método de la matriz de EPM o Arboleda de tales resultados, la cual brindó apoyo para la comparación del impacto ambiental presentada en este capítulo. El capítulo seis presenta las conclusiones del proceso investigativo desarrollado, el cual es respaldado por la bibliografía del capítulo siete.



2 GAS NATURAL

El gas natural básicamente es una mezcla de gases de hidrocarburos como el etano, propano, butano, pentano y entre un 70% a 90% de metano, su composición varía ampliamente y es denominado húmedo cuando se encuentran presentes hidrocarburos adicionales al metano, seco cuando la composición es principalmente de metano y ácido cuando posee sulfuro de hidrógeno (International Energy Agency, s.f.) Los combustibles fósiles soportan el 86% del consumo energético mundial (Promigas, 2014), por tanto, un corte abrupto y un paso automático hacia las energías renovables no es una posibilidad en la actualidad. Es en este caso, donde como lo definió Antonio Llardén, el gas natural puede ser el combustible ideal para realizar el proceso transicional entre las energías fósiles actuales y las renovables del futuro (La Vanguardia, 2014).

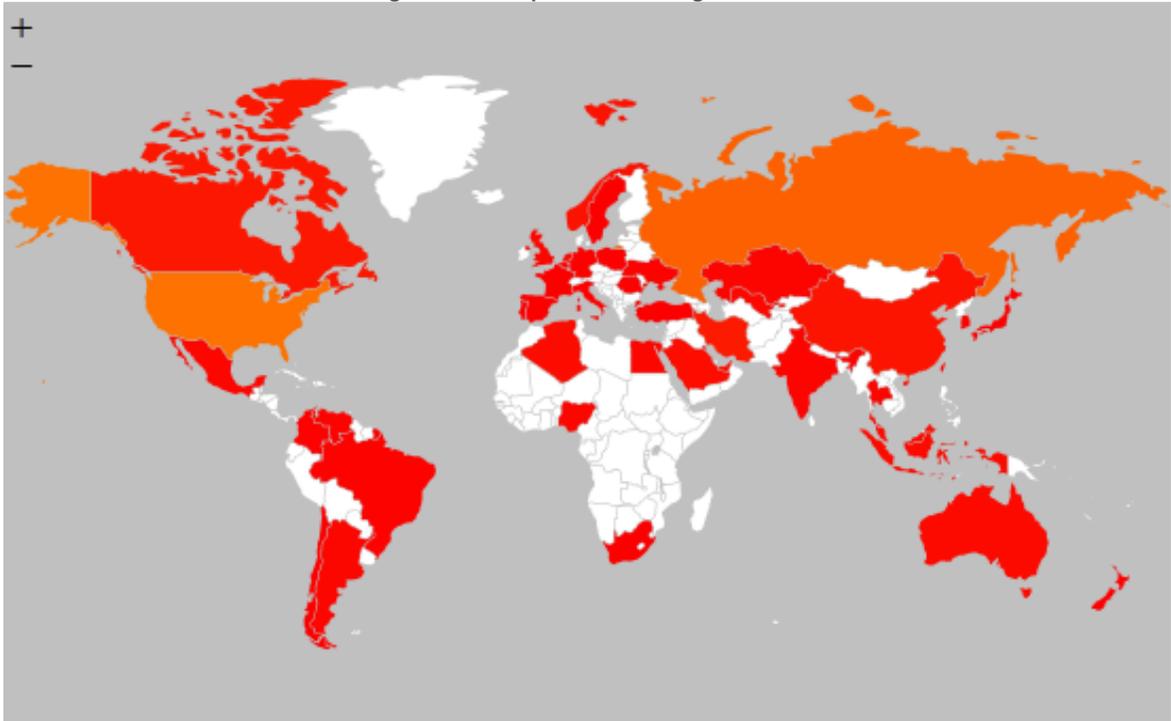
2.1 Hechos emblemáticos

Los múltiples acuerdos internacionales en relación al medio ambiente han originado un alto interés en el control de emisiones en todos los procesos y áreas que se relacionan con la producción de cualquier bien o servicio. La energía es una de las industrias de mayor escala en cualquier país, por tanto, el control de sus emisiones resulta significativo para la evaluación ambiental de las naciones. El gas natural ha sido un energético líder en la producción de energía, su participación equivale al 24% de la canasta energética mundial y sus reservas se han incrementado en 1% durante los últimos cinco años, así como su producción y consumo, con un incremento del 2% durante el mismo periodo (Promigas, 2014). Razón por la cual muchos escenarios prospectivos ubican al gas natural como una de las fuentes de mayor relevancia para la producción energética (BP, 2016).

La Figura 1 presenta los países productores de gas natural para 2015 donde los principales son Estados Unidos con 769 billones de metros cúbicos, seguido de Rusia con 650 billones de metros cúbicos. Colombia por otra parte generó 13 billones de metros cúbicos, y su tasa de crecimiento anual desde el año 2000 hasta el año 2015 fue de 3.8%, aunque tuvo una leve baja en comparación al año 2015 con el año 2014 de 0.2%. La tasa de crecimiento anual de la producción mundial de

gas natural desde el año 2000 hasta el año 2015 fue del 2.4%. (Global Energy Statistical, 2016)

Figura 1 Países productores de gas natural



Fuente: autor a partir de (Global Energy Statistical, 2016)

2.2 Gas natural en Colombia

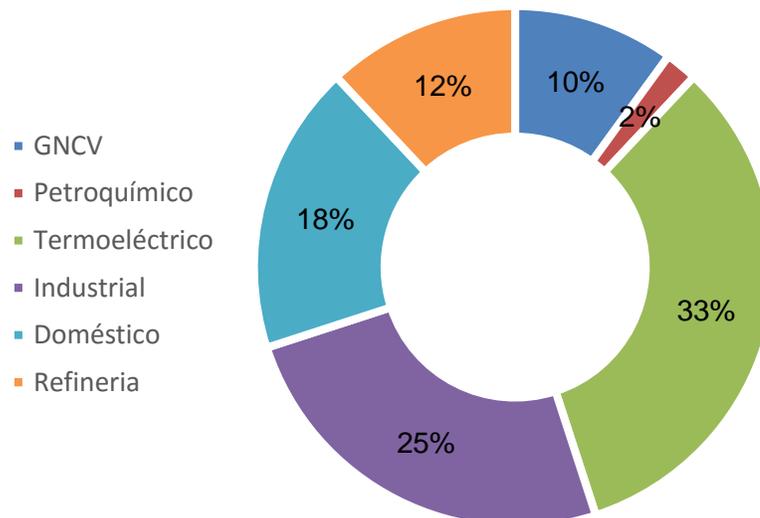
El gas natural a pesar de ser uno de los combustibles fósiles de mayor aceptación nacional no tuvo unos inicios tempranos, fue hasta el año 1977 con la puesta en funcionamiento de los campos en la guajira que se inició su comercialización. Posteriormente con el programa nacional *“Gas para el cambio”* se amplió su consumo, la interconexión de las ciudades y los descubrimientos de nuevos campos. En el año 1993 bajo el liderazgo del Ecopetrol se interconectaron con 2.000 km de gasoductos los principales yacimientos y los centros de consumo. En el año 1997 se creó el *“Fondo de solidaridad y redistribución de ingresos”* y la *“Empresa colombiana de gas” (ECOGAS)*, el primero para facilitar el acceso de gas natural a los sectores más necesitados y la segunda para separar la actividad del transporte de las labores del Ecopetrol. En este mismo año y el año siguiente, se otorgaron concesiones para la distribución de gas natural en el Quindío, Caldas, Risaralda, Valle y Tolima. Para el año 2003 el gobierno nacional estableció las estrategias y

recomendaciones para la masificación del gas natural en las “Estrategias para la dinamización y consolidación del gas natural en Colombia”. Posteriormente, en el año 2004 se inició la masificación del gas natural vehicular ofreciendo descuentos y bonos en el uso de este energético como sustituto a la gasolina o diésel. Virando hacia una visión internacional, no fue sino hasta el año 2007 en que se formalizaron las condiciones de intercambio del gas natural bajo un contrato que rige por 20 años. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2016)

2.2.1 Demanda de gas natural en Colombia

En Colombia la demanda de gas natural se distribuye principalmente en seis sectores: las refinerías, las industrias petroquímicas, las industrias en general, la demanda doméstica, el gas natural comprimido vehicular y el sector termoeléctrico; cada uno de ellos posee un porcentaje de participación dentro del consumo total el cual se muestra en la Figura 2. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

Figura 2 Distribución de la demanda del gas natural en Colombia 2014

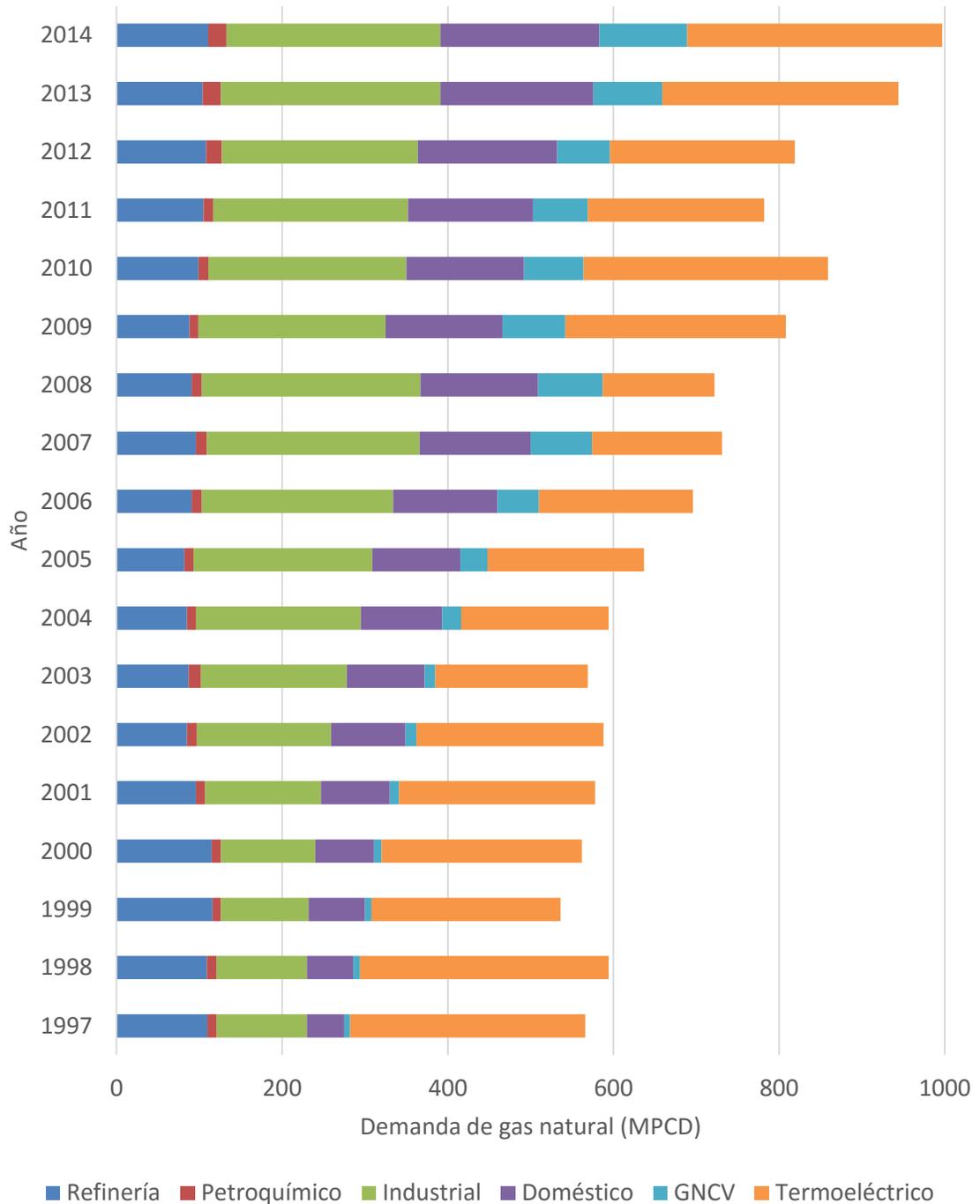


Fuente: autor a partir de (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

La demanda nacional de gas natural ha sido variante a lo largo de la historia (Figura 3). En el año de 1997 la demanda de gas natural en el país es relativamente baja con un total 567 millones de pies cúbicos diarios (MPCD), pero la misma alcanza su punto más bajo en el año de 1999 con un total de 535 MPCD debido a la recesión que se presenta en diferentes economías incluida la colombiana, para este año la demanda eléctrica se cuantificó en 41835.1 GWh lo cual significo una caída del

4.4% en relación al año de 1998, así mismo el consumo facturado de energía eléctrica registró una baja superior al 6% (Unidad de Planeación Minero energética, 2000).

Figura 3 Demanda de gas natural en Colombia, 1997 - 2014



Fuente: autor a partir de (SIMEC, s.f.)

En los años posteriores la tendencia fue al alza superándose por 1 MPCD en el 2004 la mostrada en 1998 con un total 594 MPCD para el 2004, aunque la distribución de la demanda varió significativamente donde el consumo termoeléctrico y de refinería disminuyeron en 122 y 24 MPCD respectivamente; mientras que se presentó un aumento de la demanda industrial, doméstica y vehicular de 90, 53 y 16 MPCD, respectivamente.

El crecimiento general fue nuevamente sostenido hasta el año 2008 donde la inminente crisis mundial generó turbulencias económicas que desestabilizaron varios sectores, dicha crisis inició con la ruptura en 2006 de la burbuja inmobiliaria y la posterior crisis hipotecaria americana en 2007, estas situaciones afectaron las economías mundiales y se presentaron diversas situaciones macroeconómicas donde caben resaltar la devaluación y la caída de las bolsas de valores en Latinoamérica (gasNatural, 2008). Dicha tendencia se recuperó con prontitud, en el año 2009 se observó un incremento de 87 MPCD en relación al 2008, aunque el único sector que mostró mejorías fue el termoeléctrico con un incremento de 131 MPCD, mientras los demás sectores manifestaron bajas de hasta 38 MPCD. Nuevamente, en el año 2011 se observa una caída en la demanda debido a dos siniestros en la infraestructura de transporte del gas natural, el atentado en el tramo Ballena – Barrancabermeja y el derrumbe del tramo Mariquita – Cali a raíz del fenómeno de la niña experimentado en el país (Concentra, 2011).

Para el año 2014 se presentó la mayor demanda del periodo evaluado con 989 MPCD, distribuidos entre los seis sectores de la siguiente forma: refinería con 111 MPCD, las industrias petroquímicas con 22 MPCD, el sector industrial y doméstico con 258 y 192 MPCD, respectivamente; el sector transporte con 106 MPCD y el termoeléctrico con 308 MPCD. En cuanto a la demanda en el año 2015, según la revisión de mayo de 2016 de la proyección de gas natural en Colombia 2016 – 2030, la misma sufrió una caída del 3.18% en relación al 2014 esto por la caída general de todos los sectores, atribuibles en algunos casos a fenómenos ambientales (Unidad de Planeación Minero Energética, 2016).

2.2.2 Oferta de gas natural en Colombia

La oferta del gas natural viene representada tanto por las reservas existentes, como por la producción del energético. Según declaratorias hechas por la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Colombia podrá ser autosuficiente en materia de gas hasta el año 2021, aún con el aumento del consumo. Dado que la

producción diaria en pies cúbicos es 1160 mientras que el consumo es de tan solo 1036 MPCD (Efigas S.A.E.S.P, 2015).

2.2.2.1 Reservas de gas natural en Colombia

Las reservas de gas natural son clasificadas en reservas probadas, probables y posibles, la suma de estas tres equivale a las reservas totales del energético (Unidad de Planeación Minero Enegetica, 2016), las mismas varían según comportamientos no solo internos, sino externos como las tasas exploratorias, la economía y las políticas adoptadas. En Colombia la variación de las reservas ha sido constante año tras año (Figura 4), para el año 2000 se obtuvieron reservas totales de 6188 Giga pies cúbicos – Gpc con una producción de 210 Gpc para el mismo año, para el año siguiente se presenta la mayor variación del periodo estudiado equivalente a 21% en relación con el año anterior, dada la incorporación de 7489 Gpc debido a la reapertura de la exploración luego de una década difícil y marcada por un deterioro de la seguridad interna (López, Montes, Garavito, & Collazos, 2012), donde en el periodo 2000 a 2003 se realizó la exploración sísmica de 2300 km arrojando para el año 2003 la suma de 6688 Gpc de gas natural de reserva.



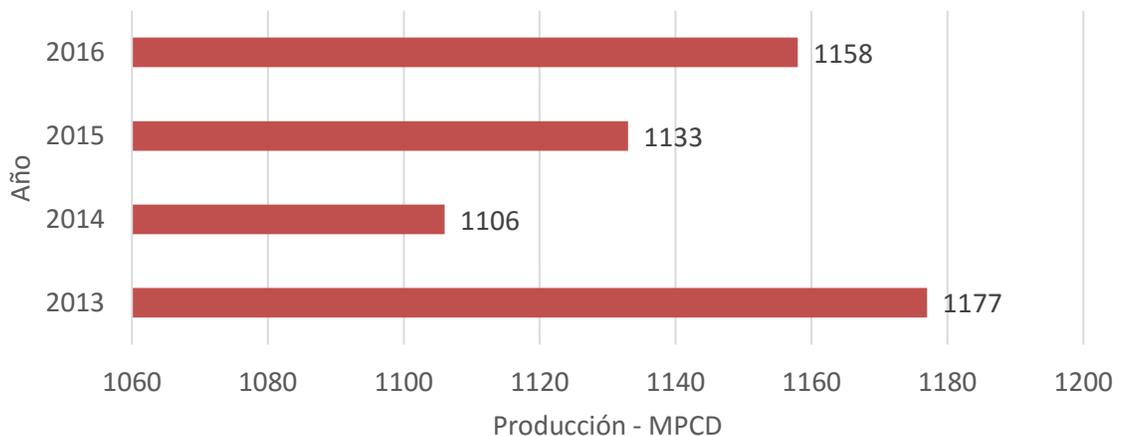
Fuente: autor a partir de (Unidad de Planeación Minero Enegetica, 2016) & (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015)

La contratación y exploración petrolera se dispararon desde el año 2005 después de la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (López, Montes, Garavito, & Collazos, 2012), obteniéndose los mejores resultados de la primera década del tercer milenio en materia de reservas de hidrocarburos, en cuanto al gas natural este tuvo su máxima incorporación de reservas no solo de la década, sino de lo registrado a la fecha, en el año 2009 con 8460 Gpc de gas natural de reserva. Dicha situación ha descendido desde este año, alcanzando en 2015 reservas cuantificadas en 5443 Gpc.

2.2.2.2 Producción de gas natural en Colombia

La producción diaria estimada de gas natural en el país durante los últimos cuatro años tuvo su máximo de 1177 MPCD en el año 2013 (Figura 5), equivalente a una producción anual de 458 Gpc (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015), el segundo año de mejor producción durante este periodo se presentó en lo corrido del año 2016 con 1158 MPCD.

Figura 5 Producción de Gas Natural en Colombia



Fuente: autor a partir de (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2016)

Entre el año 2010 y el año 2014 se disminuyó la producción de los campos de la Guajira en 64 Gpc (Promigas, 2014). Pero la masificación del gas natural en el país, ocasionada por el Programa de Masificación de Gas lanzado en 1993 y cuyo objetivo era sustituir la electricidad para los usos calóricos domiciliarios, así como reemplazar los derivados del petróleo y el carbón en el sector industrial, además de convertir la generación eléctrica a través de ciclos combinados y de gas, en apoyo con los descubrimientos de Cusiana, Cupiagua, Volcanera y Opón impulsó la

construcción de los sistemas de distribución del gas natural (Kozulij, 2004). En Colombia el gas natural es transportado a través del Sistema Nacional de Transporte (SNT), el cual es el conjunto de gasoductos nacionales excluidas las conexiones y los gasoductos dedicados que conectan las zonas de producción con las ciudades, los sistemas de distribución, los usuarios no regulados, las interconexiones internacionales y los sistemas de almacenamiento (Resolución No. 001 CREG, 2000). Esta red es mostrada en la Figura 6.

Figura 6 Gasoductos y campos de gas en Colombia



Fuente: autor a partir de (Ecopetrol, 2014)

2.3 Impactos ambientales

Cuando se habla de impactos ambientales, usualmente se asemeja solo con la producción de gases contaminantes, pero los mismos abarcan diversos aspectos adicionales a las emisiones atmosféricas, como la contaminación en el agua y en suelo/ecosistema. Para ello se observan tres parámetros principales como lo son la huella de carbono o carbon footprint, relacionada con el calentamiento global (Singh & Bakshi, 2015) y definida como la medida total de emisiones directas e indirectas de dióxido de carbono, producidas por una actividad o acumuladas en el ciclo de vida (Wiedmann & Minx, 2008). La huella hídrica o water footprint por su parte, es básicamente la cantidad de agua usada para la producción de un bien o servicio, como la energía (Hadian & Madani, 2015). En cuanto a la huella en la tierra o land footprint equivale está a la contaminación en el suelo/ecosistema y se traduce como el uso de la tierra para producir bienes o servicios (Bosire, y otros, 2015), o lo que es igual la cantidad de área necesaria para la producción de un bien o servicio.

Tabla 4 Impactos de la producción de energía fósil

	Tipo de Energía	Mín.	Máx.
Huella de Carbono (g CO ₂ /kWh)	Carbón	834	1026
	Petróleo	657	866
	Gas Natural	398	499
Huella Hídrica (m ³ /GJ)	Carbón	0.15	0.58
	Petróleo	4.29	8.6
	Gas Natural		0.1
Huella en la Tierra (m ² /GWh)	Carbón	83	567
	Petróleo		1490
	Gas Natural		623

Fuente: autor a partir de (Hadian & Madani, 2015)

La Tabla 4 presenta las diferentes huellas para los principales combustibles fósiles. El carbón obtiene los peores resultados en relación a la huella de carbón, al compararse el mismo con el petróleo y el gas natural puesto que su huella de carbono tiene un máximo de 1026 g CO₂/KWh. En relación a la cantidad de agua requerida o huella hídrica, el petróleo posee uno de los mayores consumos con un máximo de 8.6 m³/GJ, mientras el gas natural requiere de 0.1 m³/GJ; esta situación se repite en la huella en la tierra, en donde son necesarios 1490 m² de tierra para producir un GWh de energía a partir del petróleo, mientras que en el gas natural se requieren de 623 m² y del carbón un máximo de 567 m² para producir la misma energía.

2.3.1 Contaminación del aire

La contaminación atmosférica es una de las mayores preocupaciones de las organizaciones internacionales (Aprobación del Acuerdo de París, 2015), pero el gas natural se perfila como el más limpio de los combustibles fósiles, dado que los principales productos de combustión del mismo son el dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua (NaturGas, 2013). Así mismo, para producir una misma unidad de calor se reducen en un 30% las emisiones de CO₂ con la quema de gas natural en comparación con las de petróleo y un 45% en relación con la quema de carbón (Onar & Khaligh, 2015), el dióxido de carbono hace parte del ciclo global y es uno de los principales gases menores, se produce por las emisiones de volcanes, la respiración, la evaporación oceánica y por la combustión, entre otros; los niveles atmosféricos altos de CO₂ se relacionan con el calentamiento global (cambioclimaticoglobal.com, s.f.). La Tabla 5 presenta la comparación de las diferentes emisiones de la combustión de los principales combustibles fósiles.

Tabla 5 Emisiones por combustión de los principales combustibles fósiles en libras por Billón de BTU

Contaminante	Gas Natural	Petróleo	Carbón	Tendencia
Dióxido de Carbono	117000	164000	208000	
Monóxido de Carbono	40	33	208	
Óxidos de Nitrógeno	92	448	457	
Dióxido de Azufre	1	1122	2591	
Material Particulado	7	84	2744	
Mercurio	0.000	0.007	0.016	

Fuente: autor a partir de (NaturGas, 2013)

El monóxido de carbono (CO) producido por la combustión incompleta de los compuestos de carbono; principalmente por el combustibles de vehículos y en el hogar de las estufas, los cigarrillos, entre otros; reacciona con la hemoglobina en lugar del oxígeno generando carboxihemoglobina, el CO tiene entre 200 a 250 veces mayor afinidad que el oxígeno con la hemoglobina y forma un enlace estable e intenso (Solanes, Codina, & Casan, 1999), en España cada año entre 5000 y 10000 personas padecen intoxicación por CO, de las cuales 125 mueren (Farmacosalud.com, 2015). Así mismo, el monóxido de carbono afecta el desarrollo de los niños y las funciones neuroconductuales (Ministerio de Medio Ambiente de Chile, s.f.). El gas natural representa una gran ventaja en generación de CO en

relación con el carbón, donde el segundo tiene emisiones por 208 Lb/BBtu, mientras el primero emite solo 40 lb/BBtu.

Los óxidos de nitrógeno o NOx, por su parte, son generados en las zonas de altas temperaturas de las calderas, donde ocurre la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno la cual se agudiza en mayor presencia del segundo, los altos picos de temperatura y la exposición prolongada a estos dos factores (Davis, 2000). El NOx participa en la formación del smog fotoquímico y la lluvia acida, así mismo genera afectaciones al sistema respiratorio (Sistema de Información Ambiental de Colombia, s.f.).

El gas natural marca grandes diferencias en comparación con el carbón y el petróleo generando reducciones de 365 y 356 libras de NOx por billón de Btu, respectivamente. En cuanto al dióxido de azufre (SO₂), sus emisiones son bastantes reducidas; el gas natural produce solo 1 Lb/BBtu mientras el petróleo genera 1122 y el carbón 2591 Lb/BBtu. Las emisiones de SO₂ del gas natural se generan a partir de contenido de sulfuro en el gas natural y/o la oxidación de los mercaptanos introducidos para la detección del mismo (Davis, 2000), se conoce este compuesto por formar ácidos en presencia de humedad los cuales ingresan a las vías respiratorias y al sistema circulatorio afectando los órganos vinculados a su proceso, así como al corazón, adicionalmente permiten la entrada del material particulado secundario o fino PM2.5 al organismo, puede genera afecciones a las corneas y alteraciones a la psiquis; produce el daño y destrucción de plantas, suelos, edificaciones y acuíferos (Ministerio de Medio Ambiente de Chile, s.f.).

El material particulado o PM corresponde al conjunto de partículas sólidas y líquidas, donde no se incluye el agua, suspendidas en la atmosfera, el mismo proviene de fuentes antropogénicas y no antropogénicas. Su presencia se relaciona con la disminución de la visual atmosférica dados los procesos de dispersión de la luz que ocasiona y está relacionado con el incremento de riesgos cardiopulmonares en adultos (Arciniégas Suárez, 2012), la afectación a los procesos de fotosíntesis de las plantas y el incremento de la precipitación o lluvias, entre otros. (Jaramillo Espinosa, 2001)

Las ventajas del gas natural en relación al petróleo y el carbón son evidentes en la Tabla 5 donde la reducción en comparación con el petróleo equivale a 77 Lb/BBtu y el carbón 2737 Lb/BBtu de material particulado generado. Por otra parte, el mercurio suele no permanecer en el organismo dada su densidad, pero la inhalación de sus vapores provenientes de la combustión de algunos elementos fósiles como el carbón, puede causar síntomas agudos o crónicos como vómito, dificultad respiratoria, encías sangrantes e inflamadas, tos fuerte, daño pulmonar, diarrea,

entumecimiento, temblor, incapacidad de caminar bien, ceguera, visión doble, problemas de memoria, convulsiones y en algunos casos la muerte (Heller, 2015). En el medio ambiente el mercurio suelo terminar en los suelos y las aguas superficiales, las emisiones antropogénicas del mismo se hacen principalmente presentes en fuentes hídricas donde los peces absorben este elemento (ECODES, 2005). El gas natural no tiene emisiones de mercurio durante su combustión, por tanto, su utilización se hace positiva en este aspecto si se compara con combustibles fósiles como el petróleo y el carbón (Tabla 5).

2.3.2 Contaminación del agua

La producción energética al igual que muchos otros sectores, se ve altamente afectada por las condiciones y variaciones climáticas como el fenómeno del niño el cual consiste en calentamiento anormal del océano pacífico ecuatorial y la disminución de la presión atmosférica en el pacífico sur en las zonas costeras de Perú, Ecuador y Colombia, generando en este último variaciones en la precipitación de $\pm 60\%$ y aumento de hasta 20°C en la temperatura media mensual del aire (Bonilla, Rosales, & Maldonado, 2003), en cuyos casos las demandas termoeléctricas y no termoeléctricas pueden no verse satisfechas, puesto que la capacidad de los gasoductos se ve sobre exigida (Giaino, 2009).

Los requerimientos de agua para la producción de energía a partir del gas natural equivalen a 76 metros cúbicos por cada mega watt hora de energía producido (Fthenakis & Chul Kim, 2010), este valor se ve aumentando cuando se utiliza el fracturamiento hidráulico para la extracción del gas natural puesto que se requieren en promedio 15141 metros cúbicos por cada pozo perforado (dangersoffracking.com, s.f.).

Los energéticos fósiles no convencionales como el gas, generan riesgos para las comunidades aledañas a través de la contaminación de fuentes hídricas superficiales y subterráneas con químicos potencialmente dañinos presentes en las mezclas químicas de fracturamiento, así mismo por los derrames, desbordes o filtraciones que se pueden producir durante el almacenaje, temporadas de lluvias, transporte y mezcla con el agua o transporte de los residuos y aguas de retorno, fallas de los ductos, entre otros. El consumo de agua durante el fracking genera igualmente, una problemática puesto que se requieren enormes cantidades de esta durante el enfriamiento, lubricación y extracción de la tierra perforada y la inyección de agua presurizada para fracturamiento, la cual se mezcla con decenas de químicos, donde en general, se requieren entre 9000 y 29000 metros cúbicos de

agua por pozo perforado, cantidad que se ve ampliada cuando se analiza todo el campo de perforación. Donde de ser necesarios seis pozos se requieren entre 54000 y 174000 metros cúbicos de agua para su perforación (Secretaria de medio ambiente, 2012). Otra situación de riesgo es la fuga de los fluidos de fracturación, hidrocarburos o agua salina (Sández Arana, 2014) , igualmente se ha observado la aparición frecuente de metano en el agua de consumo en las áreas cercanas a los campos de explotación de gas no convencional, aunque el metano no se muestra en la actualidad como un elemento de riesgo para la salud (Harvitt, 2013).

Un gran riesgo asociado al fracking, son los derrames de los líquidos de fracturamiento que son considerados por las industrias como secretos comerciales y tienen químicos cancerígenos asociados a sus contenidos (Zissu, 2016); algunos estudios sospechan del uso de más de treientos compuestos dentro de los cuales 65 son contemplados peligrosos, como es el caso del benceno considerado cancerígeno (Lustgarten, 2008). Gran parte de los riesgos asociados al fracking provienen de la mala implementación de los procedimientos o las normativas; en Colombia el gobierno nacional es el encargado de definir los criterios y procedimientos para la exploración y explotación de los recursos no renovables técnica, económica y ambientalmente con el ánimo de garantizar el desarrollo sostenible de los recursos atendiendo a buenas practicas industriales (Echenique Mestre , 2015).

2.3.3 Contaminación del suelo/ecosistema

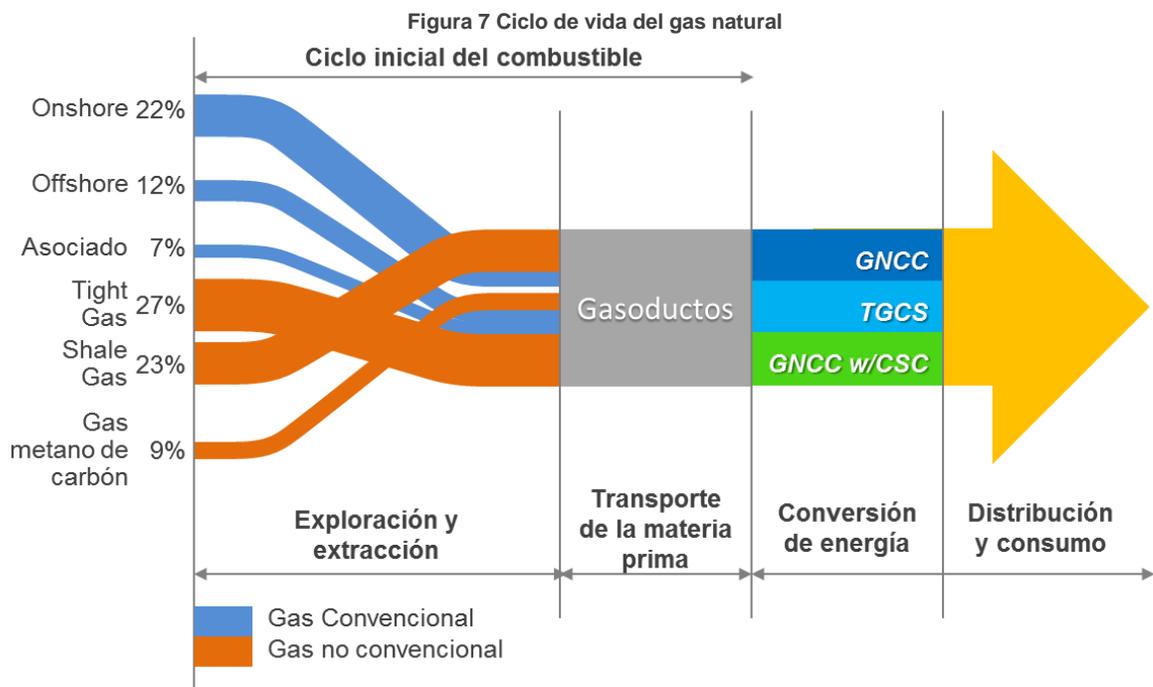
Durante los procesos de exploración de gas natural es necesario realizar la afectación de los suelos y los ecosistemas generándose caminos de tránsito y áreas de exploración y explotación gasífera la cual perturba la vida silvestre, las fuentes hídricas y la población residente. Una vez hecha la exploración y explotación se requiere del transporte del gas extraído, el cual se conduce a través de gasoductos, los cuales deben ser construidos por largas superficies hasta llegar a los centros de distribución generándose división de territorios y afectaciones a los ecosistemas, igualmente se genera la erosión de los suelos, perdidas de minerales y traslado de contaminantes peligrosos. De igual forma, los riesgos relacionados con la producción, transporte, distribución y almacenamiento merecen de especial cuidado y atención puesto que el mismo es un material inflamable y sus escapes pueden desencadenar explosiones. (Energy Information Administration, 2016)

Por otro lado, la explotación de gases no convencionales ha generado nuevos impactos ambientales como el tratamiento de los fluidos de retorno los cuales son

los líquidos de explotación que regresan a la superficie y deben ser tratados, la afectación del suelo, la flora y la fauna, la contaminación acústica por periodos de fracturamiento de veinticuatro horas continuas o superiores, el alto tráfico de vehículos y modificación del paisaje y los hábitats por la construcción de campos de extracción. (Sández Arana, 2014)

2.4 Ciclo de vida del gas natural

La generación de energía a partir de cualquier combustible posee una serie de emisiones que deben ser analizadas. El análisis del ciclo de vida (Figura 7) es una metodología basada en la identificación de los impactos ambientales del ciclo entero del producto o el servicio, es decir un análisis que determina las emisiones desde la cuna a la tumba. Esta metodología resulta ideal para la realización de comparaciones, en este caso de energéticos. (Pryshlakivsky & Searcy, 2013) La misma, aunque propicia y adecuada también posee una serie de limitaciones, especialmente en materia de inventarios puesto que requiere información particular que en muchas ocasiones es asumida y basada en valores relativos o de otros estudios.



Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

Con el ánimo de realizar las comparaciones pertinentes entre los distintos energéticos, se establece a continuación el ciclo de vida para la generación eléctrica a partir del gas natural donde las etapas tenidas en cuenta corresponden al ciclo inicial del combustible comprendido por la exploración y extracción, así como por el transporte de la materia prima. Además de la conversión de la energía como etapa individual, omitiendo la distribución y el consumo final de la electricidad generada. Dentro de cada etapa tomada en cuenta se observan diferentes fases como la caracterización del combustible utilizado en el estudio, las tecnologías para el transporte y diversos generadores de energía.

2.4.1 Ciclo inicial del combustible

El ciclo inicial del combustible o la fase “*Upstream*” del inventario, equivale a todas las actividades necesarias para la consecución y el transporte del combustible antes de que el mismo sea transformado en la planta de energía. (Skone, y otros, 2014)

2.4.1.1 Exploración y extracción

Durante la exploración se realiza el análisis de las características de los suelos a través de la comparación de las mismas con referencias base, estos y otros análisis pueden generar afectaciones a la flora y la fauna presente en campo. Caso evidente en la exploración sísmica donde el uso de explosivos altera las capas del suelo y las fuentes hídricas subterráneas (Union of Concerned Scientists: Science for a healthy and safer world, s.f.). La extracción del gas natural ocurre gracias a la expansión del mismo al romperse el ambiente de presión controlada, previo a la perforación, al que se encontraba sometido. La vida útil de los pozos puede verse ampliada por la inclusión de técnicas de compresión (PDVS, s.f.), aunque estas pueden incurrir en aumentos de las emisiones.

Durante la extracción del gas natural se observan múltiples etapas. La construcción e instalación es una de ellas, en esta etapa se realiza la perforación del pozo, la inclusión de la camisa de concreto y la tubería de acero al carbono de 8.6 pulgadas de diámetro (promedio) que brindan fuerza y previenen la contaminación de las formaciones geológicas aledañas; durante este proceso se emite metano proveniente de la extracción. La cantidad de emisiones varía en orden al tipo de combustible a extraer. Otra etapa es la culminación del pozo, en esta etapa, aunque no es constante sino única, las emisiones son altas debido a los escapes de metano que se producen durante la instalación de los equipos. Igualmente ocurre durante

la descarga de líquidos condensados que obstaculizan el flujo del gas natural, esta labor se realiza esporádicamente en los pozos convencionales, pero posee grandes emisiones asociadas. Por otro lado, los reacondicionamientos y mantenimientos se realizan periódicamente para la limpieza de los pozos y la re-estimulación de las formaciones de gas en los pozos de *shale* y *tight gas*. Durante estas etapas las emisiones fugitivas de metano provenientes de algunos accesorios y equipos son posibles y constantes, así como las emisiones por ventilación y quema, (Skone, y otros, 2014) esta última consumió en 2011 aproximadamente 5.3 trillones de metros cúbicos de gas natural. (The World Bank, 2012). A continuación, se referencia el gas natural en relación a su forma de extracción.

2.4.1.1.1 Gas natural convencional *Onshore*

El gas natural convencional *onshore* o de tierra firme es extraído por perforación vertical, el mismo no requiere de una preparación o estimulación significativa. Pero si resulta necesario en pozos maduros la remoción o descarga de líquidos que impidan el flujo del gas natural, así como la reparación de los pozos y el reemplazo de los equipos de extracción. Una problemática frecuente es la ventilación del metano, esta se realiza cuando los equipos de extracción no se encuentran completamente instalados o cuando los mismos se encuentran en mantenimiento. Las emisiones de metano durante la ventilación se pueden reducir con la quema de este gas, disminuyendo así las emisiones con la conversión del metano (CH₄) en dióxido de carbono (CO₂). Otras emisiones de metano ocurren en procesos en los que no resulta técnica o económicamente viable el uso de equipos de recuperación. (Skone, y otros, 2014)

2.4.1.1.2 Gas natural convencional *Offshore*

El procedimiento de recuperación del gas natural es similar al de pozos *onshore*. La mayor problemática presente en la perforación *offshore* es que el reservorio del gas natural debe ser lo suficientemente grande para justificar las inversiones de perforación y construcción de la plataforma petrolera. (Skone, y otros, 2014)

2.4.1.1.3 Gas natural asociado

Muchos de los pozos de perforación *onshore* y *offshore* de petróleo producen gas natural asociado, y viceversa. Este gas natural posee pérdidas debido a la

construcción del pozo, reparación y emisiones fugitivas, tal como sucede en los demás recursos como los *onshore* y *offshore*. Una ventaja del gas natural asociado es la eliminación de la descarga de líquidos ya que el petróleo presente en el pozo, evita la acumulación de los líquidos. (Skone, y otros, 2014)

2.4.1.1.4 Tight gas

El *tight gas* o gas de arenas compactas dada su baja permeabilidad y porosidad requiere de equipos con tecnologías especiales para su extracción (Masarik, 2014). Estos reservorios no convencionales de arenas productoras de hidrocarburos producen usualmente gas seco, su nombre de origen político, se refiere a reservorios con permeabilidad estimada menor a 0.1 mD (milidarcy). Estos gases no convencionales requieren de la implementación del fracturamiento hidráulico, el cual se basa en las propiedades mecánicas de cada tipo de roca envuelto en las capas caracterizadas del pozo para su desarrollo. (Blanco Ybáñez & Vivas Hohl, 2014)

2.4.1.1.5 Shale gas

El gas natural se puede encontrar contenido en capas de *shales* o esquisto (Blanco Ybáñez & Vivas Hohl, 2014), el mismo se encuentra almacenado en poros con escalas nanométricas y se puede extraer por diferentes métodos (Song, y otros, 2016). El esquisto son rocas sedimentarias de grano fino que pueden ser ricas en petróleo y gas natural, formadas por la acumulación de sedimentos en los cuerpos de agua (ShaleTEC, s.f.). El *shale gas* considerado un gas no convencional no puede ser extraído por métodos tradicionales, para ello requiere de perforaciones horizontales y fracturamiento hidráulico. Este último estimula la producción de gas rompiendo las sustancias impermeables que impiden el paso del gas contenido en la roca (Skone, y otros, 2014), el mismo está asociado a múltiples afectaciones ambientales como la contaminación de acuíferos subterráneos, la calidad del aire y la sismicidad inducida en algunos territorios (Goodman, y otros, 2016) (Kuchment, 2016). El ciclo de vida del gas natural incluye múltiples procesos como la construcción del pozo, perforación horizontal y vertical, el fracturamiento hidráulico entre otros. (Raj, Ghandehariun, Kumar, & Linwei, 2016)

2.4.1.1.6 Gas metano de carbón

El gas natural puede ser recuperado de las minas de carbón a través pozos generados por perforaciones horizontales superficiales los cuales requieren de un periodo despresurización para la descarga natural del agua del pozo. Estas perforaciones poseen emisiones similares a los yacimientos de *shale gas*. Frecuentemente estos yacimientos requieren del fracturamiento hidráulico para su perforación, aunque este no es necesario si se realizan perforaciones horizontales puesto que los pozos se alinean con las fracturas de la capa de carbón. La principal ventaja ambiental de esta fuente de gas natural es la baja presión la cual determina las emisiones de gases efecto invernadero del pozo. (Skone, y otros, 2014)

2.4.1.2 Procesamiento

Durante el procesamiento del gas natural se realizan diferentes tratamientos que permiten el mejoramiento de las calidades del combustible, así mismo se suprimen compuestos que afectan los sistemas de producción. Por un lado, la deshidratación del gas donde el agua reduce la capacidad energética del combustible y genera la oxidación de los gasoductos, tanques y otros equipos. El dióxido de carbono afecta los procesos criogénicos a los que se somete el gas natural licuado (Perez, 2012), la mayor parte de este es absorbido por la etapa de endulzamiento. La remoción de ácidos es otra actividad pertinente, el gas natural crudo contiene diferentes proporciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) el cual reduce el poder calórico del gas natural y produce desechos durante la combustión; entre tanto en esta etapa hay emisiones de metano (CH_4). y es necesaria la ventilación y quema del mismo. Otra fase del procesamiento es la compresión para aumentar las presiones dentro de las tuberías de gas de 50 psig a 800 psig aproximadamente. (Skone, y otros, 2014) Durante estas etapas son necesarios equipos que generan emisiones y por tanto originan impactos ambientales asociados en el ciclo de vida.

2.4.1.3 Transporte de materia prima

El transporte masivo de gas natural se realiza a través de gasoductos, los mismos son construidos con tuberías de 32 pulgadas (aproximadamente) y poseen estaciones de compresión cada 50 a 100 millas (Skone, y otros, 2014). Para el buen funcionamiento de estas líneas de conducción son necesarias juntas herméticas y materiales inoxidables de altas resistencias que reduzcan los riesgos de oxidación y por ende de fugas de gas, durante este proceso se generan las principales emisiones de metano, el cual es uno de los mayores gases efecto invernadero con una vida media de 12 años y 25 veces mayor eficiencia en la captura de calor en relación al dióxido de carbono. (Boston University: Arts & Science Magazine, 2012)

(Anifowose & Odubela, 2015). Existen otros medios de transporte y almacenamiento de gas natural, como es el transporte marino del gas natural licuado con buques que permiten el proceso de licuefacción reduciendo el volumen transportado en un factor de 600. (Union of Concerned Scientists: Science for a healthy planet and safer world, s.f.) Por otro lado, la necesidad de almacenar los combustibles para usos futuros ha generado grandes avances. El gas natural puede ser almacenado en cilindros de diferentes tamaños, pero requiere del apoyo de equipos y de altos consumos de energía. (Shell, s.f.)

2.4.1.4 Emisiones durante el ciclo de vida inicial del combustible

Los avances científicos y tecnológicos han sido evidentes en las últimas décadas. La industria del gas natural no ha sido ajena a esto, muchos de los pozos fueron desarrollados hace décadas con diferentes tecnologías con baja productividad. Los pozos de extracción poseen un tiempo de vida productiva, muchos de estos iniciaron su funcionamiento décadas atrás y actualmente su productividad es baja. Los mismos poseen altas emisiones, en muchos casos debido a las tecnologías aplicadas durante todo su ciclo de vida. Los pozos de tasa de producción promedio representan todos los pozos productivos incluyendo los viejos y de baja productividad. Mientras que los pozos de tasa de producción marginal simbolizan aquellos pozos nuevos y de alta productividad.

Tabla 6 Emisiones del ciclo de vida inicial del combustible

Recurso		Pozos promedio (g CO ₂ e/MJ)	Pozos marginales (g CO ₂ e/MJ)
Convencional	Onshore	8.8	7.7
	Offshore	6.1	6
	Asociado	7.6	7.6
No Convencional	Tight Gas	9	9
	Shale Gas	9.1	9.1
	Gas metano de carbón	7.8	7.8

Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

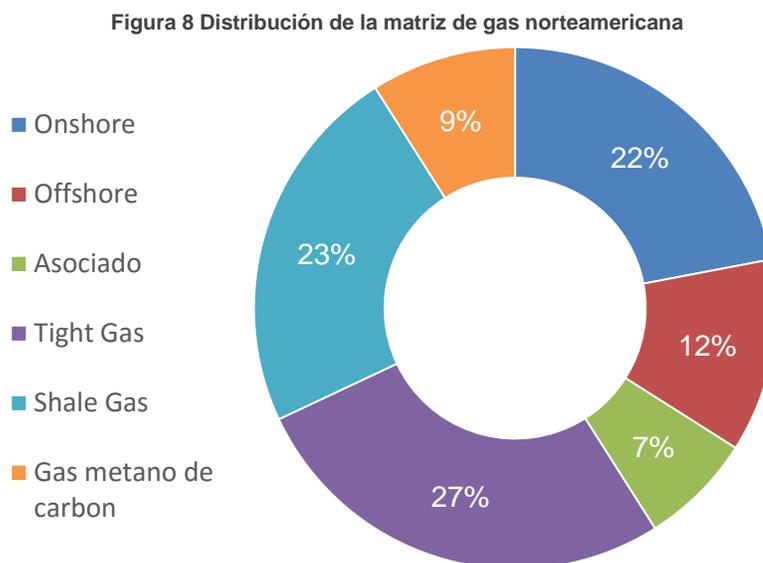
Las emisiones más bajas del ciclo inicial del combustible corresponden a los yacimientos offshore y a los asociados a extracciones petroleras. Por un lado, en los pozos offshore el flujo de gas natural es muy alto por lo que no se requiere de la descarga de líquidos periódica. Por otro lado, en los pozos asociados la co-producción de petróleo remueve constantemente la presencia de líquidos. Por tanto, en ambos casos la etapa de descarga de líquidos es básicamente eliminada reduciendo por ende las emisiones del proceso.

2.4.2 Conversión de energía

El gas natural tiene muchos usos alternativos, el mismo posee la capacidad de suplir demanda termoeléctrica, térmica y de cocción, además de demanda de combustible vehicular, esto dada su pluralidad de usos. (U.S. Department of Energy, 2015) Pero el ciclo de vida expuesto equivale a la generación de energía eléctrica. Esta generación puede realizarse desde diferentes metodologías donde algunas pueden incluir la captura de emisiones. A continuación, se describen los procesos base en el cálculo del ciclo de vida.

2.4.2.1 Mezclas de gas natural

El gas natural puede provenir de diferentes procesos y ser de diferentes tipos. Ya sea convencional o no convencional el mismo hace parte de una matriz. Para el caso de estudio realizado por el *U.S. Department of Energy*, se observa la matriz de gas natural norte americana. En dicho análisis se encuentra la mezcla nacional (Figura 8), la cual hace referencia a los porcentajes de distribución del gas natural según sus orígenes para la generación de energía, esta mezcla es la utilizada para la realización del cálculo de las emisiones del proceso de conversión.

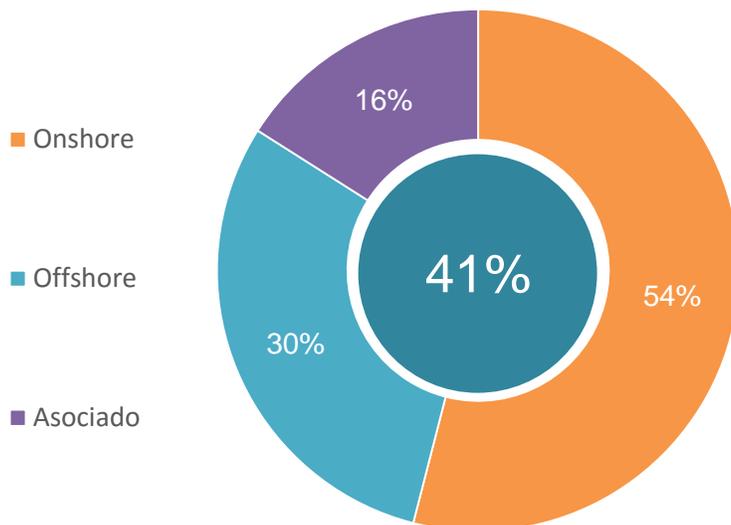


Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

En este caso el 41% del combustible proviene de yacimientos convenciones y un 59% de yacimientos no convencionales. Esta relación permite el cálculo más preciso de las emisiones de ciclo vida. Dentro de esta mezcla el 22% del gas natural

proviene de yacimientos *onshore*, el 12% de pozos *offshore* y el 7% es gas asociado con extracciones petroleras. En cuanto a los gases no convencionales, estos aportan el 27% desde el *tight gas*, el 23% desde el *shale gas* y un 9% de gas metano de carbón.

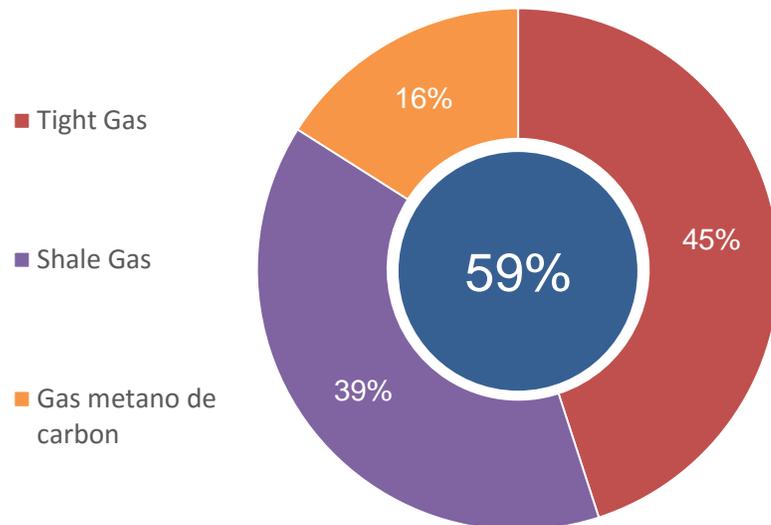
Figura 9 Aporte de los yacimientos convencionales a la matriz del gas natural



Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

Dentro de esta distribución se puede observar que el aporte de los gases naturales convencionales es de 41% de la mezcla nacional, el 54% de dicho aporte proviene de yacimientos *onshore*, mientras que el 30% del mismo es obtenido a partir de yacimientos *offshore*, los gases asociados aportan el 16% de este total (Figura 9).

Figura 10 Aporte de los yacimientos no convencionales a la matriz del gas natural



Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

Por otro lado, los gases no convencionales generan un aporte mucho mayor, este equivale al 59% de la matriz de gas natural Norteamérica, el principal contribuidor no convencional es el *tight gas* con el 45% del total aportado, el *shale gas* añade el 39% de este total, mientras que el gas metano de carbón participa con el 16% (Figura 10).

2.4.2.2 Gas natural de ciclo combinado (GNCC)

Las plantas termoeléctricas de gas natural de ciclo combinado se basan en un ciclo de recuperación de calor, estas centrales poseen turbinas de combustión de gas que son seguidas por un sistema generador de vapor de recuperación de calor el cual busca capturar el calor excedente de las turbinas de combustión de gas y una vez transformado en vapor llevarlo a una turbina de vapor para potenciar la generación termoeléctrica a partir de la misma cantidad de combustible. En algunos casos este proceso puede acompañarse por sistemas de captura y secuestro de carbono (GNCC w/CSC). El consumo de agua en este proceso es elevado. (Skone, y otros, 2014)

2.4.2.3 Turbina de gas de ciclo simple (TGCS)

Las plantas de turbina de gas de ciclo simple poseen turbinas simples de combustión de gas. El proceso y las emisiones son similares a los sistemas de GNCC, omitiendo las etapas relacionadas con los procesos de recuperación de calor. (Skone, y otros, 2014)

2.4.3 Emisiones totales del ciclo de vida

Una vez analizadas las diferentes etapas del ciclo de vida descritas y teniendo en cuenta los datos establecidos, se obtiene el computo de las emisiones atmosféricas del ciclo de vida del gas natural. La Tabla 7 muestra los resultados del cálculo de las emisiones para cada una de las fases anteriormente relacionadas, así como la cuantificación por tecnología de conversión.

Tabla 7 Emisiones del ciclo de vida del gas natural

Tecnología	Ciclo inicial		Conversión de energía - CE (gCO ₂ e/kWh)	Total (gCO ₂ e/kWh)
	Exploración, extracción y procesamiento - EEP (gCO ₂ e/kWh)	Transporte de la materia prima - TMP (gCO ₂ e/kWh)		
Gas natural de ciclo combinado (GNCC)	46.3	23.9	393	462.73
Turbina de gas de ciclo simple (TGCS)	71.4	36.9	603	711.73
Gas natural de ciclo combinado con captura y secuestro de carbono (GNCC w/CSC)	54.3	28.1	55.4	137.73

Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014)

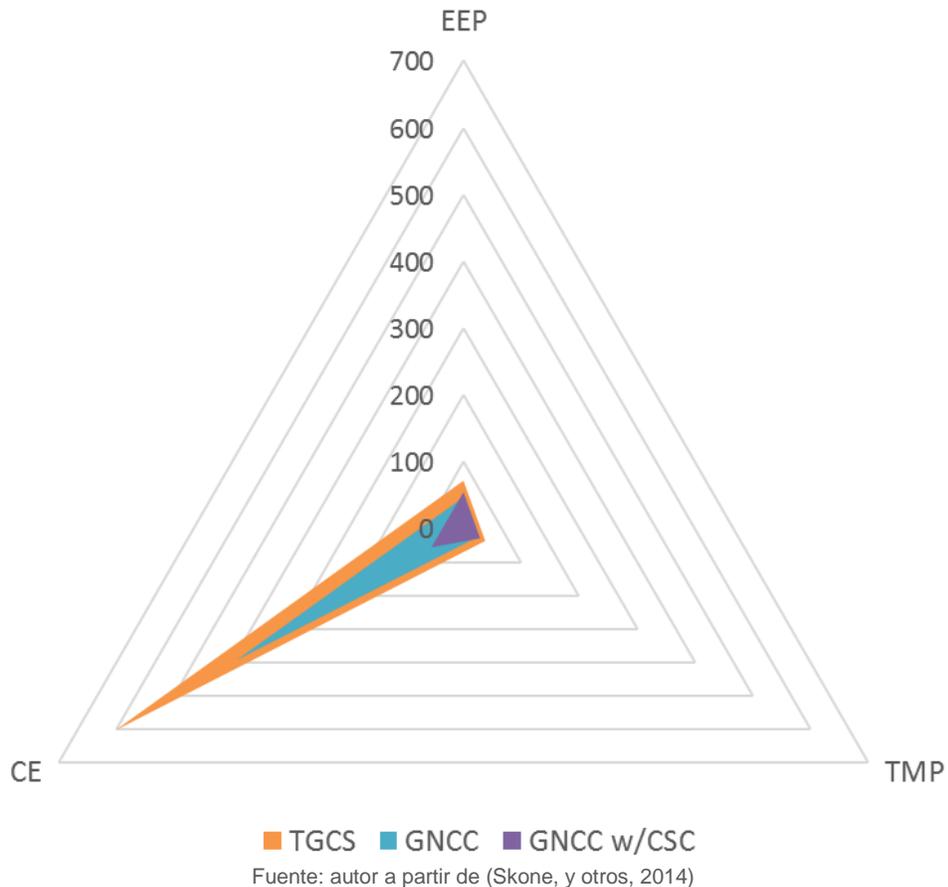
Al comparar las emisiones de las tres tecnologías analizadas se puede determinar que las etapas de menor y mayor generación de gases contaminantes corresponden respectivamente al transporte de la materia prima con emisiones que varían desde 23.9 gCO₂e/kWh, hasta 36.9 gCO₂e/kWh y a la conversión de la energía con emisiones con un rango desde 55.4 gCO₂e/kWh hasta 603 gCO₂e/kWh respectivamente. El total de las emisiones dentro del análisis del ciclo de vida del gas natural estimado se encuentra dentro del rango enmarcado por 137.73 gCO₂e/kWh y 711.73 gCO₂e/kWh. Esto es evidenciable en la comparación por análisis radial de la Figura 11.

En relación al comportamiento de las tecnologías de conversión se presenta como la mejor el gas natural de ciclo combinado con secuestro y captura de carbono puesto que sus emisiones son de tan solo 137.73 gCO₂e/kWh, esto dado a las técnicas de captura que se utilizan dentro del proceso las cuales evitan la liberación de emisiones atmosféricas de efecto invernadero.

La peor alternativa ambiental es la turbina de gas de ciclo simple dado que la misma no realiza procedimientos de recuperación de calor, por tanto, para producir una unidad de energía requiere cantidades mayores de combustible que las de ciclo combinado, las emisiones de estas turbinas equivalen a 711.73 gCO₂e/kWh, cantidad superior en 574 gCO₂e/kWh a las de ciclo combinado con captura y secuestro de carbono. La simple implementación de turbinas de ciclo combinado brinda también una gran ventaja ambiental en comparación a las turbinas de ciclo

simple, las emisiones de la primera difieren en 325 gCO₂e/kWh a las emisiones de los sistemas de ciclo simple.

Figura 11 Ciclo de vida del gas natural - gCO₂e/kWh



2.5 Alternativas de mitigación

El mantenimiento preventivo de las tuberías de los gasoductos reduce ampliamente las emisiones atmosféricas de metano por escapes en la tubería (Anifowose & Odubela, 2015). La implementación de políticas de mayor exigencia ambiental podría reducir eficazmente las emisiones del ciclo de vida del gas natural haciendo de este un energético mucho más limpio. La reducción de las emisiones fugitivas de metano en los pozos y demás partes del sistema con la inclusión de nuevas tecnologías acarrearía mayores costos, pero brindaría grandes ventajas en materia de impacto ambiental.

Una de las mayores problemáticas de la producción del gas natural consiste en la ventilación y quema del gas natural durante diferentes procesos, la ventilación del mismo libera grandes cantidades de metano, mientras que la quema genera emisiones de dióxido de carbono. Diferentes tecnologías permiten la reducción de dichas emisiones contaminantes mejorando el comportamiento ambiental de las extracciones gasíferas, algunas de ellas son aplicables a pozos en funcionamiento. La principal manera para la disminución de los impactos ambientales asociados a la producción y uso del gas natural como fuente de generación eléctrica es la inclusión de tecnologías de combustión de mayor eficiencia, así como mecanismos de captura y secuestro de carbono en las distintas centrales termoeléctricas de gas natural, tanto funcionales como a ser construidas (Skone, y otros, 2014)



3 BIOMASA

Las energías renovables se han mostrado como prometedoras fuentes energéticas actuales y futuras, pero la migración a estas ha sido un complejo y difícil proceso dado los altos costos, el almacenamiento de la energía y la situación de las tecnologías. La biomasa plantea una ventaja frente a otros energéticos alternativos ya que esta permite la generación de energía sin tener en cuenta las condiciones climatológicas, puesto que su energía puede ser fácilmente almacenada y estará disponible sin depender de las características ambientales, siempre y cuando el stock de materia prima biomásica lo permita (Sims & Bassam, 2004).

La biomasa proviene de un proceso biológico mediante el cual la energía originada de los rayos solares es transformada y almacenada a través de la fotosíntesis por el material vegetal, el cual en presencia de compuestos como el dióxido de carbono (CO₂) elabora sustancias orgánicas, desde allí es incorporada y transformada por el reino animal produciéndose material combustible vegetal y animal para la generación energética (Nogués & Royo Herrer, 2002), el proceso de fotosíntesis transforma la luz solar en energía química a través del carbón fijado el cual tiene un potencial energético de 470 kJ/gmol (Jäger-Waldau & Ossenbrink, 2004); la biomasa dependiendo de su origen presenta un potencial de captura de radiación solar de hasta 15% pero no es usual que supere el 1% (Abbasi & Abbasi, 2010), aunque una vez seca contiene entre 17 y 21 MJ/kg de energía (McKendry, 2002).

La biomasa ha sido durante años una fuente de energía para la humanidad, haciendo parte de las comunidades como combustible desde el descubrimiento del fuego, donde inicialmente el empleo de ramas, arboles entre otros lideró la generación de este, posibilitando la calefacción y cocción de alimentos en las comunidades primitivas; el posterior descubrimiento de la electricidad destinó la biomasa como una de sus primeras fuentes de energía (Fundación Descubre, s.f.), pero después de la revolución industrial y la entrada de los combustibles fósiles su uso tradicional migró a la manufactura de diversos enseres y elementos o su inutilización y posterior descomposición, debido esto a la necesidad de energéticos con mayor poder calórico como el carbón quien la reemplazó a mediados del siglo XVIII. Aunque sigue teniendo un papel importante en algunas industrias y en viviendas; la biomasa por su carácter renovable, la posibilidad de generación de empleo y la activación de la economía rural se plantea como una opción para el futuro (Secretaría de Energía, 2008) (Eisentraut & Brown, 2014).

Existen múltiples definiciones de la biomasa, la *International Energy Agency* establece la biomasa como toda materia orgánica degradable que proviene de plantas o animales y que se encuentra disponible de manera renovable; incluyéndose la madera, los cultivos agrícolas, herbáceos y leñosos, los residuos orgánicos y el estiércol (IEA, 2015). Así mismo, algunos autores la precisan como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos agrícolas tanto animales como vegetales, de la silvicultura, de las industrias relacionadas y de los residuos municipales e industriales (Cerdá, 2012). Pero todo esto se ve agrupado y reducido en la definición dada por la Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina, quien define este bioenergético como toda aquella sustancia proveniente de un proceso biológico de origen animal o vegetal que se encuentre disponible para la producción de energía (FADA, 2013).

La International Energy Agency plantea el riesgo que representa la biomasa en la seguridad alimentaria al competir con los cultivos alimenticios y forestales (Eisentraut & Brown, 2014), situación que se ve contrarrestada por el análisis de áreas cultivables desarrollado por algunos científicos en el que se establece la presencia de 1.182 GHa excedentes a nivel mundial y propicias para cultivos energéticos (Abbasi & Abbasi, 2000), para las cuales sería necesario el empleo de cultivos eficientes y la inclusión de políticas gubernamentales y sociales comprometidas y enfocadas a la no degradación del medio ambiente y que no sobrestimen la teoría de neutralidad de carbono de la biomasa, en la cual se establece que esta produce una cantidad similar de CO₂ a la que retiene durante su crecimiento (Demirbas A. , 2004). El análisis del ciclo de vida de este energético asocia emisiones indirectas durante las diversas etapas del mismo desvirtuando la premisa de neutralidad de emisiones de las bioenergías (Field, Campbell, & Lobell, 2008). Pero en general, aunque la madures de las tecnologías y las situaciones ambientales que este energético genera no son óptimas, esta fuente promete ser una de las mejores, puesto que posee grandes ventajas que la resaltan dentro de los combustibles alternativos, los renovables y los fósiles, como lo es la relativa neutralidad de carbono y el bajo contenido de azufre y nitrógeno, compuestos cuyos óxidos son conocidos por su participación en la lluvia acida y el calentamiento global (García, Pizarro, Álvarez, Lavín, & Bueno, 2015), además de la posibilidad de implementación inmediata en industrias, automotores y demás.

3.1 Tipos de biomasa

El proceso fotosintético de las plantas es la base de la producción de biomasa; por un lado, la fitomasa es la biomasa fijada o almacenada por la vegetación a través de la transformación de la energía química generada a partir de la luz solar. Y por el

otro, la zoomasa y la excreta son la biomasa obtenida de los animales, principales consumidores de fitomasa. La excreta de animales terrestres puede ser almacenada para la producción de biogás, pero la excreta de animales acuáticos es imposible de capturar (Abbasi & Abbasi, 2010). La clasificación de la biomasa varía según los autores, una de las mejores clasificaciones es dada por el laboratorio europeo de energías renovables EurObserv'ER quien distingue la biomasa residual de los demás tipos de biomasa.

3.1.1 Biomasa sólida

Según EurObserv'ER la biomasa sólida son todos aquellos compuestos sólidos orgánicos que pueden ser empleados en la generación de calor, electricidad o combustible, tal como puede ser la madera, los desechos de esta, los pellets, el licor negro, el bagazo, otros elementos vegetales o animales. (EurObserv'ER, 2014)

3.1.2 Biogás

El biogás es un combustible equivalente al gas natural en la generación energética, puesto que puede ser empleado para la producción térmica, termoeléctrica, al igual que como combustible vehicular; básicamente el biogás es un fluido producido en ausencia de oxígeno proveniente de la degradación de la materia orgánica biomásica. (BAA, s.f.)

3.1.3 Residuos sólidos orgánicos

La fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) o bio-residuos comprende todos aquellos desechos orgánicos provenientes tanto de jardines y parques, como de cocinas, hogares, comercios e industrias y distribuidores, además de las plantas de tratamiento alimenticias y forestales (Cerdá, 2012), o en general de cualquier industria o área que permitan la obtención de energía a partir de ellos por cualquier proceso de transformación.

3.1.3.1 Biomasa residual en Colombia

A continuación, se presentan los valores calóricos inferiores de los residuos agrícolas nacionales (Tabla 8).

Tabla 8 Poder calórico inferior de la biomasa residual colombiana

Sector	Fuente de biomasa	Tipo residuo	PCI [Kcal/kg]
Agrícola	Palma de aceite	Cuesco	3.988
		Fibra	4.274
		Raquis	4.021
	Caña de azúcar	Residuos de cosecha	3.684
		Bagazo	4.456
	Caña para panela	Bagazo	4.456
		Hojas secas	4.007
		Residuos de cosecha	3.684
	Café	Pulpa	4.259
		Cisco	4.430
		Tallos	4.384
	Maíz	Rastrojo	3.429
		Tusa	3.390
		Capacho	3.815
	Arroz	Hojas secas	4.274
		Tamo	3.113
		Cascarilla	3.603
	Banano	Raquis	1.809
		Vástago	2.032
		Rechazo	2.488
Plátano	Raquis	1.808	
	Vástagos	2.032	
Pecuario	Avícola	Ponedoras	2.248
		Engorde	3.645
	Bovino	Leche	2.801
		Doble propósito	3.680
		Carne	3.783
	Porcino	Tecnificado	6.049
		No tecnificado	4.163
Residuos Orgánicos	Plaza mercado	Sólido orgánico	3.772
	Centro acopio	Sólido orgánico	3.772
	Poda	Sólido orgánico	3.772

Fuente: autor a partir de (UPME; IDEAM; Colciencias; UIS, 2011)

Las industrias agrícolas y pecuarias en Colombia representan un gran porcentaje en los indicadores económicos nacionales, las mismas generan desarrollo económico y rural, por tanto, la utilización de biomasa como fuente energética plantea una excelente opción para un país principalmente agreste, el potencial energético de la biomasa residual en Colombia corresponde a 331.638 TJ/año donde el principal potencial proviene del Valle del Cauca con 105.487 TJ/año, Antioquia con 26.673 TJ/año y Cauca con 26.590 TJ/año. (UPME; IDEAM; Colciencias; UIS, 2011)

3.1.4 Biocombustibles

Los biocombustibles son los combustibles líquidos provenientes de la biomasa y generados a partir de la caña de azúcar, el trigo, el maíz entre otros (BP, s.f.), los mismos pueden sustituir parcial o totalmente los combustibles fósiles líquidos (gasolina y diésel), o ser incorporados y actuar como aditivos que permitan la mezcla entre los combustibles fósiles y alternativos. Existen dos tipos principales de combustibles líquidos biomásicos, el bioetanol y el biodiésel los cuales se muestran como la única opción de reemplazo de los combustibles derivados del petróleo con la capacidad de reducir las emisiones atmosféricas (Agencia Andaluza de la Energía, s.f.), los mismos presentan un elevado desarrollo tecnológico.

3.1.4.1 Biocombustibles de primera generación

Corresponden a esta generación los combustibles biomásicos producidos a partir de cultivos alimenticios y restos forestales, son conocidos por su alto impacto en la competencia con los cultivos agrícolas y por generar incrementos de los precios de los productos agroalimenticios. Proviene de diferentes fuentes según su destino, el biodiésel, se origina de plantas oleaginosas como la palma de aceite, la soja, el girasol, la jatropha, la higuera y el maíz, entre otros. Por otro lado, el bioetanol proviene de plantaciones ricas en azúcar como la caña, el maíz y la remolacha. (Superintendencia de Industria y Comercio, 2011) (Porcel, 2015)

3.1.4.2 Biocombustibles de segunda generación

Todo problema es oportunidad de cambio, es así como los biocombustibles de segunda generación emergen como alternativa a la competencia con la seguridad alimenticia de los biocombustibles de primera generación, además de plantearse

como medida para la conservación de la biodiversidad, la reducción de la desertificación y la deforestación (Lobato, 2010). Teniendo entonces la segunda generación de biocombustibles la capacidad de reducir las emisiones contaminantes y generar el ahorro energético, con especies como algas con rendimientos 50 veces más altos que los cultivos convencionales (Aguilar Samanamud, 2010).

El biodiesel celulósico o de segunda generación es obtenido de residuos agroindustriales y cultivos herbáceos procedentes de áreas no agrícolas o marginales (Superintendencia de Industria y Comercio, 2011), mientras que el bioetanol de segunda generación, también denominado ligno-celulósico o celulósico, proviene de la hidrólisis de elementos ricos en celulosa tal como la madera y los desechos agrícolas y forestales, este proceso permite con las tecnologías pertinentes la producción de bioetanol de árboles de rápido crecimiento, la paja y demás residuos agroforestales (noetmengiselmon).

3.1.4.3 Biocombustibles de tercera generación

La innovación y el desarrollo son constantes en los procesos productivos, los biocombustibles son un ejemplo de ello, la primera generación de combustibles originaba riesgos para la seguridad alimentaria situación que fue corregida con los biocombustibles de segunda generación, los cuales requirieron de la optimización de sus procesos con el apoyo de materia prima específicamente producida para tal fin a través de mejoras genéticas o moleculares de las especies que desencadenaron plantas con mejores características para la producción de combustibles, estableciéndose la tercera generación de combustibles provenientes de árboles con baja lignina o maíz con celulosa integrada (Agencia Andaluza de la Energía, s.f.). Con estos pretratamientos de la biomasa se pretende romper la matriz de celulignina con lo cual se reduce el grado de cristalinidad celulósica y se posibilita el ataque enzimático, esto dependiendo el tipo de biomasa y la tecnología aplicada (Monteiro Machado, 2010)

3.1.4.4 Biocombustibles de cuarta generación

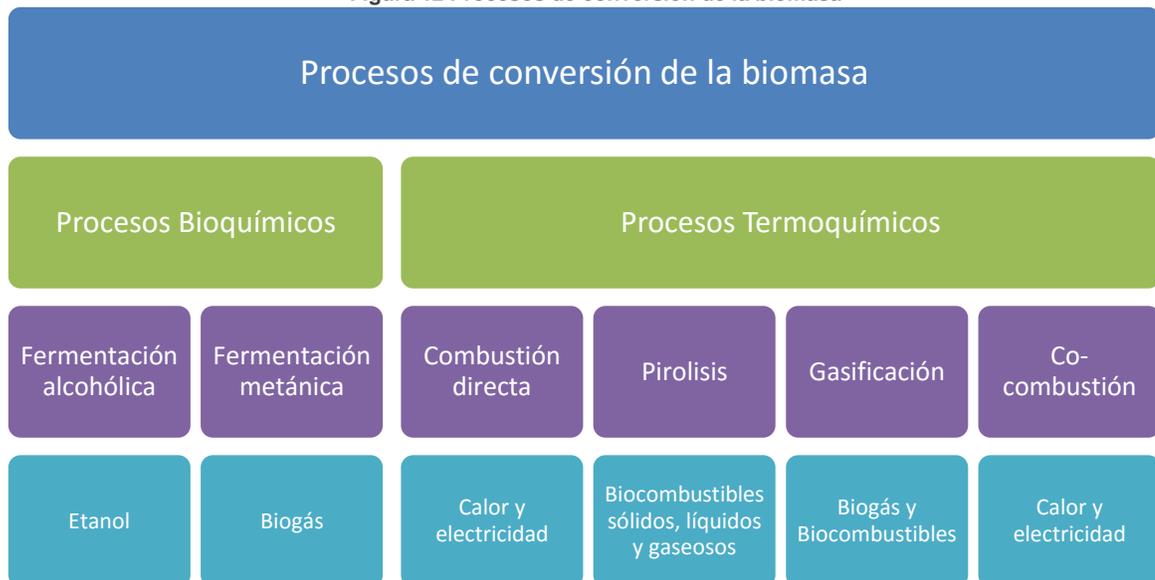
Los procesos moleculares o genéticos fueron aplicados para el aumento de la eficiencia en la producción de biocombustibles de cuarta generación, con la alteración de los cultivos ligno-celulósicos modificados para mejorar su captura y almacenamiento de CO₂, así como para optimizar la velocidad de crecimiento

creándose cultivos con la capacidad de tener emisiones negativas. Estos cultivos genéticamente modificados con la capacidad de absorber y almacenar emisiones contaminantes son cultivados en zonas de mayor factibilidad de captura de carbono y pueden ser procesados por los métodos de la segunda generación de biocombustibles acompañados de procesos, técnicas y tecnologías de secuestro y captura de emisiones contaminantes que permitan almacenar estos compuestos químicos en depósitos geológicos como campos petroleros y gasíferos agotados, o minas de carbón y acuíferos salinos no productivos. (Navarro Quevedo, 2011)

3.2 Procesos de conversión biomásica energética

La producción de energía proveniente de la biomasa es muy diversa, la misma permite la generación de energía eléctrica, térmica o motriz dependiendo del combustible utilizado. (Nogués & Royo Herrer, 2002). Esta producción de energía es posible gracias a diversos procesos de transformación, tanto termoquímicos como bioquímicos.

Figura 12 Procesos de conversión de la biomasa



Fuente: El autor a partir de (Abbasi & Abbasi, 2010)

3.2.1 Procesos bioquímicos

Los procesos de transformación bioquímicos se basan en la fabricación de etanol o biogás a través de procesos de fermentación tanto alcohólica como metánica, con el

ánimo de generar sustitutos a los combustibles líquidos y el gas natural. (Saidur, Abdelaziz, Demirbas, Hossain, & Mekhilef, 2011)

3.2.1.1 Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso bioquímico de fabricación de etanol biomásico basado en la transformación y síntesis por biocatalizadores de azúcares, los cuales actúan en los sustratos orgánicos para elaborar principalmente los biocombustibles de segunda generación. Las levaduras dada su alta productividad y su fácil separación en el proceso son los biocatalizadores más ampliamente implementados, aunque la inclusión de diferentes métodos permite la obtención de mayor cantidad de biocombustible desde la misma cantidad de biomasa. (Saidur, Abdelaziz, Demirbas, Hossain, & Mekhilef, 2011)

El proceso de transformación ocurre en tres fases; en la primera se realiza la preparación de la solución de los nutrientes necesarios para la extracción de los azúcares fermentables. La segunda etapa o de fermentación donde por medio de un proceso aerobio se reproducen los microorganismos y la glucosa es transformada en dióxido de carbono, y así posteriormente generarse el etanol en la fermentación anaerobia, para finalmente en una tercera etapa a través de la destilación extraer y separar el alcohol presente en la mezcla del agua. En algunos casos puede ser necesaria la deshidratación de hasta el 99.4% para realizar mezclas con gasolina. (Agrowaste)

3.2.1.2 Fermentación metánica

Este proceso bioquímico surge a partir del lento crecimiento de bacterias que logran degradar los compuestos sintetizados, los cuales posteriormente son transformados en metano y dióxido de carbono, es por ello que el proceso se define como un procesos bioquímico de transformación microbiana anaeróbica. (Castells, 2005) la fermentación en mención puede ser producida a gran escala cuando se realizan cultivos enriquecidos o mixtos, la temperatura adecuada debe estar entre 0 a 55 °C y no deben existir descensos mayores a 2 °C. Por otra parte, la concentración de los ácidos volátiles debe estar cerca de 2.000 ppm y ser inferior a 3.000 ppm. Igualmente, deben ser controladas las sales minerales quienes inhiben la fermentación en concentraciones de 4.000 ppm y el nitrógeno quien lo hace a 50 ppm. (Nemerow & Dasgupta, 1998)

3.2.2 Procesos termoquímicos

Todo proceso termoquímico genera un producto dividido en dos fracciones; la primera corresponde a la fracción volátil y consiste en vapores, gases y alquitrán, la segunda es una fracción sólida rica en carbón. Los procesos termoquímicos estudiados particularmente en los materiales lignocelulosos, el carbón y la turba, presentan una relación directa entre su aplicación y la disminución de la acumulación de la biomasa. (Demirbas, Balat, & Balat, 2009)

3.2.2.1 Combustión directa

Uno de los procesos de conversión de mayor utilización es la combustión directa de la biomasa, en la cual el dióxido de carbono liberado corresponde al volumen captado por las plantas durante la producción del material biomásico y equivale al emitido a la atmósfera durante los procesos naturales de descomposición (EPEC). Igualmente, la combustión directa es la manera inmediata de lograr la adquisición de energía por biomasa. Su poder calorífico está relacionado indirectamente con su contenido de fibra y humedad. En la tabla 1, se observa el poder calorífico de algunos tipos de biomasa sólida utilizados actualmente. (Moragues & Rapallini)

Tabla 9 Poder calorífico de la biomasa sólida

Biomasa	Poder calorífico (MJ/kg)
Madera	20
Bagazo de caña de azúcar	9
Paja de cereales	16 - 17
Desechos orgánicos sin secar	13

Fuente: El autor a partir de (Moragues & Rapallini)

La producción de energía por combustión de la biomasa en termoeléctricas se debe a la transferencia de energías entre el combustible, el vapor y las turbinas, en donde las turbinas de vapor multipaso de alta eficiencia permiten reducir el área de cultivo y producción de biomasa de 550 ha, a un rango entre 270-310 ha para producir 1MWe, lo que equivale a un 35-40% de eficiencia (McKendry, 2002).

3.2.2.2 Pirólisis

Los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos pueden ser obtenidos a partir del proceso termoquímico de degradación térmica conocido como pirólisis (Gómez, Klose, & Rincón, 2008). En este proceso, se origina la ruptura de la estructura molecular de la biomasa bajo temperatura y presiones moderadas, formando una mezcla de hidrocarburos en estado líquido conocidos como biocombustibles con propiedades que pueden ser comparadas con los derivados del petróleo, una fracción gaseosa con facultades para producir energía para el proceso y una fracción sólida igualmente con potencial energético. Las ventajas que provee dicho proceso para la obtención de biocombustibles constan del fácil almacenamiento y transporte, permitiendo la variedad en sus usos puesto que puede ser directamente usado como aditivo en los combustibles fósiles o mejorado como combustible de calidad (Parihar, Kamil, Goyal, Gupta, & Bhatnagar, 2007).

3.2.2.3 Gasificación

La gasificación surge a partir de la oxidación parcial del carbono que se encuentra contenido en la biomasa mediante la acción controlada de un oxidante como el aire, el oxígeno puro y el vapor obteniéndose diferentes valores caloríficos. (Heidenreich & Foscolo, 2015) A continuación, se presentará la Tabla 10. En la cual se relaciona el poder calorífico obtenido con el uso de los diferentes agentes oxidantes.

Tabla 10 Poder calorífico obtenido por oxidante

Oxidante	Poder calorífico (MJ/m ³)
Aire	4-7
Oxígeno puro	10-18
Vapor	10-18

Fuente: El autor a partir de (Heidenreich & Foscolo, 2015)

La gasificación permite el origen de diferentes tipos de biomasa para la producción de sus derivados de los cuales surgen los gases de síntesis, para obtener la energía térmica, eléctrica, hidrógenos o biocombustibles. (Heidenreich & Foscolo, 2015)

3.2.2.4 Co-combustión

La co-combustión con biomasa es una alternativa energética de bajo costo y sostenible, la cual garantiza la reducción de emisiones contaminantes como el CO₂, SO_x, CH₄, NH₃, H₂S, mercaptanos, ácidos volátiles orgánicos, ésteres y otros (Sahu, Chakraborty, & Sarkar, 2014). Es importante evaluar el potencial de cogeneración, es decir los aspectos operativos, equipos y capacidades con que se diseñó, y el tiempo de operación de la misma. (Royo, Sebastián, García-Galindo, Gómez, & Díaz, 2012).

Por otra parte, el objetivo de la co-combustión es reducir las emisiones de contaminantes e igualmente mejorar la producción energética de algunas centrales con la quema de biomasa y combustibles fósiles tales como el carbón. (Sahu, Chakraborty, & Sarkar, 2014)

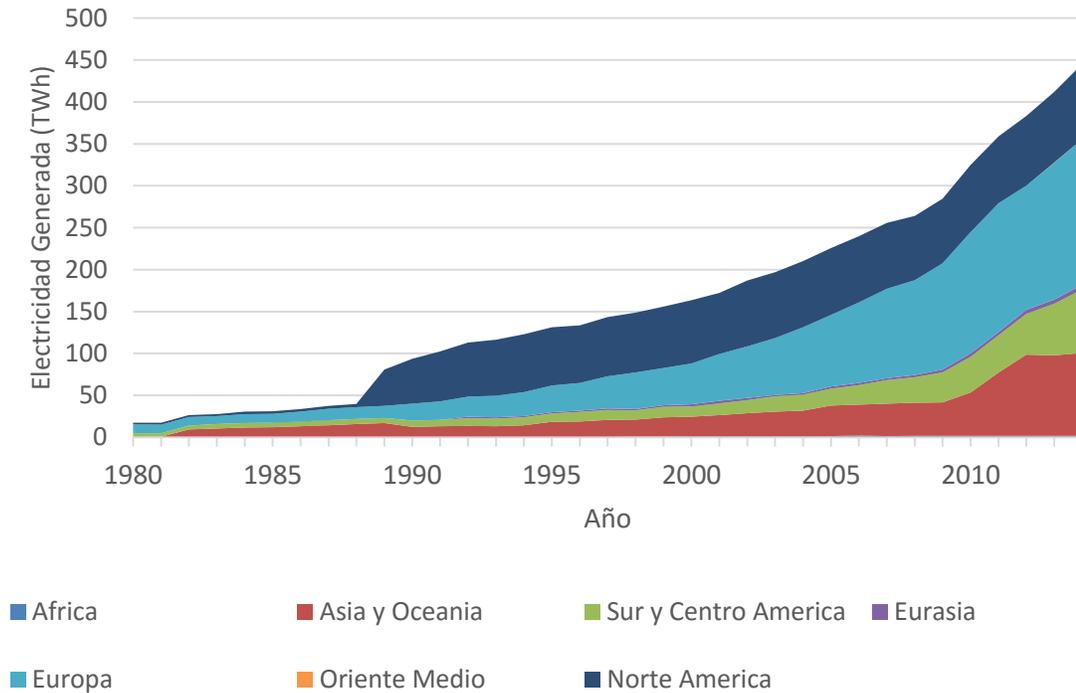
3.3 Hechos emblemáticos

Los indicadores de desarrollo mundial del banco mundial presentados en la Figura 13 muestran el crecimiento de la producción de energía eléctrica proveniente de la biomasa y de los desechos a lo largo del mundo y desde el año 1980.

Para el año 1980 se produjeron 17 TWh de energía eléctrica a partir de la biomasa, de los cuales 0.13 TWh, se generaron en África, 0.69 TWh en Asia y Oceanía, mientras que las mayores participaciones se presentaron en Europa Sur y Centro América, así como en Norte América con 10.71, 3.99 y 1.66 TWh de energía. Eurasia introduce su data de la participación de esta fuente energética en el año de 1992 con 1.85 TWh y Oriente Medio en el año 2009 con 0.04 TWh de energía.

Para el año de 1988 la producción de energía biomásica en Norte América era de 4.0 TWh, un año más tarde se producción alcanzó niveles no registrados en los años anteriores con una producción 43.5 TWh de energía, tendencia de crecimiento que se mantuvo hasta el fin del periodo de análisis. Este crecimiento abrupto se puede observar nuevamente en Asia y Oceanía donde en el año de 1981 la producción era de 0.72 TWh, un año más tarde la misma fue de 9.33 TWh, un incremento de 8.61 TWh.

Figura 13 Producción mundial de electricidad biomásica y de desechos 1980 - 2014



Fuente: El autor a partir de (The World Bank - World Development Indicators, 2016)

Así mismo, en el periodo 2009 y 2010 se observó un incremento en la producción de energía biomásica en Asia y Oceanía de 11.78 TWh, con un paso de 39.94 TWh a 51.72 TWh. Sur y Centro América presentan una variación considerable en los años 2007 a 2010, con cambios de 14.4 TWh para este periodo. Caso que se repite en Europa para el periodo 2005 a 2007 con incrementos anuales de aproximadamente 10TWh, aunque para el año 2012 se presentó una reducción en la producción de energía biomásica europea de 5.48 TWh y se recuperó para el año 2013, con un cambio de 148.00 TWh a 163.48 TWh.

En general el crecimiento de la energía eléctrica biomásica ha sido constante con la excepción de algunos hechos emblemáticos durante el periodo 1980 a 2014. La Tabla 11 muestra los incrementos presentados entre el inicio y el fin del periodo comprendido entre los años 1980 y 2014, así como el total de dichos cambios. En general para el periodo comprendido entre los años 1980 y 2014 se generaron aproximadamente 5727.42 TWh de energía eléctrica proveniente de la biomasa (The World Bank - World Development Indicators, 2016) y se espera para el 2018 un incremento del 7% de la generación de energía biomásica a nivel mundial, produciéndose para este año un total de 560 TWh de energía eléctrica. (IEA, 2013).

Tabla 11 Incrementos de la producción eléctrica biomásica mundial

Producción Electricidad Biomásica Mundial (TWh)								
Año	África	Asia y Oceanía	Sur y Centro América	Eurasia	Europa	Oriente Medio	Norte América	Total
1980	0.13	0.69	3.99	0.00	10.71	0.00	1.66	17.18
2014	1.80	98.85	75.67	5.85	173.74	0.10	89.37	445.38
Diferencia	1.67	98.16	71.68	5.85	163.03	0.10	87.71	428.20

Fuente: El autor a partir de (The World Bank - World Development Indicators, 2016)

Según el Centro de datos medioambiental en recursos naturales de la comisión europea, el 64.2% de la producción de energía primaria de las fuentes renovables en la unión europea proviene de la biomasa y es generada a través de diferentes procesos de transformación (eurostat, s.f.). Los biocombustibles por otra parte, han mostrado un elevado avance y según la International Energy Agency es posible que el 27% del combustible para transporte en 2050 sea provisto por los biocombustibles puesto que, aunque la eficiencia es una de las prioridades actuales, los combustibles de bajas emisiones son necesarios para los medios de transporte pesados, los cuales actualmente generan cerca de 2.1 giga toneladas de CO₂.

Para esto es necesario aumentar la eficiencia de los procesos del ciclo de vida de estos combustibles, reduciendo las emisiones asociadas al combustible fósil. Así como la eliminación de la tala de bosques o cambios en el uso de los suelos agrícolas alimenticios para la inclusión de cultivos bioenergéticos. Por otro lado, se requiere el desarrollo de las tecnologías para mejorar las tasas de eficiencia y los costos. Así como la inversión para lograr la madures del mercado, apoyado de políticas gubernamentales que garanticen estos hechos. (International Energy Agency , 2011)

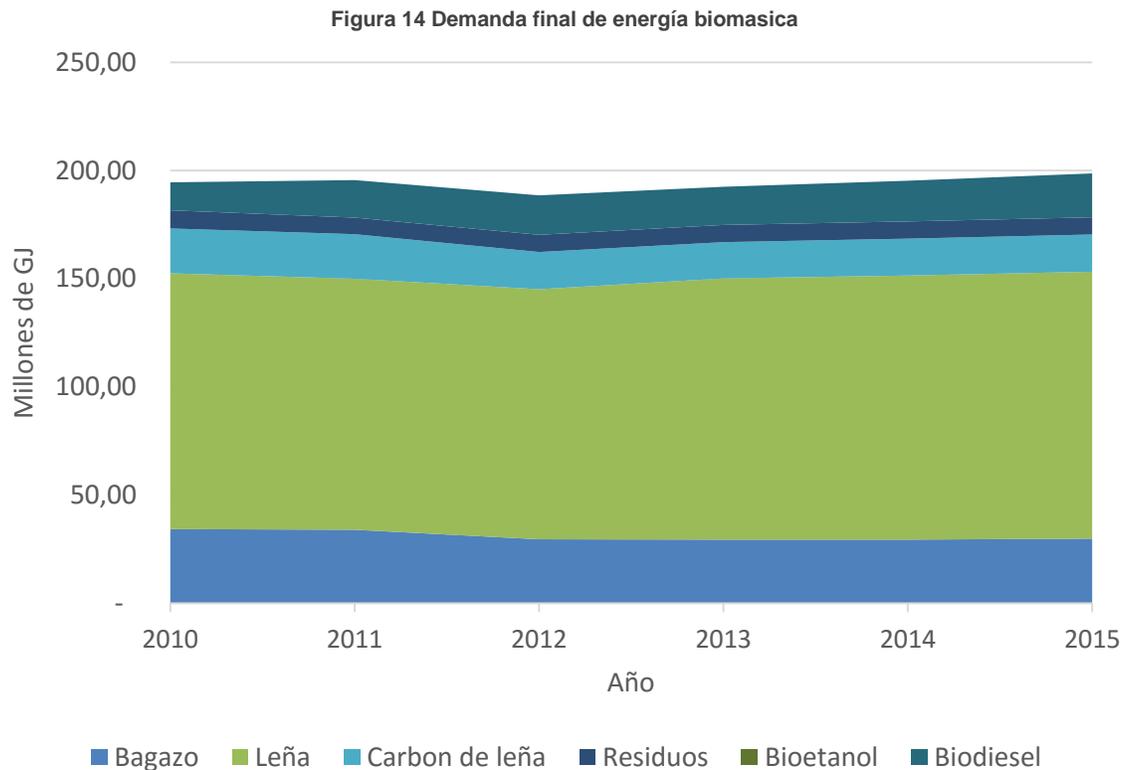
3.4 Biomasa en Colombia

En Colombia, el potencial energético de la biomasa está representado en residuos orgánicos del banano, la pulpa del café, la palma de aceite, la cascarilla de arroz y el bagazo de caña, estimado en unos 16 GWH según Endesa. (Twwnegy Endesa, 2014) dicho valor representa un gran potencial energético.

3.4.1 Demanda de biomasa en Colombia

Los entornos de mayor uso de biomasa energética son las zonas rurales donde se presenta gran parte del consumo de leña y otros bioenergéticos, estas zonas con difícil acceso, baja densidad poblacional y desarrollo y alta riqueza natural presentan grandes problemáticas en cuanto al acceso a la electricidad y la calidad de vida. La biomasa se plantea como una fuente energética viable para las zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional (ZNI), dichas zonas corresponden al 52% de la superficie nacional y poseen aproximadamente 1.5 millones de habitantes. (Pérez Bayer & Osorio Vélez, 2014)

La Figura 14 presenta la demanda final de energía biomásica en el país por fuente de energía, en la misma se puede observar que la mayor demanda es generada por el consumo de leña en total para el periodo de estudio se demandaron 715 millones de GJ de energía leña. Para el año 2012 se observa un decrecimiento en la demanda de bioenergéticos pasando en 2011 de 195.54 Millones de GJ a 188.58 Millones de GJ en 2012, la demanda de estos energéticos se eleva nuevamente para en 2015 requerirse un total de 198.65 Millones de GJ de energía proveniente de las diferentes fuentes biomásicas.



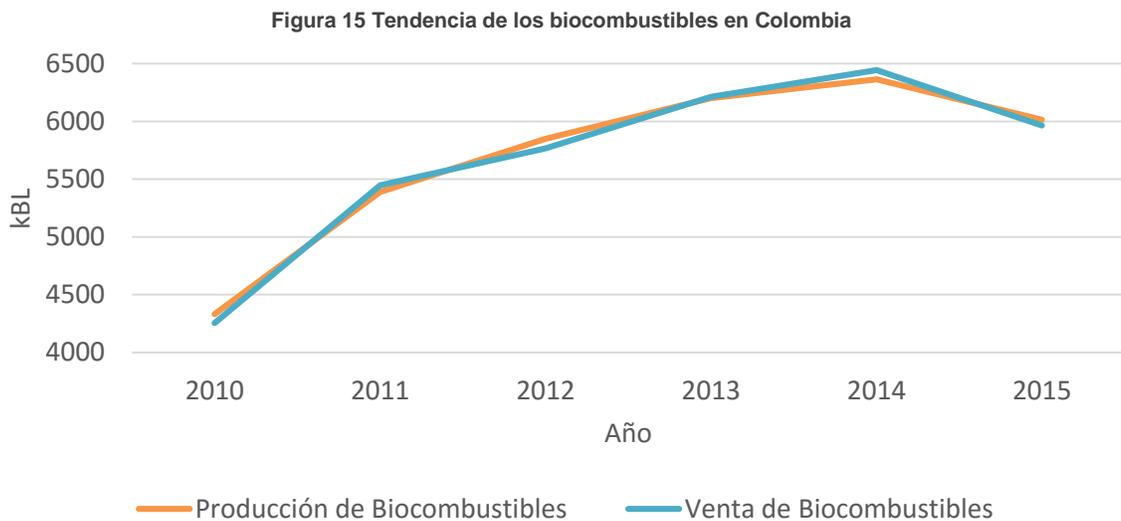
Fuente: El autor a partir de (UPME, 2015)

3.4.2 Oferta de biomasa en Colombia

En Colombia existen 16 millones de hectáreas no cubiertas de bosques naturales y aptas para el desarrollo de cultivos bioenergéticos las cuales pueden ser cultivadas y manejadas sosteniblemente para la generación de cultivos biomásicos, para el 2014 la producción de madera para usos dendro-energéticos fue de 10.4 millones de m³, equivalentes al 80% de la producción de madera. (Pérez Bayer & Osorio Vélez, 2014) Teniendo en cuenta que la capacidad máxima de una planta de bioenergía es de 5 MW, la CREG establece que dicha energía puede ser únicamente vendida a comercializadores, industrias cercanas o en zonas no interconectadas a través de entidades públicas. (Resolución 032 de 2001, 2001) La generación a partir de la gasificación de la biomasa en 2010 tenía un costo aproximado de \$200 pesos/kWh y se esperaba para el 2015 que este recurso supliera el 20% de la electricidad en las ZNI y el 30% para el 2020. (Consortio energético CORPOEMA para la Unidad de Planeación Minero Energética, 2010) (Unidad de Planeación Minero Energética , 2012)

Para el mes de marzo de 2015 la biomasa represento el 0.50% de la capacidad efectiva de generación del sistema interconectado nacional, equivalente a 77.2 MW del total generado correspondiente este último a 15513.7 MW. (Subdirección de Energía Eléctrica Grupos de Generación, Transmisión y Convocatorias , 2015)

3.4.2.1 Producción de biocombustibles en Colombia



Fuente: El autor a partir de (Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano, s.f.)

Una de las fuentes de biomasa energética líder en Colombia son los biocombustibles. Estos combustibles de origen principalmente vegetal, para el año 2010 generaron ventas por 4253 miles de barriles (kBL) y tuvieron una producción de 4332 kBL como se observa en la Figura 15. En el año 2011 tuvieron un incremento de 1193 kBL y 1058 kBL, en venta y producción respectivamente. La tendencia de crecimiento, aunque a tasas menores, se mantuvo hasta el año 2014 para en el año 2015 tener un decrecimiento de 350 kBL en relación a la producción y 481 kBL comparado las ventas de los biocombustibles. Finalmente, para el periodo 2015 la producción de biocombustibles fue de 6014 kBL y las ventas de los mismos representaron un total de 5964 kBL. La Figura 16 muestra el comportamiento independiente de la producción y ventas en Colombia para el periodo 2010 a 2015 de los dos tipos de biocombustibles: el alcohol o bioetanol y el biodiesel.

Figura 16 Indicadores de los biocombustibles en Colombia



	2010	2011	2012	2013	2014	2015
■ Ventas de Biodisel (B100)	2453	3283	3496	3736	3813	3370
■ Producción de Biodisel (B100)	2502	3269	3526	3762	3808	3464
■ Ventas de Alcohol	1800	2163	2271	2477	2632	2594
■ Produccion Alcohol	1830	2121	2322	2440	2557	2550

kBL

Fuente: El autor a partir de (Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano, s.f.)

3.5 Impactos ambientales

La biomasa se destaca por poseer la capacidad de ser usada como una energía que no requiere cambios drásticos en los equipamientos de consumos finales como calderas, vehículos, entre otros equipos. Adicionalmente, este energético de carbono neutro puede llegar a ser altamente empleado en un futuro no lejano, por ello surge la necesidad de identificar las afectaciones e impactos que se pueden realizar durante su producción y uso con fines energéticos. (Demirbas, Balat, & Balat, 2009) A continuación, se describen los impactos en el aire, agua y suelo/ecosistema.

3.5.1 Contaminación del aire

El uso de los bioenergéticos contribuye a satisfacer la demanda energética todo el tiempo y a bajo costo, por ende, ayuda a disminuir la pobreza en países que se encuentran en vía de desarrollo, produciendo igualmente la energía de distintas maneras tales como la electricidad, el calor o los combustibles (Karekezi, Lata, & Coelho, 2004).

Por otra parte, según Demirbas la energía que proviene de la biomasa es carbono neutro debido a que la cantidad de CO² que emite es la misma que absorbe durante el crecimiento de la planta (Demirbas A. , 2004); sin embargo, Field et al., contradicen el argumento de Demirbas, planteando que la producción de energía de la biomasa requiere energías fósiles para el cultivo, transporte y procesamiento, de la misma manera en que las labores agronómicas generan la emisión de diferentes contaminantes. Igualmente, a través de la deforestación una parte del contenido de carbono es liberado desde la biomasa hacia la atmosfera; afectando el balance de absorción y reflexión de la luz solar. Así mismo, la biomasa representa un riesgo para las áreas naturales dado el manejo de monocultivos y la competencia con los cultivos agroalimenticios y forestales lo cual puede amenazar el suministro de alimentos e incrementar las emisiones atmosféricas dada la deforestación o a las tecnologías de fabricación de alto consumo energético. (Field, Campbell, & Lobell, 2008)

3.5.2 Contaminación del agua

El agua es un elemento indispensable para el sostenimiento y reproducción de la vida teniendo en cuenta que los seres vivos están formados por un 70% de dicho

elemento (Paredes Díaz, 2013). Igualmente, el agua es la sustancia que más abunda en el planeta, distribuida en un 97% en los océanos y un 3% en agua dulce, de la cual gran parte se encuentra en estado sólido conformando los casquetes polares. Las plantaciones debido al riego son grandes consumidoras de agua, por tanto, es de esperarse que la producción de la energía proveniente de la biomasa requiera fundamentalmente de elevadas cantidades del recurso. En cuanto a la producción de energía eléctrica mediante procesos bio-energéticos, la remolacha cuenta con un consumo de agua de 165,47 m³/MWh, y el maíz y la caña de azúcar con 179,86 m³/MWh (Gerben -Leenes, Hoekstra, & Van der Meer, 2009). Este recurso se puede ver amenazado por los volúmenes de contaminantes vertidos a las fuentes hídricas durante los procesos de fertilización u otros. (Field, Campbell, & Lobell, 2008)

3.5.3 Contaminación del suelo/ecosistema

La biomasa al ser exclusivamente usada como fuente de energía, genera según expertos un déficit alimenticio para la humanidad, debido a la competencia que surge entre ella y la producción de alimentos al igual que con la seguridad alimenticia. Durante los años 2010-2014 cerca de 805 millones de personas no contaban con suficientes alimentos que le aportaran una vida saludable y activa (Programa Mundial de Alimentos, s.f.), esta cifra es obtenida del informe del estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2014 aportado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Programa Mundial de Alimentos (PMA) y el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA). Por tanto, la IEA en su publicación Heating Without Global Warming expresa que la producción de biomasa genera riesgos significativos que afectan el suelo para la producción de alimentos afectando la seguridad alimenticia (Eisentraut & Brown, 2014); Para los científicos Sims y Bassam, es evidente que la cantidad del recurso suelo disponible para producir energía a nivel mundial cuenta con un excedente de 1.18 GHa que puede llegar a ser muy útil para los cultivos energéticos y que pueden suplir parte de la demanda global, el método utilizado por Sims y Bassam es el análisis de áreas cultivables. (Sims & Bassam, 2004)

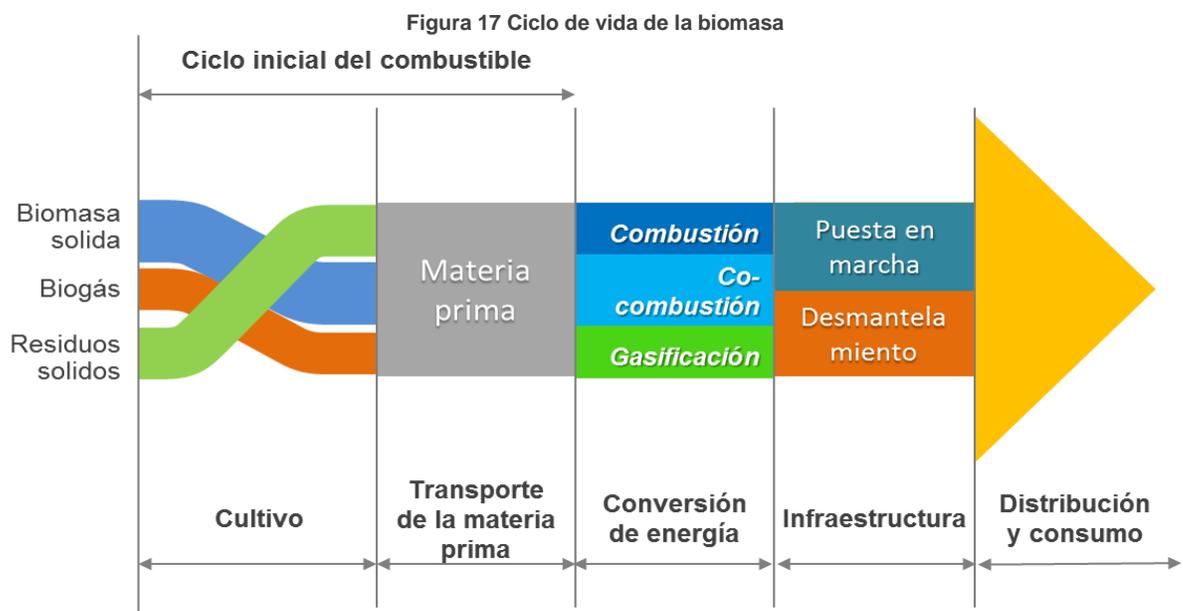
Por otra parte, debido a la suficiente cantidad de tierra que se encuentra disponible para satisfacer las necesidades alimenticias, de fibras y energía de la población para el presente siglo los cultivos energéticos extensivos no debieran de competir con los cultivos alimenticios, ya que claramente no tienen la necesidad de ello. El área global para el cultivo de alimentos y fibras en la década de los 90 contó con 0.897 Gha de los 2.495 Gha libres para el cultivo o producción de biomasa, haciendo una proyección hacia el año 2050 debido al crecimiento poblacional, 0.416 Gha adicionales serían necesarias para un obtener un total de 1.313 Gha en el año 2050,

de esta manera quedaría un total de 1.182 Gha disponibles para el cultivo de biomasa. (Sims & Bassam, 2004) Aunque el uso de monocultivos presenta una desventaja adicional aportada por la biomasa al suelo y los ecosistemas, debido a que la producción de energía biomásica requerirá de estas técnicas, las cuales afectan al suelo y a la biota terrestre por la degradación que a ellos le genera. (Abbasi & Abbasi, 2000)

3.6 Ciclo de vida de la biomasa

La definición de biomasa conlleva a la generación de energía que involucra toda sustancia orgánica animal o vegetal originada de un proceso biológico renovable (FADA, 2013). El ciclo de vida suele ser similar para los diferentes procesos de producción de energía que pueden ser llevados a cabo a través de la biomasa, bien sea biomasa sólida (EurObserv'ER, 2014)., biogás (BAA, s.f.), Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos - FORSU (Cerdá, 2012), Biocombustibles (BP, s.f.) o los resientes Cultivos energéticos (Agroenergética) (Fernández).

La Figura 17 presenta el ciclo de vida de la biomasa para generación eléctrica, en el mismo se presentan las tres principales etapas: el ciclo inicial del combustible, conversión de la energía y la etapa de infraestructura que incluye la puesta en marcha y desmantelamiento de la central.



Fuente: El autor a partir de (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013)

A continuación, se describen cada una de las etapas del ciclo de vida de la biomasa, así como la cuantificación de las emisiones ambientales del mismo ciclo.

3.6.1 Ciclo inicial del combustible

Para la utilización de la biomasa como fuente de energía eléctrica es necesario una serie de procesos previos a su transformación, estos procesos que subyacen antes de la conversión de la biomasa en energía se describen en el ciclo inicial del combustible.

3.6.1.1 Cultivo

Cualquier clase de cultivo independientemente de su finalidad, requiere fertilizantes y nutrientes que durante su obtención fueron sometidos bajo procedimientos que generaron contaminación ambiental. Precisamente, la biomasa durante su cultivo, se convierte en una fuente generadora de emisiones contaminantes al medio ambiente, así como también del agua debido a los fuertes químicos que suelen ser usados para la siembra. Por otra parte, la agro-energética está causando controversia entre quienes afirman que el área para su cultivo está reduciendo aquellas áreas disponibles para los cultivos alimenticios y aquellos que se encuentran a favor de su producción, aseguran mediante el análisis de áreas cultivables que alrededor de 1.182 Gha están disponibles para generar cultivos agro energéticos en 2050 (Sims & Bassam, 2004).

3.6.1.2 Transporte

El transporte para la biomasa surge a partir de la necesidad de movilizar los recursos desde los centros de cultivo hacia los centros de acopio, para posteriormente ser trasladados a las plantas de producción y/o transformación; luego, la materia prima obtenida requiere ser distribuida para ponerla a disponibilidad del mercado nacional o internacional. En algunos casos, es importante realizar una serie de procesos que contribuyan a la densificación del material para optimizar la cantidad necesaria a transportar de tal forma que el monto de los materiales transportados sea la cantidad justa para producir la porción de energía necesaria.

3.6.2 Conversión de energía

Los procesos de conversión de la biomasa en bioenergía son múltiples, así como los procedimientos para la transformación de la misma en electricidad. La etapa de conversión de la energía incluye todos estos procedimientos y procesos de transformación y generación eléctrica como se describe a continuación.

3.6.2.1 Producción

La energía obtenida a partir de la biomasa mediante la transformación de la materia prima en combustible, teniendo en cuenta el poder calórico el cual depende del porcentaje de fibra y la humedad, puede darse de distintas formas. Entre ellas se encuentra la biomasa sólida tradicional, bagazo o leña (Moragues & Rapallini)., hasta los pellets un tipo de combustible granulado a base de madera en forma de cilindro comprimido de aserrín, u otros desechos forestales utilizados para fines domiciliarios, comerciales o industriales (Segura), o briquetas, biocombustibles originadas a través de un proceso de compactación de residuos ligno-celulósicos a temperaturas elevadas, similares a los pellets pero de mayor tamaño (LIPPEL, s.f.). Estas formas ofrecen muchas ventajas al ser biomasa seca y aportando un mayor poder calórico, lo cual conlleva a disminuir el riesgo de generación de inconvenientes al momento de su quema, adicional a esta ventaja, con el aumento en su densidad, estos combustibles tienen una mejor relación costo/beneficio en cuanto a su transporte. La Tabla 12 presenta la comparación entre las cantidades de combustible requerido en toneladas y metros cúbicos para generar 18.5 MBTU.

Tabla 12 Combustible requerido para generar 18.5 MBTU

Combustible	Cantidad	
	Ton	M3
Briquetas	1	1.6
Leña	2	6.6
Aserrín verde	2.3	6.5
Petróleo	0.5	0.5
GLP	0.404	192
Gas Natural	0.51	728

Fuente: El autor a partir de (LIPPEL, s.f.)

El biogás y los biocombustibles son originados a partir de procesos diferentes al igual que sus usos; por ejemplo, el biogás puede ser utilizado en cocinas, industrias y

vehículos gracias a que sus características suelen ser muy parecidas a las del gas natural. Los biocombustibles según las normas internacionales, son sustitutos de los combustibles tradicionales, donde un porcentaje de combustible fósil es reemplazado por biocombustible sin sacrificar el rendimiento del vehículo (Parihar, Kamil, Goyal, Gupta, & Bhatnagar, 2007).

3.6.2.2 Transformación

La energía obtenida a partir de la biomasa puede darse desde la gasificación hasta la simple combustión, luego las emisiones contaminantes dependen del proceso que se use para su producción. Si el proceso para obtención de energía se hace mediante la combustión directa, el material particulado representará un riesgo ambiental elevado; por otra parte, su eficiencia tampoco es significativa ya que el poder calórico de la misma se encuentra dependiendo de la humedad y la cantidad de fibra de la biomasa, con ello se excluyen algunos cultivos y fuentes bioenergéticas. (Moragues & Rapallini). La pirolisis suele ser otro proceso de transformación mediante el cual se produce una ruptura molecular de la biomasa a bajas temperaturas y presiones moderadas, produciendo biocombustibles, biogás y una fracción sólida (Paradela, Pinto, Gulyurtlu, Cabrita, & Lapa, 2009); Los combustibles obtenidos a través de este proceso pueden ser utilizados directamente como aditivos o combustibles, contribuyendo a la reducción de las emisiones por transporte así como también mejorando su eficiencia. (Parihar, Kamil, Goyal, Gupta, & Bhatnagar, 2007).

La gasificación de la biomasa permite utilizar diversidad de materias primas para obtener una gama amplia de derivados los cuales sirven para producir energía térmica, biocombustibles, hidrógeno y energía eléctrica. (Heidenreich & Foscolo, 2015). Por último, la co-combustión busca reducir la contaminación ambiental al igual que mejorar la producción de energía de centrales procediendo a quemar conjuntamente el combustible fósil tradicional con la biomasa (Sahu, Chakraborty, & Sarkar, 2014), para cumplir con esta finalidad, es importante revisar la planta y evaluar sus capacidades. (Royo, Sebastián, García-Galindo, Gómez, & Díaz, 2012).

3.6.3 Infraestructura

Dentro del análisis del ciclo de vida de la biomasa es necesario tener en cuenta la puesta en marcha y el desmantelamiento de las centrales eléctricas excepto la

distribución de la energía generándose un análisis de ciclo de vida con etapas mucho más complejas. (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013)

3.7 Emisiones totales del ciclo de vida

Las emisiones del ciclo de vida del gas natural son representadas en la Tabla 4, el análisis de los datos obtenidos permite ver que la etapa de menores emisiones es la de infraestructura necesaria con emisiones que varían entre los 0.04 gCO₂e/kWh hasta 0.43 gCO₂e/kWh, esto dado las características energéticas de la biomasa donde la misma es de fácil almacenaje y transporte, por tanto, no requiere del desarrollo de una compleja infraestructura.

Tabla 13 Emisiones del ciclo de vida de la biomasa

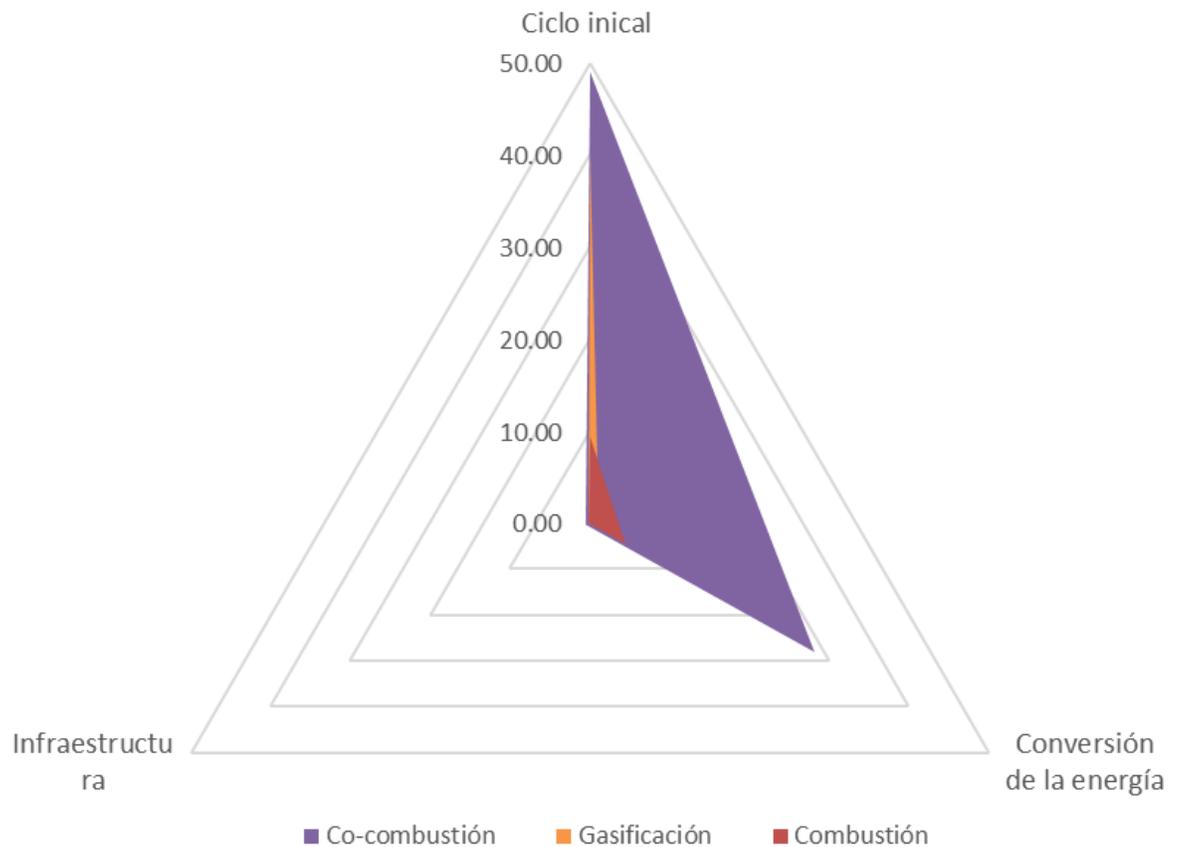
Proceso	Fuente	Ciclo inicial (gCO ₂ e/kWh)	Conversión de la energía (gCO ₂ e/kWh)	Infraestructura (gCO ₂ e/kWh)	Total (gCO ₂ e/kWh)
Combustión	(European Commission, 1999)	1.3	7.2	-	8.5
	(Sebastián, Royo, & Gómez, 2011)	8.7	3.0	0.1	12.0
	(Sebastián, Royo, & Gómez, 2011)	18.0	3.0	0.0	21.0
	Promedio	9.33	4.40	0.04	13.83
Co-combustión	(Styles & Jones, 2007)	87.0	43.0	0.0	130.0
	(Styles & Jones, 2007)	81.0	49.0	0.0	130.0
	(European Commission, 1999)	27.0	43.0	2.0	72.0
	(Sebastián, Royo, & Gómez, 2011)	21.0	3.0	0.1	24.0
	(Sebastián, Royo, & Gómez, 2011)	29.0	3.0	0.1	32.0
	Promedio	49.00	28.20	0.43	77.60
Gasificación	(European Commission, 1999)	17.0	0.3	-	18.0
	(European Commission, 1999)	63.0	2.0	0.0	65.0
	Promedio	40.00	1.15	0.04	41.50

Fuente: El autor a partir de (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013) (European Commission, 1999) (Sebastián, Royo, & Gómez, 2011) (Styles & Jones, 2007)

La etapa con emisiones intermedias expone las bondades de la biomasa en relación a los procesos de conversión a energía, durante esta etapa se emiten las mismas cantidades de gases efecto invernadero que son absorbidos durante el crecimiento de la planta razón por la cual el balance de la conversión es bajo, exceptuando las

emisiones por co-combustión dado que la producción de energía se realiza a través de la quema conjunta de la biomasa con un combustible fósil; durante esta etapa las emisiones varían entre 1.15 gCO_{2e}/kWh a 28.20 gCO_{2e}/kWh. Finalmente, la etapa de mayor impacto ambiental en materia de gCO_{2e}/kWh es la del ciclo inicial del combustible, esta etapa cuantifica las emisiones del proceso de obtención del combustible, es decir las emisiones asociadas al cultivo y transporte de la biomasa justo antes de su conversión en bioenergía y sus emisiones varían entre 9.33 gCO_{2e}/kWh hasta 49 gCO_{2e}/kWh.

Figura 18 Ciclo de vida de la biomasa- gCO_{2e}/kWh



Fuente: El autor a partir de (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013) (European Commission, 1999) (Sebastián, Royo, & Gómez, 2011) (Styles & Jones, 2007)

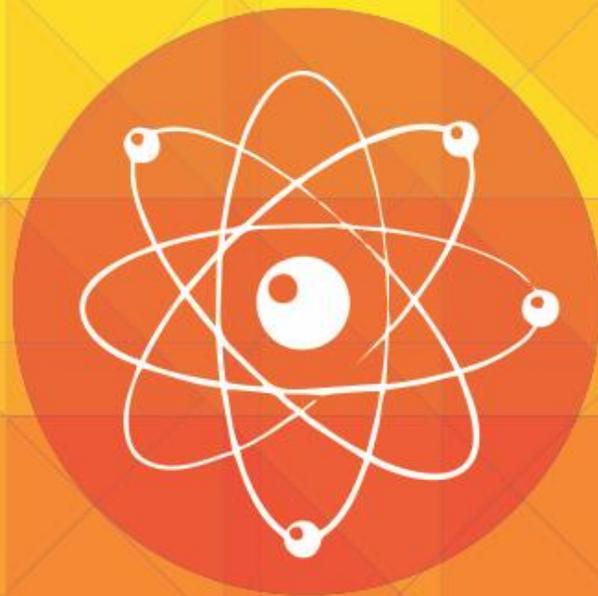
La Figura 18 expone el análisis radial de la biomasa, en el mismo se observa que la tecnología o proceso de conversión de mayor impacto ambiental es la co-combustión, esto dado a que la misma realiza la quema conjunta de la biomasa con combustibles fósiles los cuales tienen una alta emisión de gases contaminantes, el ciclo de vida de este proceso genera emisiones por 77.60 gCO_{2e}/kWh. Por otro lado, el proceso de conversión de menores emisiones es la combustión o la quema directa de la biomasa, este proceso emite la menor cantidad de gases contaminantes dado que

en el no ocurre proceso de transformación adicional a la combustión, siendo entonces la mejor opción en materia de emisiones con 13.83 gCO_{2e}/kWh. En segundo lugar, aparece la gasificación de la biomasa con emisiones totales de 41.50 gCO_{2e}/kWh el aumento de las emisiones procede de las conversiones y pretratamientos requeridos para la generación energética desde la biomasa.

3.8 Alternativas de mitigación

Mediante el análisis de áreas cultivables se puede argumentar que el mundo provee para labores de cultivo energético un excedente de 1.182 GHa. (Abbasi & Abbasi, 2000). Lo cual conlleva al compromiso político y social para evitar la degradación ambiental y proceder a la generación de cultivos altamente eficientes. Por otra parte, la biomasa también es una fuente energética de carbono neutral, ya que la cantidad de emisión de CO₂ que procesa es la misma que absorbe en su etapa de crecimiento (Demirbas A. , 2004) sin embargo, este balance deja de ser factible cuando las emisiones procedentes del cultivo, transporte, procesamiento y de más fases se asocian (Field, Campbell, & Lobell, 2008). Teniendo en cuenta que los cultivos de biomasa requieren del recurso hídrico para sus sostenimiento y crecimiento, los gobiernos y comunidades deben contar con disponibilidad de agua al momento de iniciar con la implementación de los cultivos.

Aunque la demanda y la producción de energía a partir de la biomasa no proyecta un crecimiento considerable (UPME, 2015), es un elemento a tener en cuenta dentro de la matriz energética. Los biocombustibles se plantean como la única opción adecuada para el remplazo de los combustibles fósiles, pero requiere de la madures de las tecnologías lo cual se puede lograr con apoyo gubernamental. Así mismo, la capacidad productiva de los ecosistemas oceánicos y otros presentan una nueva visión en la utilización de la bioenergía. Teniendo en cuenta la posible competencia de la biomasa con los cultivos alimenticios, el virar la mirada a las zonas no aptas para el cultivo agroalimenticio presenta alternativas de mitigación a los impactos generados por el uso de este recurso. (Field, Campbell, & Lobell, 2008). La coadyuva que puede brindar la biomasa en la captura de emisiones contaminantes resulta evidente asociándose la misma con el mejoramiento de la calidad del aire debido a la estrecha relación entre las bioenergías y el ciclo del carbono. Por otro lado, ciertos cultivos biomásicos rivereños pueden absorber los nutrientes adyacentes provenientes de fertilizantes evitando la contaminación de las fuentes hídricas (Hall & Scrase, 1998). La utilización de las turbinas multi-paso (McKendry, 2002) y los sistemas de ciclo combinado presentan una gran ventaja en la reducción de emisiones contaminantes. (Skone, y otros, 2014)



4 NUCLEAR

La energía nuclear a finales del siglo XIX y principios del siglo XX no era un elemento conocido dentro de la canasta energética, sin embargo, Henry Bequerel en 1896 y dos años más tarde los esposos Pierre y Marie Curie realizaron interesantes descubrimientos sobre la radiactividad contribuyendo a la base de la energía nuclear. El interés por analizar la descomposición de la radiactividad permitió reconocer las diferentes clases de radiación que se generan a partir del conocido proceso de desintegración y transmutación radiactiva. A través de los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas se identificó que los elementos radiactivos generan tres tipos diferentes de radiación conocidos como: Rayos alfa (α) los cuales pueden ser detenidos mediante un papel y recorrer solo unos centímetros en el aire, los rayos beta (β) lo cuales pueden atravesar delgadas láminas de aluminio de hasta de 1 mm y en el aire recorrer hasta 2 m, y los rayos gamma (γ) cuyo alcance es superior a los dos ya mencionados, puesto que requieren de bloques de aproximadamente 22 cm de plomo para ser detenidos. (Burk, y otros, 1974)

4.1 Generación de energía atómica

La generación de energía eléctrica de origen nuclear se inició con el reactor generador experimental EBR-I el 20 de diciembre de 1951, dicho generador no se encontraba diseñado para la producción de energía sino para validar el concepto reactor generador. El 26 de junio de 1954 se conectó la primera planta de energía nuclear conocida como APS-1 a la red de energía en Obninsk, Rusia, con una capacidad de 5MW. Dos años más adelante, la primera planta de energía comercial nombrada Calder Hall 1 fue conectada a la red eléctrica inglesa el 27 de agosto de 1956 produciendo 50 MW de energía surgiendo de esta manera la implementación de la energía nuclear para usos no bélicos. (European Nuclear Society, s.f.)

La energía que se origina de fuentes atómicas puede ser de dos tipos: aquella que surge de la unión de dos núcleos livianos conocida como la energía de fusión, y aquella que surge de la división de un núcleo atómico en dos o más nuevos núcleos, conocida como energía de fisión. El uso de la fusión atómica para producir energía no es eficiente ya que se requiere mayor energía para el proceso que la que se puede

llegar a obtener. Por ende, la base actual para la producción de energía comercial por procesos nucleares es la fisión nuclear. En la misma un núcleo pesado inestable es bombardeado por una partícula causando la división del mismo, de esta manera se produce una cantidad enorme de energía para generar electricidad. El uranio-235 ($^{92}\text{U}^{235}$) es el elemento radiactivo principalmente usado para la producción de energía atómica, el mismo tiene una vida media en el ambiente de 700 millones de años, pero su abundancia relativa en la corteza terrestre es baja pues este tan solo equivale al 0.71% del uranio de la tierra, mientras el uranio-238 representa el 99.28%. (White, 2007). Las características, diseño y eficiencia de los reactores dependen de las necesidades y tecnologías de generación de energía.

4.2 Combustible Nuclear

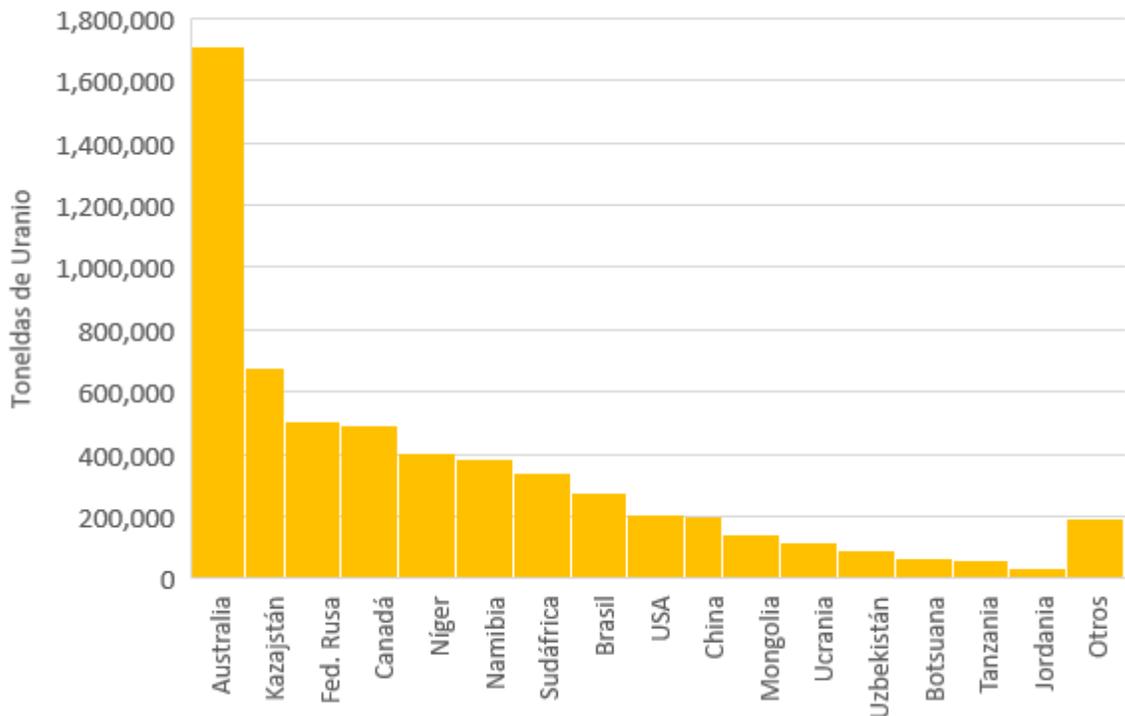
El uranio es un mineral radiactivo el cual es extraído por procesos convencionales de minería en estos procesos se realizan una serie de afectaciones ambientales como la remoción de capa vegetal, migración de especies, afectación a los suelos y subsuelos, así como la contaminación de cuerpos hídricos. En Colombia la búsqueda de uranio no ha sido constante, pero si fructífera con el hallazgo de 8.1 millones de toneladas de recursos inferidos y 0.6 millones de toneladas de mineral de corte en Samaná, Caldas (Agencia Nacional Minera, 2015). Donde se han encontrado minerales asociados como el fosfato y el vanadio, entre otros minerales raros. Dada la posibilidad de minería conjunta, la extracción de uranio de estas minas disminuye sus emisiones, así como sus costos. (U3O8 CORP, s.f.)

4.2.1 Requerimientos mundiales de uranio

Según datos presentados por la World Nuclear Association (WNA) correspondientes al análisis de reactores y requerimientos de uranio, en junio de 2015 en el mundo se encontraban 437 reactores operativos con una potencia neta de 380,250 MWe que lograron producir 2,411 billones KWh en el 2014. En el 2015 se necesitaron 66,883 toneladas de uranio. La WNA señala que la producción de uranio a nivel mundial en el año 2014 fue de 56,252 toneladas. Por otra parte, 67 reactores nucleares se encuentran en construcción cuya potencia neta es de 68,997 MWe, igualmente se encuentran previstos 168 reactores con potencia neta de 189,504 MWe y 322 nuevos reactores propuestos con potencia de 364,270 MWe, todos proyectados para ser operados antes del 2030. (World Nuclear Association, 2015) Igualmente, la International Atomic Energy Agency (IAEA), a través del Power Reactor Information System (PRIS) revela que de los 67 nuevos reactores en construcción 56 son

reactores de agua a presión (PWR), 4 reactores de agua pesada presurizada (PHWR) y 4 reactores de agua en ebullición (BWR). (IAEA, 2015) Los recursos de uranio recuperables en el año 2013, así como también los países que poseen los mayores porcentajes de uranio recuperables, se relacionan en la Figura 19. Con los recientes descubrimientos de uranio en Colombia, la misma podría ser incluida en tercer lugar con 600.000 toneladas de uranio.

Figura 19 Recursos recuperables de uranio a 2013



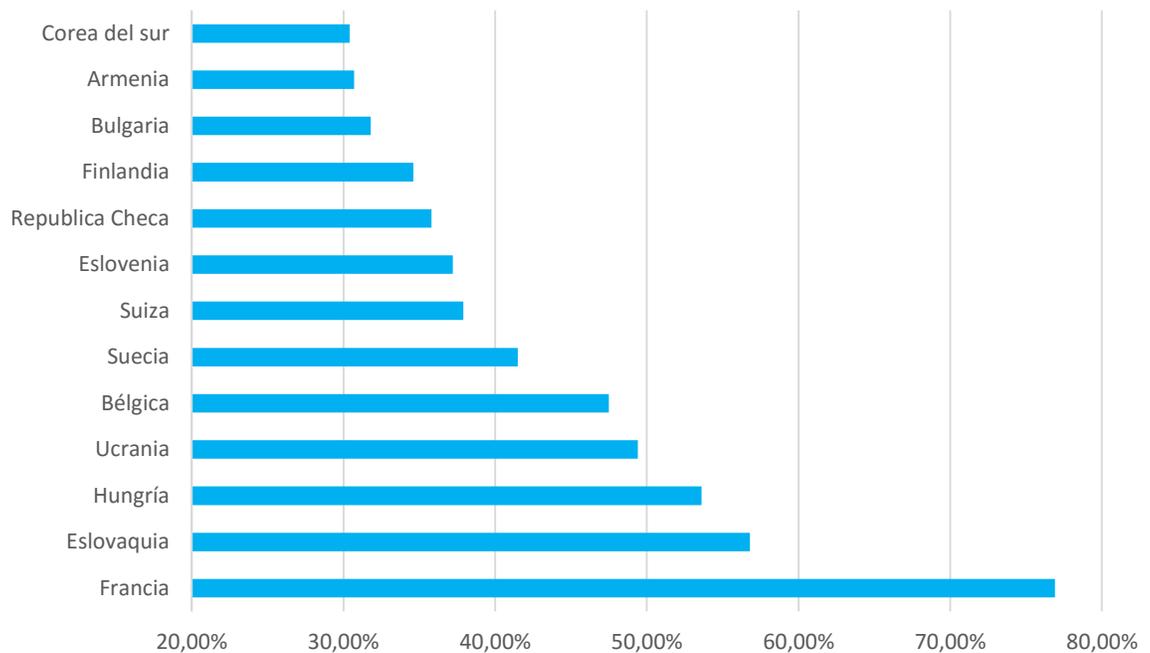
Fuente: Autor a partir de (World Nuclear Association, 2015)

4.3 Hechos emblemáticos

El uso de reactores operativos ha ido mostrando una variación desde el año 2010, año en el cual 441 reactores estaban operando; para el año 2013 esta cantidad disminuyó a 434 y para el año 2014 la cifra de reactores operacionales aumentó tan solo a 438. Igualmente, el suministro mundial de energía proveniente de centrales nucleares alrededor del mundo se redujo en 283 TWh entre el año 2010 y 2012, aunque la misma se recuperó en 64.18 TWh durante los años 2012 a 2014 (IAEA, 2015). Aún con las diferentes perspectivas en relación a la energía nuclear, su uso suele ser importante en muchos países. Para el año 2009 proporcionó el 14% de

electricidad en el mundo, sin embargo, dicho valor recayó en el 2011 a un 10% debido al desastre de Fukushima, puesto que Alemania y Japón disminuyeron su producción en cerca de 200 TWh. A raíz de la situación mencionada, varios países comenzaron a reconsiderar sus planes de utilización de la energía atómica. (Park & Ohm, 2014) A nivel mundial 30 países operan reactores nucleares de los cuales 13 (Figura 20), confían en esta para la satisfacción de por lo menos un cuarto de su demanda eléctrica. (Nuclear Energy Institute, 2015)

Figura 20 Participación nuclear en la canasta eléctrica por país



Fuente: Autor a partir de (Nuclear Energy Institute, 2015) y (IAEA, 2015)

4.3.1 Alemania

Con la catástrofe nuclear de Fukushima (Japón), Alemania decidió migrar hacia energías renovables, por tanto, inició el cierre 8 de las 17 centrales operativas que se encontraban en el país. Alemania tiene planeado dentro de 11 años suprimir los 9 reactores restantes, para de esta manera eliminar completamente el uso de la energía nuclear para el año 2022, permitiendo solo la disponibilidad de energías renovables como lo es la solar y la eólica (La actualidad de Alemania, s.f.); las 17 centrales que se mencionan con anterioridad son sumadas a 16 emplazamientos en proceso de apagado total, conformando 33 centrales atómicas para ser desmanteladas. Este proceso tiene un elevado costo, luego la problemática actual está relacionado al presupuesto asignado ya que según expertos los fondos para tal fin son

insuficientes (Deuse/CP, 2014). Por otra parte, Alemania se comprometió a reducir en 40% las emisiones de CO₂ haciendo uso de energías renovables y de bajas emisiones, así como también la inversión en redes eléctricas (DW, 2011).

4.3.2 Japón

La empresa Tokyo Power Company (TEPCO) ha venido aportando importantes inversiones para controlar las emisiones que provocó el accidente nuclear según el informe presentado por Greenpeace en febrero de 2015. Sin embargo, aún se continúan registrando una alta contaminación. TEPCO ha venido implementando medidas para evitar la contaminación de aguas subterráneas y oceánicas dentro de las cuales se encuentran la construcción de un muro de hielo cuya circunferencia es de 1.5 km alrededor de Fukushima Daiichi, la estructura consta de 1.571 tubos de acero enterrados a 30 metros de profundidad y posteriormente congelados a -30°C el cual tardará 6 años en cumplir su objetivo. Por otra parte, la construcción de un muro impermeable de 770 metros que divide la central del océano se encuentra reduciendo en un 97.5% el cesio y estroncio vertidos al océano al igual que otros químicos radiactivos que causan daños a la salud. Los residuos nucleares encontrados en 54.000 emplazamientos como jardines, parqueaderos y parques han requerido entre 15 y 28 millones de metros cúbicos para ser depositados; al momento de descontaminar zonas por encima de 1 milisieverts (mSv) se generarían cerca de 100 millones de toneladas de desechos radioactivos. (Burnie, 2015)

Para el desmantelamiento de Fukushima la inversión ha sido de 4.956 millones de dólares de los 8.400 millones presupuestados para la totalidad del proceso, el gobierno se comprometió a financiar dicha práctica y el préstamo de 75.600 millones de dólares destinados a la compensación de víctimas y descontaminación del territorio circundante con la condición del retorno del dinero por TEPCO. Sin embargo, con el dinero invertido no se obtuvieron los resultados que se esperaban como el tratamiento de líquido radioactivo, tanques provisionales de agua contaminada y muro de hielo subterráneo (El Universo, 2015). Al declararse que dos reactores de la planta de Sendai pueden ser reactivados, la población japonesa se encuentra en alerta debido a la problemática que afronta Fukushima (BBC, 2014).

4.3.3 Bolivia

El gobierno Boliviano proyectó la instalación de un complejo de energía nuclear en la Paz para el año 2025 de 2.000 millones de dólares; El sistema contará con 5 usos: Un radiador gamma para esterilizar alimentos, mejoramientos de semillas y aumento

de productividad, un ciclotrón para diagnósticos médicos, una central nuclear para generación eléctrica, la cuantificación de uranio y torio nacional, y un reactor con fines investigativos, sin embargo aún no se ha definido la capacidad del reactor así como tampoco los depósitos para el manejo de los residuos que se generen (del Granado Cosío, 2015).

Según Luis Vásquez Medina, estudios llevados a cabo por General Electric Company publicados en 1960 por la junta de energía atómica del Perú señalan que debido a las condiciones geográficas en la que se encuentran el lago Titicaca ubicado entre Perú y Bolivia se hace viable usar una central nuclear en este emplazamiento ya que la distribución de la energía eléctrica en esa zona representa un gran reto. (Vásquez Medina, 2006)

4.4 Energía nuclear en Colombia

En el año 1965 Colombia recibe un reactor nuclear donado por el gobierno americano, el cual es entregado al Instituto de Asuntos Nucleares con el propósito de realizar investigaciones sobre el mismo; sin embargo, en 1997 dicha institución desaparece y el reactor llega a manos de Ingeominas. El equipo posee una capacidad de 30 kilovatios valor totalmente inferior a los 600 megavatios o más que puede manejar una central nuclear, este instrumento de enseñanza es usado por la institución en el área de geoquímica forense proveyendo grandes ventajas en el campo de la investigación. (Agencia de noticias de la U. Nacional, 2014). A pesar de que el uso de energía nuclear en Colombia no es actualmente una realidad, el mismo se ha venido incluyendo en planteamientos de la UPME. (Consorcio energético CORPOEMA para la Unidad de Planeación Minero Energetica, 2010)

4.5 Impactos ambientales

La generación de impactos ambientales provenientes de la energía nuclear es variada. Las emisiones de gases contaminantes son bajas puesto que las mismas son indirectamente asociadas al ciclo de vida de esta fuente. Los impactos en el suelo son diversos y se relacionan principalmente con la minería, la transformación y el transporte del combustible. Por otro lado, los generados en el agua proviene de los vertimientos de desechos radiactivos en las fuentes hídricas y de los volúmenes de agua utilizados para el enfriamiento del núcleo.

4.5.1 Contaminación del aire

Existe una gran ventaja en la utilización del uranio como combustible, la cual puede ser fácilmente apreciada mediante la comparación de la densidad de energía contenida en el uranio respecto a otros combustibles. Dicha comparación, se encuentra representada en la Tabla 14.

Tabla 14 Comparación de la densidad de energía contenida

Combustible	Electricidad generada (kWh)
1 kg de Carbón	3
1 Kg de Petróleo	4
1 Kg de Uranio	50,000
1 Kg de Uranio con reprocesamiento	3,500,000

Fuente: Autor a partir de (Rashad & Hammad, 2000)

Al implantar una planta, ya sea de carbón o nuclear, cuya área este en el rango de 1 a 4 km² destinada para la producción de 1000 MWe, surge la necesidad de usar 30 toneladas de uranio, 2,600,000 toneladas de carbón y 2,000,000 toneladas de petróleo. Así mismo aparece la generación de residuos; una central nuclear de uranio con dichas características produce residuos altamente radiactivos. (Rashad & Hammad, 2000).

Esta fuente energética presenta ventajas en relación a las emisiones de gases efecto invernadero, puesto que la producción de energía por fusión nuclear no emite directamente gases contaminantes, siendo entonces una de las pocas fuentes energéticas que no generan emisiones durante la producción de energía más si durante su ciclo de vida, pero la problemática de la energía nuclear radica en la generación de residuos radiactivos. La Tabla 15 realiza la comparación en la generación de residuos provenientes de la energía nuclear y carbón. La fuente fósil a través de su combustión genera principalmente contaminantes atmosféricos como el dióxido de carbón, dióxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado y metales pesados, los cuales coadyuvan en el calentamiento global o la contaminación ambiental. Mientras que los desechos de la energía nuclear son

residuos radiactivos de alta, media y baja peligrosidad, los cuales requieren de tratamientos particulares como el almacenaje en depósitos geológicos profundos por periodos de tiempo aun no determinados y bajo losas de concreto y plomo para detener su radiactividad por un periodo de tiempo corto en relación a su vida media de los desechos. (ENRESA)

Tabla 15 Comparación de la generación de residuos y consumo de combustible planta de 1000MWe

Energía	Combustible requerido	Desechos generados
Nuclear	27 toneladas de uranio (160 t uranio natural/año)	25 t de desechos radiactivos de alto nivel
		310 t de desechos radiactivos intermedios
		460 t de desechos radiactivos de bajo nivel
Carbón	2.6 millones de toneladas	6.5 millones de t de CO ₂
		900 t de SO ₂
		4500 t de NO _x
		320,000 t de cenizas
		400 t de metales pesados

Fuente: Autor a partir de (Rashad & Hammad, 2000)

4.5.2 Contaminación del agua

Algunas plantas nucleares derraman basura radiactiva líquida en bajas proporciones a fuentes hídricas, debido a esto surge la necesidad de investigar la presencia, absorción y distribución de radionúclidos artificiales en el agua, biota y sedimentos cercanos a la planta (Sanchez-Cabeza & Molero, 2000). En la capacidad de movilización de los radionúclidos radica su importancia puesto que estos pueden ampliar los rangos de afectación a zonas alejadas de las plantas nucleares ampliando la magnitud en la afectación ambiental. (Salbu, Lind, & Skipperud, 2004).

A pesar de que la energía nuclear es considerada muy ecológica, el consumo de agua que requiere para disminuir la temperatura en la refrigerante del núcleo y antes de realizar la descarga en la fuente hídrica aledaña, es bastante elevado. La energía nuclear representa un consumo de agua promedio de 230 m³/MWh. (Fthenakis & Chul Kim, 2010)

4.5.3 Contaminación del suelo/ecosistema

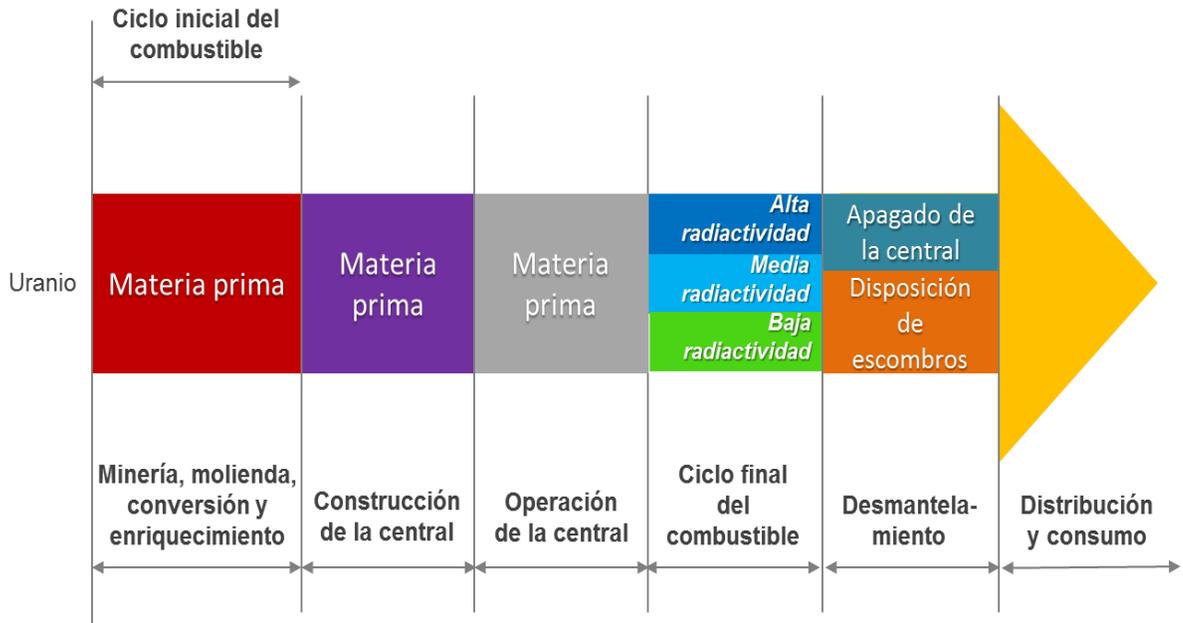
Uno de los mayores inconvenientes referidos a las plantas de fisión es el riesgo de causar daños en la tierra y los ecosistemas que son irreversibles ante catástrofes nucleares tales como la de Chernóbil y Fukushima, cabe mencionar que, ante dichos riesgos las empresas aseguradoras no asumen los mismos puesto que son considerados demasiado altos en comparación con los beneficios que se puedan obtener. La disponibilidad de fuentes económicas de uranio se considera un limitante para la fisión nuclear y un aspecto agravado según la afectación de la minería de uranio a los suelos y los ecosistemas, además los precios de la misma no son reales debido a los altos costos y problemas que surgen a raíz del cierre de la central y que posteriormente afectan las población y usuarios, así como los suelos y el ecosistema circundante a la central clausurada y los depósitos de materiales radiactivos. Por otra parte, el usuario es el que asume todo el costo adicional que surja. Igualmente existen otras desventajas relacionadas con problemas de seguridad, vulnerabilidad en las plantas de generación y confiabilidad no mencionando el riesgo de que el número de armas nucleares pueda proliferarse. (Verbruggen, Laes, & Lemmens, 2014).

4.6 Ciclo de vida de la energía nuclear

El análisis del ciclo de vida aparece en los Estados Unidos y Europa hacia los años 60 como una estrategia de evaluación ambiental. La empresa pionera a la cual se le realizó este análisis fue Coca-Cola en el año 1969 por el Midwest Research Institute (MRW). El ACV es una metodología que mediante entradas, salidas e impactos de un sistema realiza una evaluación ambiental, por tanto, lo que se busca con el ACV es identificar los diferentes procesos que aportan al impacto ambiental permitiendo de esta manera que contribuyan a mejorar los desempeños ambientales. (Conservación y Carbono, s.f.).

El proceso que apoya el Análisis de Ciclo de Vida o Life Cycle Assesment (LCA) busca la objetividad para detectar impactos ambientales en productos, sin embargo, el mismo puede llegar a ser muy complejo dado el caso que se introduzca una gran cantidad de variables desviando el objetivo que se pretende. (Rieznik Lamana & Hernández Aja, 2005). Para analizar el ciclo de vida de la energía nuclear, diferentes estudios se han venido realizando. Benjamin K. Savacool ha desarrollado uno de los ACV más completos. (Savacool, 2008). La Figura 21 Ciclo de vida de la energía nuclear presenta las etapas del análisis del ciclo de vida de la energía nuclear.

Figura 21 Ciclo de vida de la energía nuclear



Fuente: Autor a partir de (Savacool, 2008)

4.6.1 Ciclo inicial del combustible nuclear

El ciclo inicial del combustible nuclear hace referencia a las etapas del proceso de producción del combustible principalmente el uranio. Dentro de estas etapas se incluyen la minería, la molienda, la conversión y el enriquecimiento del uranio.

4.6.1.1 Minería de Uranio

Todo proceso de minería genera impactos negativos sobre el ecosistema ya que se requiere intervenir la capa vegetal generando migración de especies, así como también desestabilización de terreno, afectación al subsuelo y contaminación a fuentes de agua subterráneas ejerciendo la minería subterránea. Implementando la minería de conjunta, es decir al realizar la extracción de algún mineral paralelamente los riesgos ambientales pueden disminuirse, en el caso específicamente del uranio extrayendo otros minerales que se encuentren en el mismo yacimiento. (Galvis Martínez & Serrano Guzman, 2015).

4.6.1.2 Molienda de Uranio

El mineral de uranio puede ser procesado por medios físicos y químicos filtrándolo, tamizándolo, centrifugándolo procedimiento a través del cual el óxido de uranio puede ser extraído, obteniéndose el “Yellow Cake” el cual contiene elevadas concentraciones de uranio, cabe mencionar que el proceso descrito conlleva al consumo de elementos químicos que aportan una alta cantidad de contaminación; igualmente se requieren equipos especiales que necesitan usar combustibles fósiles para operar debido a que las plantas pueden estar alejadas de centrales eléctricas. (World Nuclear Transport Institute)

4.6.1.3 Conversión y enriquecimiento de Uranio

El hexafluoruro (Hex) de uranio es un material corrosivo y reactivo que se genera a partir de la conversión a la cual se somete el óxido de uranio. Con el fin de obtener el enriquecimiento del uranio, el centrifugado en cascada puede ser un método a usar para lograr dicho fin, el mismo consiste en girar el gas a elevadas revoluciones dentro de una cámara, los isótopos U238 y U235 son separados y el U238 o también conocido como uranio empobrecido se precipita, el proceso puede repetirse para el hexafluoruro enriquecido. Después de llevar a cabo el proceso descrito, el gas es transformado en un horno en pastillas prensadas de óxido de uranio y almacenadas en tubos para finalmente ser usadas en los reactores. Por otra parte, el escape del Hex puede reaccionar químicamente con el aire húmedo originando productos tóxicos. (World Nuclear Transport Institute)

4.6.2 Construcción de la central nuclear

Para construir una planta nuclear de agua a presión (PWR) con una capacidad de 1.000 MWe promedio, son necesarios aproximadamente 170.000 toneladas de concreto, 32.000 toneladas de acero, 1.363 toneladas de cobre y 205.464 toneladas de otros materiales. La productividad aportada por la planta no es tan eficiente ya que de los 30 a 40 años de vida útil que posee son productivos 24 años a máxima potencia, principalmente debido al tiempo de cargue de combustible y enfriamiento previo a su desmantelamiento. (Savacool, 2008)

4.6.3 Operación de la central nuclear

La central nuclear en orden de su correcta operación necesita el abastecimiento de combustible, refrigeración del núcleo y actividades propiamente de la central operativa; procedimientos que tienden a generar gases que estimulan la generación del efecto invernadero. Sin embargo, como se dijo anteriormente en comparación con algunas fuentes de energía convencionales para producir 1.000 MWe, la cantidad de carbón requerida equivale a 2.6 millones de toneladas, así mismo se necesitan 2 millones de toneladas de petróleo o 30 toneladas de uranio (Rashad & Hammad, 2000). Los riesgos que aporta el uranio son de tipo radiológicos, toxicológicos y propios de la reacción en cadena. (Saavedra, Buenos Aires)

4.6.4 Ciclo final del combustible nuclear

Para que una planta nuclear de 1000 MWe opere correctamente, necesita consumir 27 toneladas de uranio, como ya se ha venido mencionando con anterioridad, esto implica generar 25 toneladas de desechos radiactivos de alto nivel, 460 toneladas de desechos con baja radiactividad y 310 toneladas de desechos intermedios. (Rashad & Hammad, 2000). Teniendo en cuenta que los desechos mencionados tienen una vida en el medio, superior a aquellos gases de efecto invernadero, el volumen descrito representa un riesgo bastante significativo. (Galvis Martínez & Serrano Gúzman, 2015). Las disposiciones finales de estos desechos deben ser depositados en un almacenamiento geológico profundo u otro tipo de sistema de almacenamiento de residuos radiactivos. (ENRESA)

4.6.5 Desmantelamiento de la central nuclear

Cuando el ciclo de vida de la central nuclear llega a su fin o se presente un daño irreversible que afecte la integridad de la misma, surge la necesidad de realizar el desmantelamiento de la misma dentro de un tiempo muy prudencial de hasta 100 años. Una vez se cumple el periodo de enfriamiento se procede a desmantelar la planta nuclear con su núcleo, reduciendo a pequeñas fracciones su tamaño de tal forma que puedan ser depositados en los almacenamientos adecuados. El 50% de la energía requerida para la construcción de una central puede ser la requerida para llevar a cabo el proceso que se ha venido mencionando. Por otra parte, los restos de concretos contaminados con aerosoles radiactivos necesitan ser captados o filtrados,

así como también aquellos líquidos de descontaminación debido a su gran radiactividad. (Siles López).

4.6.6 Emisiones totales del ciclo de vida

La Tabla 16 presenta las emisiones del ciclo de vida de la energía nuclear, durante esta evaluación ambiental se pudo identificar que la etapa de mayores emisiones corresponde a la fase anterior del combustible donde se observan emisiones de hasta 118 gCO₂e/kWh y un promedio de 25.1 gCO₂e/kWh principalmente debido al proceso de extracción del combustible por minería, así como los procesos de transformación del mineral en combustible nuclear. La segunda etapa de mayores emisiones corresponde al desmantelamiento de la central donde las emisiones provenientes de la demolición y disposición final de los residuos en almacenamientos geológicos profundos generan hasta 54.5 gCO₂e/kWh. Las menores emisiones de gases efecto invernadero provienen de la construcción de los emplazamientos y la fase de disposición final del combustible de diferentes radiactividades con emisiones promedio de 8.2 gCO₂e/kWh y 9.2 gCO₂e/kWh respectivamente. La etapa de operación presenta emisiones que varían desde 0.1 gCO₂e/kWh hasta 40 gCO₂e/kWh con un promedio de 11.6 gCO₂e/kWh, las emisiones durante esta etapa no provienen de la generación de energía propiamente dicha dado que la energía nuclear posee la particularidad de no generar emisiones de gases efecto invernadero durante las fases de conversión, más si durante los procesos y tratamientos asociados a esta fase.

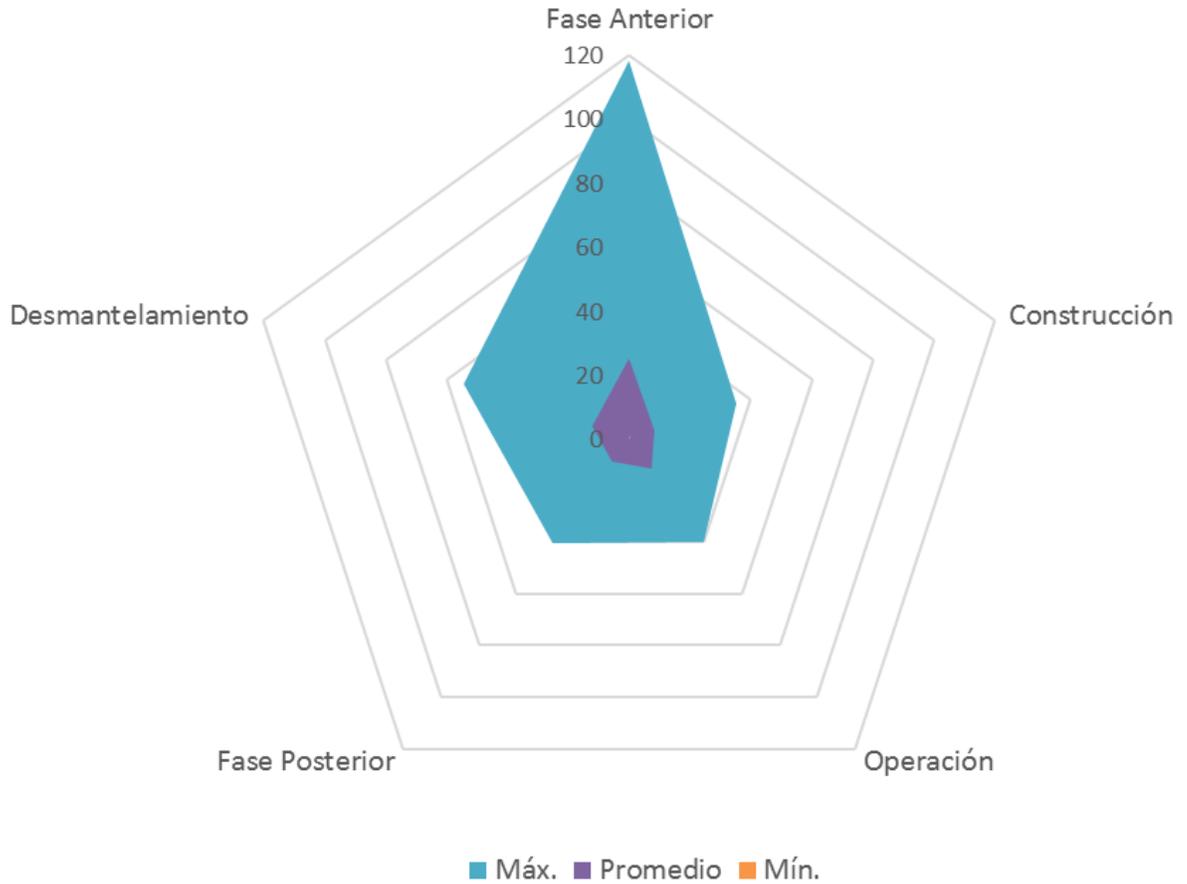
Tabla 16 Ciclo de vida de la energía nuclear

Emisiones (gCO ₂ e/kWh)	Fase Anterior	Construcción	Operación	Fase Posterior	Desmantelamiento	Total
Mínimo	0.6	0.3	0.1	0.4	0.0	1.4
Máximo	118.0	35.0	40.0	40.8	54.5	288.3
Promedio	25.1	8.2	11.6	9.2	12.0	66.1

Fuente: Autor a partir de (Savacool, 2008)

La Figura 22 Ciclo de vida de la energía nuclear - gCO₂e/kWh expone lo establecido en la Tabla 16, mostrando las diferencias de los diversos estudios donde se puede encontrar que las emisiones mínimas posibles para la energía nuclear equivalen a 1.4 gCO₂e/kWh y pueden llegar un máximo según los autores de 288.3 gCO₂e/kWh, el promedio de las emisiones provenientes de la energía nuclear es de 66.1 gCO₂e/kWh.

Figura 22 Ciclo de vida de la energía nuclear - gCO₂e/kWh



Fuente: Autor a partir de (Savacool, 2008)

4.7 Alternativas de mitigación

El almacenamiento geológico profundo es uno de los métodos más aceptados para el manejo de residuos, la razón por la cual es una alternativa atractiva para tal fin es porque el mismo permite que los residuos radiactivos puedan ser almacenados por tiempos indefinidos evitando que la población tenga contacto directo con los mismos (ENRESA). Las centrales nucleares experimentales tipo Terrapower pueden ser una alternativa futura viable a emplearse ya que el combustible con el cual operan es combustible nuclear empobrecido a través del proceso de fisión previo lo cual permite reciclar combustibles por más de 700 años. (intellectualventures, 2013).

Sin embargo, es importante no olvidar las dificultades que se han venido originando a partir del uso de energía nuclear en países desarrollados, igualmente las

aseguradoras se han resistido a la inclusión de los proyectos nucleares dentro de sus servicios debido a la alta complejidad en materia de riesgos que pueden llegar a surgir. En países como Colombia los riesgos aumentan dramáticamente teniendo en cuenta la falta de tecnologías, conocimientos y seguridad, en especial en etapas cruciales como las del posible posconflicto (Galvis Martínez & Serrano Guzman, 2015).

5 COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Una vez identificados los múltiples impactos de los diversos sistemas energéticos analizados es pertinente la comparación de los resultados de los ciclos de vida de estos elementos estudiados, esta comparación brinda la posibilidad de encontrar las diferencias y similitudes, así como la identificación cuantitativa de las mejores opciones en materia energética. El análisis de ciclo de vida dentro de este estudio, es una herramienta de identificación y cuantificación de emisiones, por tanto, el mismo brinda una visión comparativa en relación a gases efecto invernadero, pero muchas variables quedan excluidas dentro de este proceso por lo cual, la inclusión de la metodología EPM o de Arboleda para la cuantificación de impactos permite la evaluación de variables y factores no correspondientes únicamente a las afectaciones al aire. A continuación, se presentan la comparación de los análisis de ciclo de vida y la comparación por medio de la matriz EPM.

5.1 Comparación de análisis de ciclo de vida de los energéticos

La Tabla 17 presenta la comparación de los ciclos de vida de las fuentes energéticas estudiadas según su respectiva tecnología de conversión, en esta tabla se puede ver que en materia de emisiones se presenta como la mejor alternativa la combustión directa de la biomasa, puesto que en este proceso no se ven añadidas emisiones por la quema conjunta con combustibles fósiles o por algún proceso adicional de transformación como sucede con la gasificación de la biomasa, metodología que aunque ampliamente implementada dadas sus múltiples ventajas en materia de facilidad de implementación y la equivalencia de su producto básico con el gas natural, ocupa el segundo lugar.

El uso de la energía nuclear se perfila en tercer lugar por debajo de la co-combustión de la biomasa con combustibles fósiles, puesto que, aunque la producción de energía por fisión atómica no emite contaminantes directamente si posee emisiones indirectas asociadas a su uso.

Tabla 17 Comparación del análisis de ciclo de vida de los energéticos

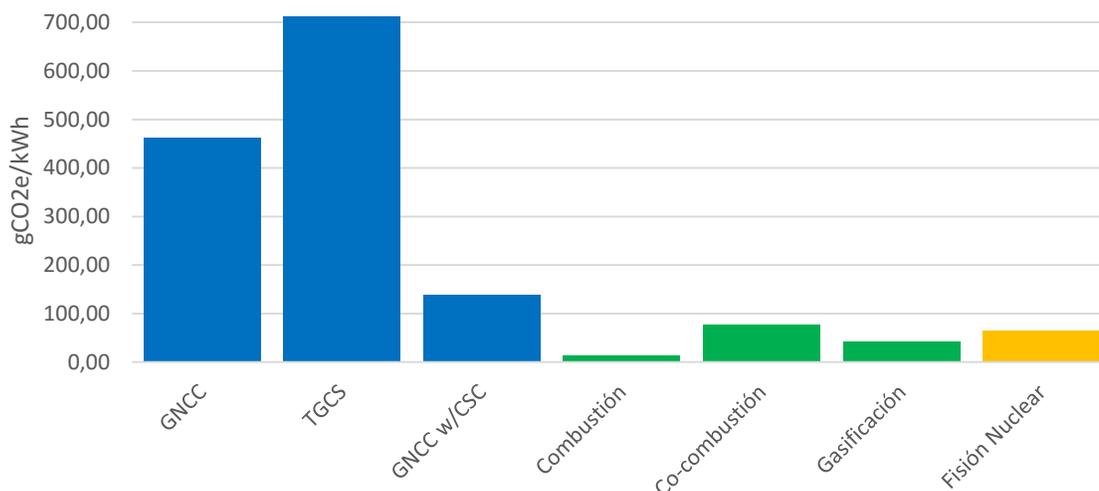
Energético	Tecnología	ACV (gCO ₂ e/kWh)
Gas natural	Gas Natural de Ciclo Combinado (GNCC)	462.73
	Turbina de Gas de Ciclo Simple (TGCS)	711.73
	Gas Natural de Ciclo Combinado con captura y secuestro de carbono (GNCC w/CSC)	137.73
Biomasa	Combustión	13.83
	Co-combustión	77.60
	Gasificación	41.50
Energía Nuclear	Fisión Nuclear	66.08

Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014), (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013) (European Commission, 1999) (Sebastián, Royo, & Gómez, 2011) (Styles & Jones, 2007) (Savacool, 2008)

La mejor opción de producción eléctrica desde el gas natural es el Gas Natural de Ciclo Combinado con captura y secuestro de carbono (GNCC w/CSC), esta tecnología reduce ampliamente las emisiones al combinar dos procesos de forma simultánea implementando los ciclos combinados para ampliar la eficacia en el uso del gas natural, además de mejorar la eficiencia de las plantas de termoeléctricas mientras se realiza la captura de las emisiones atmosféricas generadas por la combustión del gas natural. La segunda mejor opción en relación al gas natural es el ciclo combinado simple donde no se realiza la captura de las emisiones generadas por tanto el balance del ciclo de vida se ve ampliamente aumentado. Por otro lado, la peor opción analizando las tecnologías y energéticos de referencia es la obtención de energía con turbinas de gas de ciclo simple a partir del gas natural, esta tecnología no brinda las ventajas que presenta el ciclo combinado puesto que no reaprovecha los recursos de la combustión y tampoco captura las emisiones atmosféricas emitidas por el empleo del gas natural como combustible.

La Figura 23 expone gráficamente la comparación de los tres ciclos de vida analizados durante el desarrollo del presente documento, dicha grafica permite observar que dentro de las mejores tecnologías y energéticos se encuentra en primer lugar la biomasa y sus procesos de transformación, seguidos por la energía nuclear con sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero, subsiguiente a estas dos fuentes de energía el combustible fósil del grupo o gas natural, con sus procesos y tecnologías de conversión. Sin lugar a dudas la biomasa brinda la mejor opción de generación de energía eléctrica partiendo de las bajas emisiones de dióxido de carbono equivalente encontradas en su ciclo de vida.

Figura 23 Comparación grafica del análisis de ciclo de vida de los energéticos



Fuente: autor a partir de (Skone, y otros, 2014), (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013) (European Commission, 1999) (Sebastián, Royo, & Gómez, 2011) (Styles & Jones, 2007) (Savacool, 2008)

5.2 Comparación de impactos ambientales según el método EPM o de Arboleda.

La evaluación ambiental busca predecir y evaluar las modificaciones posibles en el ambiente por acción u obra de un proyecto o a actividad, es decir determinar la afectación de los impactos ambientales. La identificación y evaluación ambiental es un proceso difícil y complejo dado la dinámica de los ecosistemas y sus relaciones, la incertidumbre del impacto y el cambio de los componentes como la fauna, la flora y los aspectos sociales, así como el aire y el agua.

El método EPM o método Arboleda, fue desarrollado en el año de 1986 por la Unidad de Planeación de Recursos Naturales de las Empresas Públicas de Medellín. Este método utiliza diversos parámetros o criterios como la clase, la presencia, la duración, la evolución y la magnitud para evaluar el impacto ambiental causado por la actividad, en este caso la producción de energía. La evaluación de estos parámetros se presenta en la Tabla 18. Una vez evaluados los parámetros se realiza la cuantificación de la evaluación ambiental con ayuda de la siguiente fórmula. (Arboleda G., 2008)

$$Ca = C(P(7 * E * M + 3 * D))$$

Tabla 18 Criterios de evaluación matriz EPM o Arboleda

Criterio	Descripción	Expresión	Evaluación		Calificación		
			mín.	máx.	mín.	máx.	
Clase	C	Define el sentido del cambio ambiental, es decir si el impacto es positivo o negativo.	Positivo	-	-	-	-
			Negativo	-	-	-	-
Presencia	P	Califica la posibilidad de que el impacto pueda darse y se expresa como porcentaje de la probabilidad de ocurrencia.	Cierta	100%	-	1	-
			Muy Probable	70%	100%	0.7	0.99
			Probable	40%	70%	0.4	0.69
			Poco probable	20%	40%	0.2	0.39
			Muy poco probable	-	<20%	0.01	0.19
Duración	D	Evalúa la existencia activa del impacto desde la manifestación del mismo hasta que duren sus efectos, se expresa en función del tiempo de permanencia o de vida del impacto generado.	Muy larga o permanente	>10 años	-	1	-
			Larga	7 años	10 años	0.7	0.99
			Media	4 años	7 años	0.4	0.69
			Corta	1 años	4 años	0.2	0.39
			Muy corta	-	<1 año	0.01	0.19
Evolución	E	Define la rapidez con la que se presenta el impacto midiendo la velocidad a partir del inicio de la afectación hasta la aparición completa del impacto. Se expresa en términos de tiempo transcurrido entre la aparición de la afectación hasta el máximo cambio.	Muy rápida	-	<1 mes	-	1
			Rápida	1 mes	12 meses	0.7	0.99
			Media	12 meses	18 meses	0.4	0.69
			Lenta	18 meses	24 meses	0.2	0.39
			Muy lenta	>24 meses	-	0.01	0.19
Magnitud	M	Califica la dimensión o tamaño de cambio sufrido a causa de una acción. Se expresa como porcentaje de la afectación.	Muy alta	>80%	-	1	-
			Alta	60%	80%	0.7	0.99
			Media	40%	60%	0.4	0.69
			Baja	20%	40%	0.2	0.39
			Muy baja	-	<20%	0.01	0.19

Fuente: autor a partir de (Arboleda G., 2008)

La calificación ambiental, al igual que los parámetros pasee una expresión de su evaluación o calificación según la cual se puede determinar la importancia del impacto, dicha importancia se expresa en la Tabla 19.

Tabla 19 Importancia del impacto

Calificación ambiental		Importancia del impacto
mín.	máx.	
-	<2.5	Poco significativo o irrelevante
2.5	5	Moderadamente significativo o moderado
5	7.5	Significativo o relevante
>7.5	-	Muy significativo o grave

Fuente: autor a partir de (Arboleda G., 2008)

El método de evaluación ambiental de Arboleda permite evaluar diversas actividades entre ellas la producción de energía. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la evaluación ambiental de las fuentes de energía estudiadas en cada una de las etapas del ciclo de vida y las totales. Esta metodología identifica impactos muy significativos, significativos, moderados y poco significativos a través de los cuales se puede determinar la incidencia y el nivel de tales impactos ambientales.

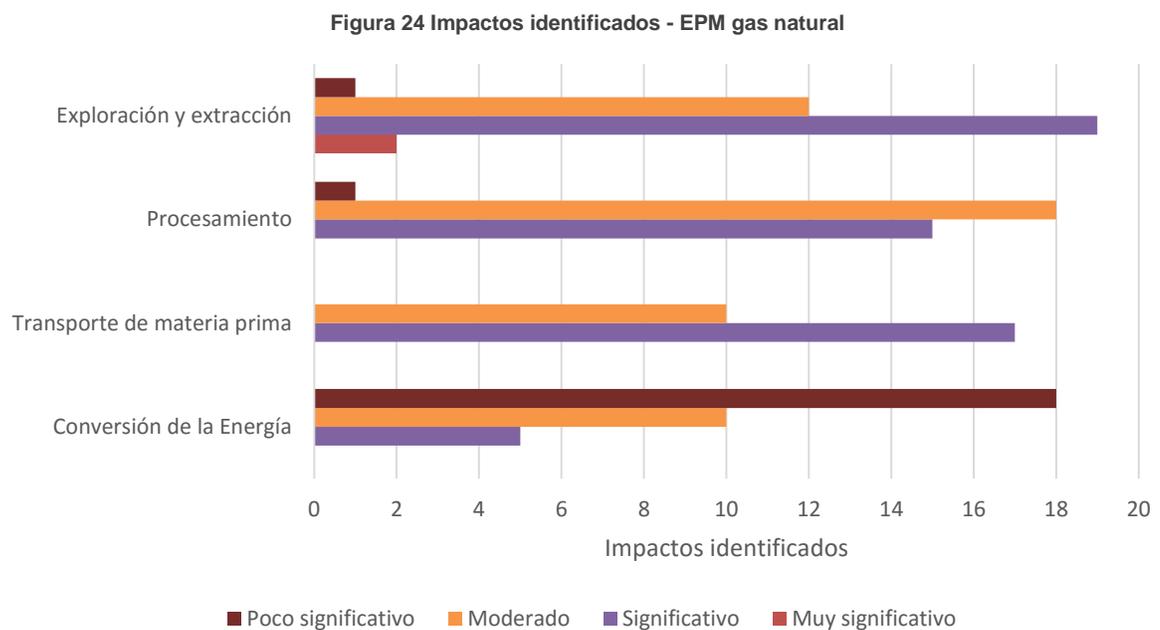
5.2.1 Matriz EPM del gas natural

La evaluación ambiental a través del método EPM del gas natural como fuente de energía es representada en la Tabla 20, en ella se puede observar que las etapas donde se encontraron mayores impactos corresponden a las etapas de procesamiento, exploración y extracción con 34 impactos. Obteniéndose en la primera impactos principalmente moderados y en la segunda impactos significativos.

Tabla 20 Evaluación ambiental EPM del gas natural

Etapa	Muy significativo	Significativo	Moderado	Poco significativo	Total
Conversión de la Energía	0	5	10	18	33
Transporte de materia prima	0	17	10	0	27
Procesamiento	0	15	18	1	34
Exploración y extracción	2	19	12	1	34
Total	2	56	50	20	128

La etapa con menor cantidad de impactos identificados corresponde a la etapa del transporte de la materia prima en donde los impactos se categorizan como significativos y moderados. Así mismo la etapa con resultados intermedios equivale a la conversión de la energía en donde se presentan impactos principalmente poco significativos. La Figura 24 Impactos identificados - EPM gas natural” presenta gráficamente los resultados obtenidos a través del método Arboleda para la evaluación de impactos ambientales, en ella se pueden identificar que las etapas de mayor afectación ambiental corresponden a las de procesamiento, exploración y extracción dado que en ellas se identificaron principalmente impactos significativos y menormente impactos muy significativos, la alta calificación ambiental se debe principalmente a las características implícitas en los procesos e identificadas en el análisis de ciclo de vida. Así mismo, la etapa identificada como de menor afectación es la de transporte dado que los impactos que en este se ocasionan son principalmente locales y no generan afectaciones altamente invasivas en áreas alejadas a las determinadas para el transporte.



5.2.2 Matriz EPM de la biomasa

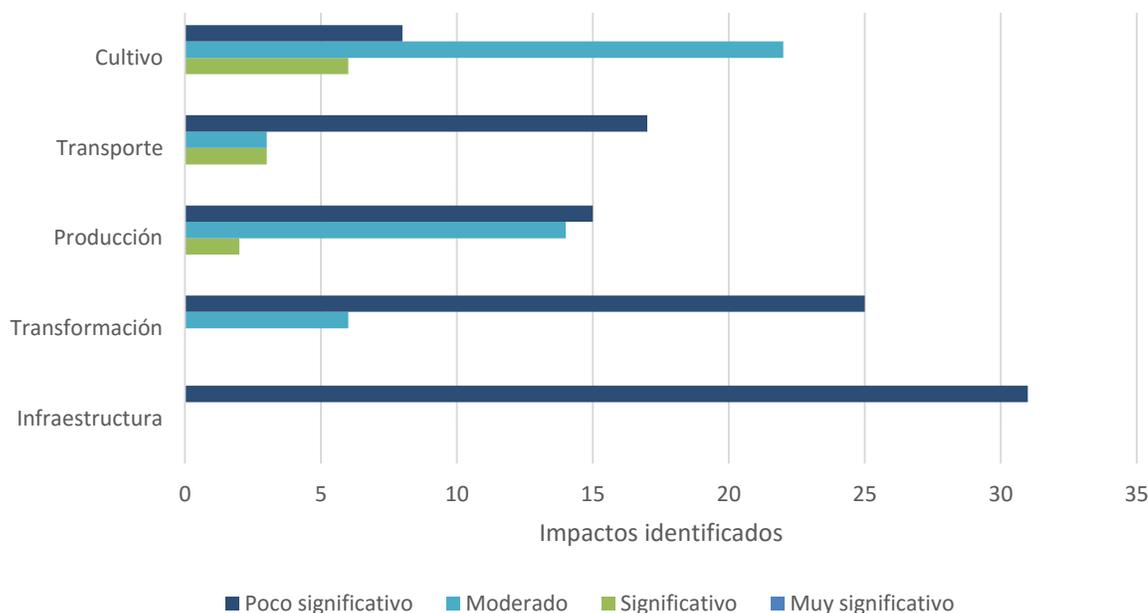
La Tabla 21 Evaluación ambiental EPM de la biomasa, presenta los resultados del análisis de la matriz desarrollada para tal fin. En esta matriz se identificaron 152 impactos ambientales de los cuales 96 son poco significativos, 45 moderados y 11 significativos, con 0 impactos significativos.

Tabla 21 Evaluación ambiental EPM de la biomasa

Etapa	Muy significativo	Significativo	Moderado	Poco significativo	Total
Infraestructura	0	0	0	31	31
Transformación	0	0	6	25	31
Producción	0	2	14	15	31
Transporte	0	3	3	17	23
Cultivo	0	6	22	8	36
Total	0	11	45	96	152

En la Figura 25 se pueden analizar las etapas de mayores y menores afectaciones son el cultivo y la infraestructura respectivamente. El cultivo, como se analizó, en el ciclo de vida es la etapa donde mayores incidencias sobre el suelo y el ecosistema se presentan, en ella el monocultivo es uno de los principales riesgos. Por su parte el transporte debido principalmente a sus emisiones se encuentra en la segunda posición en las características de los impactos, aunque el mismo posee la menor cantidad de impactos identificados.

Figura 25 Impactos identificados - EPM biomasa



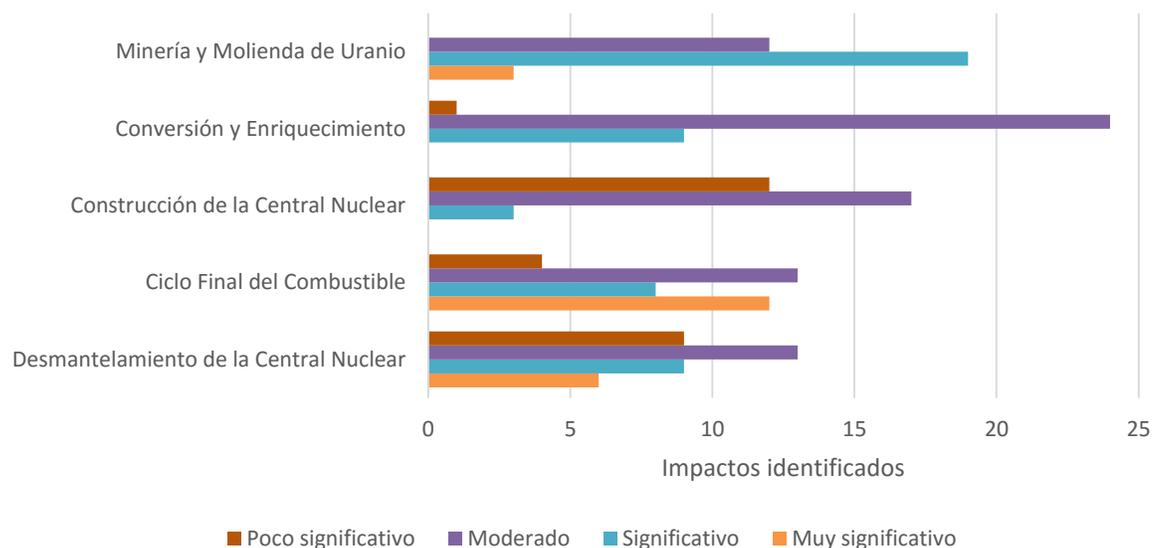
5.2.3 Matriz EPM de la energía nuclear

Tabla 22 Evaluación ambiental EPM de la energía nuclear

Etapa	Muy significativo	Significativo	Moderado	Poco significativo	Total
Desmantelamiento de la Central Nuclear	6	9	13	9	37
Ciclo Final del Combustible	12	8	13	4	37
Construcción de la Central Nuclear	0	3	17	12	32
Conversión y Enriquecimiento	0	9	24	1	34
Minería y Molienda de Uranio	3	19	12	0	34
Total	21	48	79	26	174

La Tabla 22 Evaluación ambiental EPM de la energía nuclear, presenta la caracterización de los impactos identificados en la producción de energía nuclear. Esta tabla resume el total de 174 impactos evaluados en cinco etapas donde las de mayores impactos son la de desmantelamiento de la central nuclear y el ciclo final del combustible con 37 impactos cada una. La etapa con menor número de impactos identificados es la construcción de la central nuclear con 32 impactos. Durante la evaluación se determinó que esta energía posee impactos principalmente moderados con 79 calificaciones de este tipo, seguidos con 48 impactos evaluados como significativos, 26 encontrados poco significativos y 21 calificados como muy significativos.

Figura 26 Impactos identificados - EPM energía nuclear



La Figura 26 representa gráficamente la distribución de las calificaciones ambientales evaluadas en las cinco etapas y sub-etapas del ciclo de vida de la energía nuclear, en la misma se presentan como de mayor incidencia en los ambientales de esta fuente las etapas del ciclo final del combustible y el desmantelamiento de la central debido principalmente a la alta radiactividad presente en estas dos etapas y que representa el mayor riesgo y problemática de la energía nuclear como fuente de energía, puesto que sus impactos no poseen mitigación ni reparación posible bajo las tecnologías y procesos actuales.

6 CONCLUSIONES

La realización de convenios interadministrativos para el fomento de la investigación y la creación de cultura científica brindan grandes oportunidades de desarrollo y posibilita la creación de nuevas ideas, así como la socialización de las mismas planteando cambios significativos en la concepción de la investigación, el desarrollo y la innovación facilitando, así mismo, la creación de oportunidades entorno a los procesos investigativos e incentivando de esta forma la economía del conocimiento para el desarrollo.

Con relación a los diversos factores de los procesos de producción y uso de material energético a base de nuclear, biomasa y gas natural se puede concluir que:

El cambio de las fuentes energéticas es una necesidad real en la actualidad, las múltiples implicaciones que tienen los combustibles fósiles en relación al cambio ambiental por la generación de gases efecto invernadero es evidenciable, pero el corte abrupto de las energías fósiles resulta económica y técnicamente inviable. Por tanto, para realizar una adecuada transición hacia fuentes energéticas alternativas y especialmente renovables, es pertinente tener energéticos puente que reduzcan las emisiones de gases efecto invernadero pero que igualmente puedan ser instaurados como fuente de energía sin mayores cambios en los sistemas de generación y con costos aceptables para el mercado actual, así mismo que tengan un adecuado nivel de madurez en los procesos investigativos y permitan su uso de manera comercial. Estas ventajas son características básicas del gas natural y ciertos derivados de la biomasa, los cuales poseen bajos costos y emisiones y de igual forma un alto nivel de desarrollo tecnológico, siendo estas fuentes las ideales para el proceso de transición hacia las fuentes renovables y alternativas.

Aunque algunos procesos biomásicos poseen un alto nivel de desarrollo, existen muchos que aún no cuentan con un avance tecnológico significativo que facilite su introducción en el mercado de las energías. La investigación en la optimización de los procesos productivos y la generación de energía de la biomasa debe ser una prioridad en países con altos niveles de productividad de materia orgánica como Colombia, donde gran parte de la canasta energética nacional puede llegar a ser suplida por las bioenergías como es el caso de los biocombustibles y la demanda eléctrica en zonas no interconectadas. Estos procesos productivos requieren así mismo de la capacitación del personal y de la población, por lo tanto, la introducción

masiva de energías biomásicas genera capacitación y mejora de la calidad de vida en la población. Igualmente, la aplicación de nuevas tecnologías o de tecnologías optimizadas a la biomasa como fuente de energía permite sacar el mejor provecho de sus beneficios para el desarrollo energético y social.

La energía nuclear genera grandes ventajas en el desarrollo económico y social de los países que han apostado por ella. Pero el riesgo ambiental asociado a la misma genera grandes preocupaciones a nivel mundial. Esta fuente de energía permite producir grandes cantidades de electricidad con un bajo volumen de combustible, pero sus desechos radioactivos no poseen un tratamiento efectivo que garantice la seguridad de su manejo y almacenamiento. Los riesgos a los que se ven expuestas las poblaciones donde se encuentran estos emplazamientos son altos, dado que estas estructuras de generación de energía poseen una alta sensibilidad a múltiples fenómenos ambientales y al factor humano que pueden ocasionar catástrofes de magnitudes incalculables y de inmensa afectación, presentando problemáticas mayores a las generadas por los combustibles fósiles. Por tanto, aunque la madurez de la energía nuclear por fisión es alta, no lo es el manejo de sus residuos ni la mitigación de sus impactos. Es necesario entonces la mejora de tecnologías que reduzcan la radiactividad de los desechos nucleares y permiten la máxima mitigación de los posibles impactos sin que esta fuente de energía deje de ser económicamente viable. Igualmente, el desarrollo de las energías por fusión nuclear, presentan ventajas en estos aspectos, aunque la madurez de sus tecnologías no es la pertinente. La utilización de la energía nuclear en países con historial de conflictos armados como Colombia es un riesgo latente, dado la inestabilidad social y el riesgo de los residuos nucleares situaciones que ligadas se deben evitar.

En relación a la comparación ambiental de las diversas fuentes de energía estudiadas se puede encontrar que:

La comparación del impacto ambiental a través del ciclo de vida exhibe las grandes ventajas que representa la biomasa como fuente de energía. El análisis de las emisiones de la energía nuclear la presenta como la segunda mejor fuente de energía, pero sus emisiones no son lo único a tener en cuenta. El gas natural, aunque es el más limpio de los combustibles fósiles, no lo es en comparación con las fuentes alternativas de energía.

La matriz EPM permite la evaluación ambiental completa de los procesos incluyendo múltiples variables adicionales a las emisiones de gases efecto invernadero, obteniéndose una visión holística de la producción de energía a través de cada energético. Esta ventaja posibilita la comparación de aspectos altamente relevantes y obviados en el análisis de ciclo de vida como la radiactividad de los desechos

nucleares, el desgaste de los suelos por monocultivos y la afectación a la biota por la extracción de gas natural.

Finalmente, en relación a la selección de los sistemas energéticos se puede concluir que la producción de energía como cualquier actividad antrópica genera múltiples emisiones que deben ser analizadas y mitigadas, pero que así mismo posibilita el desarrollo económico y social de las poblaciones. La necesidad de las energías renovables es evidente, por tanto, la generación de bioenergías debe hacer parte de las matrices energéticas mundiales y particularmente de países con grandes aportes de materia orgánica como Colombia, pero para ello es pertinente el desarrollo de múltiples tecnologías que permitan la producción masiva de esta fuente de energía. El gas natural es un recurso escaso en el país, su aporte se ha visto reducido en los últimos años, por lo cual el uso del mismo no se debe plantear como permanente y duradero, puesto que no resulta técnicamente viable una alta participación de este en la canasta energética nacional, lo cual ratifica la premisa de que el mismo deber servir como puente entre las energías fósiles actuales y las renovables del futuro. Una fuente alternativa de energía no es equivalente a una fuente renovable de energía, situación evidenciable en la energía nuclear. Esta último energético ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial, pero no brinda grandes ventajas en materia ambiental, más aún los riesgos asociados a este resultan mayores a los de cualquiera de los energéticos fósiles, lo cual lo desvirtúa como una fuente energética ambiental, social y económicamente admisible. Es recomendable ampliar la visión de esta investigación a través de estudio futuros que analicen a mayor profundidad los impactos ambientales de la producción de energía y se enfoquen en identificar impactos puntuales en la producción de energía nacional, así como en la obtención de ciclos de vida basados en las condiciones específicas de la topografía, producción, condiciones climáticas, entre otros, de la matriz energética colombiana.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi , S. A., & Abbasi, N. (2000). The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied Energy*, 65, 121-144.
- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 919-937. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002688>
- Agencia Andaluza de la Energía. (s.f.). *Biocarburantes*. (Agencia Andaluza de la Energía) Recuperado el 28 de 05 de 2016, de <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/ciudadania/biocarburantes>
- Agencia de noticias de la U. Nacional. (28 de 09 de 2014). *Experto advierte sobre rezago en energía nuclear en el país*. (El Espectador) Recuperado el 14 de 06 de 2015, de <http://www.elespectador.com/noticias/nacional/experto-advierte-sobre-rezago-energia-nuclear-el-pais-articulo-519396>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (31 de 12 de 2015). *Información de Reservas*. Recuperado el 06 de 07 de 2016, de <http://www.anh.gov.co/la-anh/Documents/Hist%c3%b3rico%20de%20Reservas%202015.pdf>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (05 de 07 de 2016). *Estadísticas de Producción*. Obtenido de Producción Mensual de Gas en Colombia: <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>
- Agencia Nacional Minera. (27 de 05 de 2015). *Uranio*. Recuperado el 18 de 08 de 2015, de <http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/uranio.pdf>
- Agrowaste. (s.f.). *Fermentación Alcohólica - Bioetanol*. Recuperado el 28 de 04 de 2015, de <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/FERMENTACION-ALCOHOLICA.pdf>
- Aguilar Samanamud, C. P. (2010). Importancia de las microalgas en la obtención de Biocombustibles. *Tecnología y Biocombustibles de segunda generación: Una herramienta para la toma de decisiones*, (págs. 37-45). Montevideo.
- Anifowose, B., & Odubela, M. (2015). Methane emissions from oil and gas transport facilities - exploring innovative ways to mitigate environmental consequences. *Journal of Cleaner Production*, 92, 121-133.
- Aprobación del Acuerdo de París, Proyecto de decisión -/CP.21 (Naciones Unidas 12 de 12 de 2015).
- Arboleda G., J. A. (2008). *Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades*. Medellín: Arboleda G., Jorge A.

- Arciniégas Suárez, C. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10. *Luna Azul*, 195-213.
- BAA. (s.f.). *What is Biogas?* (Biofuels Association of Australia) Recuperado el 19 de 04 de 2015, de <http://www.biofuelsassociation.com.au/what-is-biogas>
- BBC. (07 de 11 de 2014). *Japón: gobernador aprueba reactivación de planta nuclear.* (BBC) Recuperado el 11 de 06 de 2015, de http://www.bbc.com/mundo/ultimas_noticias/2014/11/141107_ultnot_japon_planta_nuclear_reactivacion_wbm.shtml
- Blanco Ybáñez, A. J., & Vivas Hohl, J. (2014). Introducción al Tight Gas. *Petrotecnía*, 14-24.
- Bonilla, A., Rosales, R., & Maldonado, J. (2003). El valor económico de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el sector azucarero colombiano. *Desarrollo y Sociedad*, 1-38.
- Bosire, C. K., Ogutu, J. O., Said, M. Y., Krol, M. S., de Leeuw, J., & Hoekstra, A. Y. (2015). Trends and spatial variation in water and land footprints of meat and milk production systems in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 36-47.
- Boston University: Arts & Science Magazine. (20 de 11 de 2012). *Study Details Natural Gas Leaks in Boston.* (BU) Recuperado el 31 de 10 de 2015, de <http://www.bu.edu/cas/2012/11/20/thousands-of-natural-gas-leaks-discovered-in-boston/>
- BP. (s.f.). *¿Qué son los biocombustibles?* (BP) Recuperado el 20 de 04 de 2015, de http://www.bp.com/es_es/spain/medio-ambiente-y-sociedad/biocombustibles/que-son-los-biocombustibles.html
- BP. (2016). *BP Energy Outlook 2016 edition.* Londres: BP.
- Burk, I., Galvez y Fuentes, A., Laín Entralgo, P., Masui, J., Mayz Vallenilla, E., Prevosti, A., . . . Teixidor, E. (1974). Radiactividad natural. En *Los átomos* (págs. 57-59). Barcelona: Salvat Editores.
- Burnie, S. (2015). *La crisis nuclear de Fukushima Daiichi, Cuarto año: Informe sobre la situación actual.* Greenpeace.
- cambioclimaticoglobal.com. (s.f.). *Dióxido de Carbono (CO2).* Obtenido de cambioclimaticoglobal.com: <http://cambioclimaticoglobal.com/dioxido>
- Castells, X. E. (2005). El biogás. En *Tratamiento y valorización energética de residuos* (págs. 143-145). España: Díaz de Santos; Fundación Universitaria Iberoamericana.
- Cerdá, E. (Junio de 2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de Iice(83)*, 117-140. Obtenido de http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_117-140__78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (16 de 09 de 2016). *Gas Natural: Historia en Colombia.* Obtenido de Comisión de Regulación de Energía y Gas: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/gas-natural/historia-gas>
- Concentra . (2011). *Informe Anual 2011.* Bogotá: Concentra - Inteligencia en Energía.

- Conservación y Carbono. (s.f.). *Análisis del Ciclo de Vida ISO 14040*. (Conservación y Carbono S.A.S.) Recuperado el 15 de 08 de 2015, de <http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040>
- Consorcio energético CORPOEMA para la Unidad de Planeación Minero Energética. (2010). *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía .
- dangersoffracking.com. (s.f.). *Heavy Load*. (<http://www.dangersoffracking.com/>) Recuperado el 24 de 04 de 2016, de <http://www.dangersoffracking.com/>
- Davis, W. R. (2000). *Air Pollution Engineering Manual, 2nd Edition*. Knoxville: Air & Waste Management Association.
- del Granado Cosío, H. (20 de 03 de 2015). *Energía nuclear en Bolivia*. (Página Siete) Recuperado el 15 de 06 de 2015, de <http://www.paginasiete.bo/opinion/2015/3/20/energia-nuclear-bolivia-50581.html>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219-230.
- Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50, 1746-1760.
- Deuse/CP, K. (18 de 02 de 2014). *Desmontaje de centrales nucleares: un negocio caro*. (DW) Recuperado el 13 de 06 de 2015, de <http://www.dw.de/desmontaje-de-centrales-nucleares-un-negocio-car/a-17440874>
- DW. (06 de 06 de 2011). *El abandono "sostenible" de la energía nuclear en Alemania: ¿posible hasta 2022?* (DW) Recuperado el 09 de 06 de 2015, de <http://www.dw.de/el-abandono-sostenible-de-la-energ%C3%ADa-nuclear-en-alemania-posible-hasta-2022/a-15135218>
- Echenique Mestre , K. (2015). *MARCO LEGAL Y PROTECCIÓN AMBIENTAL EN LAS ETAPAS DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LA ACTIVIDAD PETROLERA EN CUBA*. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía.
- ECODES. (01 de 04 de 2005). *Efectos ambientales del mercurio*. Obtenido de ECODES: <http://ecodes.org/noticias/efectos-ambientales-del-mercurio#.V4Loll-cH4h>
- Ecopetrol. (22 de 09 de 2014). *Gasoductos y campos de gas natural en Colombia*. (Ecopetrol) Recuperado el 05 de 07 de 2016, de http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%C3%B3n%20General/gasoductos-y-campos-de-gas-natural-en-colombia!/ut/p/z0/04_Sj9CPyKssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g4K8fM30C7ld
- Efigas S.A.E.S.P. (22 de 06 de 2015). *RESERVAS DE GAS NATURAL EN COLOMBIA* . (Efigas S.A.E.S.P) Recuperado el 06 de 07 de 2016, de

- http://www.efigas.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=1736:naturgas-comunicado-&catid=7:noticias
- Eisentraut, A., & Brown, A. (2014). *HEATING WITHOUT GLOBAL WARMING: Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat*. Paris: International Energy Agency.
- El Universo. (25 de 03 de 2015). *Japón ha gastado más de \$ 4.900 millones para desmantelar Fukushima*. (El Universo) Recuperado el 09 de 06 de 2015, de <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/03/25/nota/4701256/japon-ha-gastado-casi-4500-millones-euros-desmantelar-fukushima>
- Energy Information Administration. (12 de 01 de 2016). *Natural Gas and the Environment*. Obtenido de Natural Gas Explained: http://www.eia.gov/energyexplained/?page=natural_gas_environment
- ENRESA. (s.f.). *Almacenamiento Geologico Profundo de Residuos Radiactivos de ALta Actividad (AGP)*. Enresa.
- EPEC. (s.f.). *Energía renovable: La Biomasa*. Recuperado el 26 de 04 de 2015, de <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>
- EurObserv'ER. (2014). *Solid biomass barometer*. Union Europea: EurObserv'ER. Obtenido de http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro225_en.pdf
- European Commission. (1999). *ExternE - Externalities of Energy*. Luxemburgo: European Commission.
- European Nuclear Society. (s.f.). *Nuclear power plants, world-wide*. (ENS) Recuperado el 15 de 07 de 2015, de <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>
- eurostat. (s.f.). *Energy from biomass*. Obtenido de Environmental Data Centre on Natural Resources: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environmental-data-centre-on-natural-resources/natural-resources/energy-resources/energy-from-biomass>
- FADA. (2013). *Desarrollo regional con energía a partir de BIOMASA*. Río Cuarto: Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina.
- Farmacosalud.com. (30 de 01 de 2015). *Carboxihemoglobina (COHb): un peligroso intruso al que se puede evitar*. Obtenido de Farmacosalud.com: <http://farmacosalud.com/carboxihemoglobina-cohb-un-peligroso-intruso-al-que-se-puede-evitar/>
- Fernández, J. (s.f.). *Energías renovables para todos: Biomasa*. Madrid: Energy Management Agency: Intellegent Energy Europe.
- Field, C. B., Campbell, J. E., & Lobell, D. B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Cell Press*, 23, 65-72.
- Fthenakis, V., & Chul Kim, H. (2010). Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2039-2048.
- Fundación Descubre. (s.f.). *De Biomasa o Bioenergía - Descubre la Energía*. (Fundación Descubre) Recuperado el 25 de 04 de 2015, de <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/las-fuentes/de-biomasa/>

- Galvis Martínez, J. F., & Serrano Gúzman, M. F. (2015). Energía nuclear: impactos y actualidad.
- Galvis Martínez, J. F., & Serrano Guzman, M. F. (2015). *Uranio en Colombia*. Bucaramanga: Semillero Prospectiva Energética.
- García, R., Pizarro, C., Álvarez, A., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2015). Study of biomass combustion wastes. *Fuel*, 148, 152-159. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0016236115000939#>
- gasNatural. (2008). *Informe anual 2008*. Bogotá: Zona Ltda.
- Gerben -Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Van der Meer, T. (2009). The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, 68, 1052-1060.
- Giaimo, S. (03 de 11 de 2009). *Presente y futuro del gas natural en Colombia*. Obtenido de Foro el espectador: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosEventos/5474.pdf>
- Global Energy Statistical. (2016). *Natural gas production*. (Enerdata) Recuperado el 05 de 07 de 2016, de <https://yearbook.enerdata.net/world-natural-gas-production.html>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa - Cuesco de Palma*. Kassel.
- Goodman, P. S., Galatioto, F., Thorpe, N., Namdeo, A. K., Davies, R. J., & Bird, R. N. (2016). Investigating the traffic-related environmental impacts of hydraulic-fracturing (fracking) operations. *Environment International*, 248-260.
- Hadian, S., & Madani, K. (Mayo de 2015). A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? *Ecological Indicators*, 52, 194-206.
- Hall, D. O., & Scrase, J. I. (1998). Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future. *Biomass and Bioenergy*, 357-367.
- Harvitt, D. (19 de 03 de 2013). *Is Natural Gas Toxic in Water?* Obtenido de Environmental Working Group's: <http://www.ewg.org/enviroblog/2013/03/natural-gas-toxic-water>
- Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72-95. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0360128514000495>
- Heller, J. L. (09 de 10 de 2015). *Mercurio*. Obtenido de MedlinePlus: <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/002476.htm>
- IAEA. (20 de 07 de 2015). *Nuclear Share of Electricity Generation in 2014*. (IAEA) Recuperado el 20 de 07 de 2015, de <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>
- IAEA. (20 de 07 de 2015). *Trend in Electricity Supplied: Sum of electricity supplied from reactors connected to the grid*. (Power Reactor Information System) Recuperado el 20 de 07 de 2015, de

- <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx>
- IAEA. (20 de 07 de 2015). *Under Construction Reactors: By Type*. (PRIS) Recuperado el 20 de 07 de 2015, de <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx>
- IEA. (2013). *Renewable Energy Medium-Term Market Report 2013: Market Trends and Projections to 2018*. International Energy Agency.
- IEA. (20 de 04 de 2015). *Bioenergy*. Obtenido de International Energy Agency: <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/>
- intellectualventures. (16 de 09 de 2013). *Sustainable and Economical – The Magic Equation*. (intellectualventures) Recuperado el 10 de 12 de 2015, de <http://www.intellectualventures.com/insights/archives/sustainable-and-economical-the-magic-equation>
- International Energy Agency . (20 de 04 de 2011). *Biofuels can provide up to 27% of world transportation fuel by 2050, IEA report says - IEA 'roadmap' shows how biofuel production can be expanded in a sustainable way, and identifies needed technologies and policy actions*. Obtenido de International Energy Agency : <https://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2011/april/biofuels-can-provide-up-to-27-of-world-transportation-fuel-by-2050-iea-report-.html>
- International Energy Agency. (s.f.). *Natural gas*. (IEA) Recuperado el 05 de 07 de 2016, de <https://www.iea.org/aboutus/faqs/naturalgas/>
- Jäger-Waldau, A., & Ossenbrink, H. (2004). Progress of electricity from biomass, wind and photovoltaics in the European Union. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 8, 157-182.
- Jaramillo Espinosa, F. (2001). *Bases para la investigación de la contaminación atmosférica en el valle de Sogamoso: El caso del material particulado generado en la fabricación artesanal de ladrillo y cal*. Bogotá: École Polytechnique Fédérale de Lausanne - Universidad de los Andes.
- Karekezi, S., Lata, K., & Coelho, S. T. (Jan de 2004). Traditional biomass energy-improving its use. *International Conference for Renewable Energies*. Bonn. Recuperado el 12 de May de 2015
- Kozulj, R. (2004). *La industria del gas natural en América del Sur: situación y posibilidades de la integración de mercados*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Kuchment, A. (28 de 03 de 2016). *Drilling for earthquakes*. Obtenido de Scientific American: <http://www.scientificamerican.com/article/drilling-for-earthquakes/>
- La actualidad de Alemania. (s.f.). *Abandono de la energía nuclear*. (La actualida de Alemania) Recuperado el 10 de 06 de 2015, de <http://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/es/medio-ambiente-clima-energia/startseite-klima/abandono-de-la-energia-nuclear.html>
- La Vanguardia. (2014). *El gas es la energía puente entre el combustible fósil y un futuro más renovable*. Recuperado el 20 de Febrero de 2015, de <http://www.lavanguardia.com/economia/20140210/54401006585/el-gas-energia-puente-entre-combustible-fosil-y-un-futuro-mas-renovable.html>

- LIPPEL. (s.f.). *Briquetas de biomasa y carbón*. Recuperado el 25 de 10 de 2015, de <http://www.lippel.com.br/es/sustentabilidade/briquetes-de-biomassa-e-carvao#.VjLh9DZdERY>
- Lobato, V. (2010). Sustentabilidad y certificación de biocombustibles de segunda generación. *Tecnología y biocombustibles de segunda generación: Una herramienta para la toma de decisiones*. Montevideo: UNESCO.
- López, E., Montes, E., Garavito, A., & Collazos, M. M. (2012). La economía petrolera en Colombia (Parte I). *Borradores de Economía*(692), 1-102.
- Lustgarten, A. (17 de 11 de 2008). *Drill for Natural Gas, Pollute Water*. Obtenido de Scientific American: <http://www.scientificamerican.com/article/drill-for-natural-gas-pollute-water/>
- Masarik, G. (2014). Tight el no convencional de bajo perfil. *Petrotecnía*, 10-13.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37-46. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>
- Ministerio de Medio Ambiente de Chile. (s.f.). *¿Cómo se origina y qué daños causa el Monóxido de Carbono?* Obtenido de Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes: <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43796.html>
- Ministerio de Medio Ambiente de Chile. (s.f.). *¿Qué daño causa el Dióxido de Azufre al ser humano y al medio ambiente?* . Obtenido de Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes: <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43789.html>
- Monteiro Machado, C. M. (2010). *Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe*. Organización Latinoamericana de Energía.
- Moragues, J. A., & Rapallini, A. T. (s.f.). *Energía de la Biomasa*. Recuperado el 30 de 04 de 2015, de http://www.iae.org.ar/renovables/ren_biomasa.pdf
- NaturGas. (20 de 09 de 2013). *Natural Gas and the Environment*. Obtenido de NaturGas.org: <http://naturalgas.org/environment/naturalgas/>
- Navarro Quevedo, J. M. (2011). *ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE BIOCMBUSTIBLES DE CUARTA GENERACIÓN*. Madrid: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI) .
- Nemerow, N. L., & Dasgupta, A. (1998). Digestión Anaerobia y Aerobia. En *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos* (págs. 195-197). Van Nostrand Reinhold; Díaz de Santos.
- noetmengiselmon. (s.f.). *AGROCARBURANTES DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN* . Europa: noetmengiselmon.
- Nogués, F. S., & Royo Herrer, J. (2002). *Ciclo de Energías Renovables, Jornada de Biomasa*. Fundación CIRCE. Obtenido de http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random4991a1ff1b986/1234281334_Gralidades_biomasa.pdf
- Nuclear Energy Institute. (07 de 2015). *World Statistics: Nuclear Energy Around the World*. (NEI) Recuperado el 20 de 07 de 2015, de <http://www.nei.org/Knowledge-Center/Nuclear-Statistics/World-Statistics>

- Onar, O. C., & Khaligh, A. (2015). Chapter 2 – Energy Sources. En N. Abdullah, B. Blunier, J. M. Carrasco, P. A. Cassani, L. E. Chaar, H. Dehbonei, . . . S. S. Williamson, *Alternative Energy in Power Electronics* (págs. 81-154). Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Paradela, F., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., & Lapa, N. (2009). Study of the co-pyrolysis of biomass and plastic wastes. *Clean Technologies & Environmental Policy*, *11*, 115-122.
- Paredes Díaz, J. (2013). *IMPORTANCIA DEL AGUA*. (USMP) Recuperado el 22 de 04 de 2016, de http://www.usmp.edu.pe/publicaciones/boletin/fia/info86/articulos/importanciaAgua.html?TB_iframe=true
- Parihar, M. F., Kamil, M., Goyal, H. B., Gupta, A. K., & Bhatnagar, A. K. (2007). An Experimental Study on Pyrolysis of Biomass. *Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B*, *85*, 458-465. Obtenido de <http://eds.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=e62e8f0d-8e7f-4c45-9e90-4f7bc5ed0019%40sessionmgr4005&vid=6&hid=4113>
- Park, E., & Ohm, J. J. (2014). Factors influencing the public intention to use renewable energy technologies in South Korea: Effects of the Fukushima nuclear accident. *Energy Policy*, *65*, 198-211.
- PDVS. (s.f.). *Como se precesa el gas natural*. (PDVSA) Recuperado el 28 de 10 de 2015, de http://www.pdvsa.com/PESP/Pages_pespectostecnicos/gasnatural/como seprocesa.html
- Pérez Bayer, J. F., & Osorio Vélez, L. F. (2014). *Biomasa forestal como alternativa energética*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Perez, A. (16 de 02 de 2012). *Características del Gas Natural*. Recuperado el 28 de 10 de 2015, de <https://gnvblog.wordpress.com/2012/02/16/caracteristicas-del-gas-natural/>
- Porcel, R. (20 de 07 de 2015). *Cuarta generación: La milla verde*. (NAUKAS) Recuperado el 20 de 05 de 2016, de <http://naukas.com/2015/07/20/cuarta-generacion-la-milla-verde/>
- Programa Mundial de Alimentos. (s.f.). *Datos del hambre*. (WFP) Recuperado el 15 de May de 2015, de <https://es.wfp.org/hambre/datos-del-hambre>
- Promigas. (2014). *Informe del Sector Gas Natural 2014*. Barranquilla: Promigas.
- Pryshlakivsky, J., & Searcy, C. (2013). Fifteen years of ISO 14040: a review. *Cleaner Production*, 115-123.
- Raj, R., Ghandehariun, S., Kumar, A., & Linwei, M. (2016). A well-to-wire life cycle assessment of Canadian shale gas for electricity generation in china. *Energy*, 642-652.
- Rashad, S. M., & Hammad, F. H. (2000). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generation systems. *Applied Energy*, *65*, 211-229.
- Resolución 032 de 2001, 032 (Comisión de Regulación de Energía y Gas 28 de 02 de 2001).

- Resolución No. 001 CREG (2000).
- Rieznik Lamana, N., & Hernández Aja, A. (Julio de 2005). *Análisis del ciclo de vida*. Recuperado el 16 de 08 de 2015, de <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida>
- Royo, J., Sebastián, F., García-Galindo, D., Gómez, M., & Díaz, M. (2012). Large-scale analysis of GHG (greenhouse gas) reduction by means of biomass co-firing at country-scale: Application to the Spanish case. *Energy*, *48*, 255-267.
- Saavedra, A. (Buenos Aires). CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR: CONTROLES REGULATORIOS. Autoridad Regulatoria Nuclear - Presidencia de la Nación Argentina.
- Sahu, S. G., Chakraborty, N., & Sarkar, P. (2014). Coal–biomass co-combustion: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 575-586.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 2262-2289. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000578>
- Salbu, B., Lind, O. C., & Skipperud, L. (2004). Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments. *Journal of Environmental Radioactivity*, *74*, 233-242.
- Sanchez-Cabeza, J. A., & Molero, J. (2000). Plutonium, americium and radiocaesium in the marine environment close to the Vandellós I nuclear power plant before decommissioning. *Journal of Environmental Radioactivity*, *51*, 211-228.
- Sández Arana, J. D. (2014). *LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN LA UNIÓN EUROPEA: ESTADO DE LA CUESTIÓN*. Madrid: Instituto Español de Estudios Estratégicos.
- Savacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, *36*, 2940-2953.
- Savacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Police*(36), 2940-2953.
- Sebastián, F., Royo, J., & Gómez, M. (2011). Cofiring versus biomass-fired power plants: GHG (Greenhouse Gases) emissions saving comparison by means of LCA (Life Cycle Assessment) methodology. *Energy*, 2029-2037.
- Secretaría de Energía. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa*. Buenos Aires: Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera Secretaría de Energía.
- Secretaria de medio ambiente. (2012). *IMPACTO AMBIENTAL DEL SISTEMA DE FRACTURACIÓN HIDRÁULICA PARA LA EXTRACCION DE GAS NO CONVENCIONAL*. Madrid: Confederación sindical de comisiones obreras.
- Segura, C. (s.f.). *Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión*. Recuperado el 18 de 10 de 2015, de http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266_PresentacionPellets.pdf
- ShaleTEC. (s.f.). *What is shale gas and why is it important?* Obtenido de Shale training & Education Center: <http://www.shaletec.org/whatis.htm>

- Shell. (s.f.). *LNG for transport - Shell Global*. (Shell) Recuperado el 29 de 10 de 2015, de <http://www.shell.com/global/future-energy/natural-gas/natural-gas-transport.html>
- Siles López, D. A. (s.f.). *LA PROBLEMÁTICA DEL DESMANTELAMIENTO DE LAS CENTRALES NUCLEARES*. Valencia: Comité Econòmic i Social de la Comunitat Valenciana .
- SIMEC. (s.f.). *Demanda de Gas Natural*. (Sistema de Información de Petroleo y Gas Colombiano) Recuperado el 05 de 07 de 2016, de <http://www.sipg.gov.co/Inicio/GasNatural/Estadisticas/Demanda/tabid/122/language/es-CO/Default.aspx>
- Sims, R. E., & Bassam, N. E. (2004). Chapter 1 – Biomass and Resources. En R. E. Sims, *Bioenergy Options for a Cleaner Environment* (págs. 1-28). Palmerston North: Elseiver.
- Singh, S., & Bakshi, B. (Junio de 2015). Footprints of carbon and nitrogen: Revisiting the paradigm and exploring their nexus for decision making. *Ecological Indicators*, 53, 1-296.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia. (s.f.). *Óxidos de Nitrógeno*. Obtenido de Sistema de Información Ambiental de Colombia: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=585&conID=620>
- Sistema de Información de Petroleo y Gas Colombiano. (s.f.). *Principales Indicadores de Hidrocarburos, Gas Natural y Biocombustibles*. Obtenido de Principales Cifras : <http://www.sipg.gov.co/sipg/Home/SectorHidrocarburos/PrincipalesCifras/tabid/65/language/es-ES/Default.aspx>
- Skone, T. J., Littlefield, J., Marriott, J., Cooney, G., Jamieson, M., Hakian, J., & Schivley, G. (2014). *Life Cycle Analysis of Natural Gas Extraction and Power Generation*. Washington D.C.: National Energy Technology Laboratory - Office of Fossil Energy.
- Solanes, I., Codina, E., & Casan, P. (1999). Carboxihemoglobina y anemia hemolítica. *Medicina Clínica*, 678-679.
- Song, W., Yao, J., Li, Y., Sun, H., Zhang, L., Yang, Y., . . . Sui, H. (2016). Apparent gas permeability in an organic-rich shale reservoir. *Fuel*, 9713-984.
- Styles, D., & Jones, M. (2007). Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reduction of energy-crop electricity. *Biomass and Bioenergy*, 759-772.
- Subdirección de Energía Eléctrica Grupos de Generación, Transmisión y Convocatorias . (2015). *PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN – TRANSMISIÓN 2015– 2029* . Bogota: UPME.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2011). *Tecnologías para una movilidad en beneficio del medio ambiente. Biocombustibles: Biodiesel de Segunda y Tercera Generación*. Bogotá: Superintendencia de Industria y Comercio.
- The World Bank - World Development Indicators. (24 de 09 de 2016). *Breakdown of Electricity Generation by Energy Source*. Obtenido de The Shift Project Data Portal - Browse Energy and Climate Data: [107](http://www.tsp-data-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart
- The World Bank. (2012). *Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR): Improving Energy Efficiency & Mitigating Impact on Climate Change*. GGFR.
- Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and sustainable energy reviews*, 555-565.
- Twenergy Endesa. (13 de Marzo de 2014). *LA BIOMASA EN COLOMBIA: EL GRAN RETO PARA GENERAR ENERGÍA SUSTENTABLE*. (Endesa) Recuperado el 20 de Mayo de 2015, de <http://twenergy.com/a/la-biomasa-en-colombia-el-gran-reto-para-generar-energia-sustentable-1140>
- U.S. Department of Energy. (01 de 11 de 2015). *Gas Natural*. Recuperado el 01 de 11 de 2015, de <https://www.fueleconomy.gov/feg/esbifueltech.shtml>
- U3O8 CORP. (s.f.). *Potential to be one of the lowest cost uranium producers*. (U3O8) Recuperado el 22 de 08 de 2015, de <http://www.u3o8corp.com/main3.aspx?id=110>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). *Balance de Gas Natural en Colombia 2016-2025*. Bogotá: UPME.
- Unidad de Planeación Minero Energética . (2012). *Proyección de demanda de energía eléctrica y potencia máxima*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética .
- Unidad de Planeación Minero energética. (2000). *Plan de Expansión de Referencia 2000*. Bogotá: Digitos & Diseños .
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Balance de Gas Natural en Colombia 2015-2024*. Bogotá: UPME.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). *PROYECCIÓN DE GAS NATURAL EN COLOMBIA 2016 - 2030*. Bogotá: UPME.
- Union of Concerned Scientists: Science for a healthy and safer world. (s.f.). *Environmental Impacts of Natural Gas*. (UCS) Recuperado el 31 de 10 de 2015, de http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/coal-and-other-fossil-fuels/environmental-impacts-of-natural-gas.html#.VjbhUtlvfUJ
- Union of Concerned Scientists: Science for a healthy planet and safer world. (s.f.). *Natural Gas Flaring, Processing, and Transportation*. (UCS) Recuperado el 30 de 10 de 2015, de http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/coal-and-other-fossil-fuels/natural-gas-flaring-processing-transportation.html#.VjbPzNlvfUI
- United Nations Industrial Development Organization. (2011). *UNIDO Green Industry: Policies for supporting Green Industry*. Vienna: UNIDO.
- UPME. (2015). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/plan-energetico-nacional-colombia-ideario-energetico-2050>
- UPME; IDEAM; Colciencias; UIS. (2011). *Atlas del Potencial Energetico de la Biomasa Residual en Colombia*. Bucaramanga: UIS.

- Vásquez Medina, L. (30 de 06 de 2006). *Energía nuclear para Bolivia*. Recuperado el 15 de 06 de 2015, de http://www.21stcenturysciencetech.com/reir/nuclear_bolivia.pdf
- Verbruggen, A., Laes, E., & Lemmens, S. (2014). Assessment of the actual sustainability of nuclear fission power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 16-28.
- White, H. E. (2007). Fisión y Fusión. En *Física Moderna Vol. II* (págs. 1098-1113). México: Limusa.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. En C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological Economics Research Trends* (págs. 1-11). Hauppauge, New York, Estados Unidos de Norteamérica: Nova Science Publishers.
- World Nuclear Association. (06 de 2015). *Supply of Uranium*. (WNA) Recuperado el 18 de 07 de 2015, de <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium/>
- World Nuclear Association. (01 de 06 de 2015). *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements*. (WNA) Recuperado el 15 de 07 de 2015, de <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>
- World Nuclear Transport Institute. (s.f.). *Transporte del Ciclo de Combustible Nuclear - Materiales de la Fase Inicial*. London: WNTI. Recuperado el 15 de 11 de 2015, de [/jrem0000/dpbg/2bch-ctma/tema11/obtencion-uranio.swf](http://www.wnti.org/jrem0000/dpbg/2bch-ctma/tema11/obtencion-uranio.swf)
- Zissu, A. (27 de 01 de 2016). *How to Tackle Fracking in Your Community*. Obtenido de Natural Resources Defense Council 2016 | : <https://www.nrdc.org/stories/how-tackle-fracking-your-community>

ANEXOS

TABLA DE ANEXOS

ANEXO I Matriz EPM o Arboleda – Gas Natural.....	111
ANEXO II Matriz EPM o Arboleda – Biomasa.....	119
ANEXO III Matriz EPM o Arboleda – Energía Nuclear.....	130

ANEXO I Matriz EPM o Arboleda – Gas Natural

Matriz EPM para El Gas Natural

<i>Etapa</i>	<i>Sub-etapa</i>	<i>Impacto</i>	<i>Efecto</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	<i>Ca</i>	<i>Impacto Ambiental</i>
Ciclo Inicial del combustible	Exploración y extracción	Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.9	0.9	1.0	0.8	1.0	6.9	Significativo
			Generación de material particulado	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	7.0	Significativo
			Contaminación zonal del aire	1.0	0.9	0.9	0.9	0.6	5.5	Significativo
			Perdida de la calidad del aire	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	5.0	Significativo
		Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	7.0	Significativo
			Contaminación de fuentes hídricas subterráneas	1.0	0.8	0.9	0.9	1.0	7.2	Significativo
			Contaminación de fuentes hídricas por derrames	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.4	Muy significativo
			Dispersión de contaminantes en agua	1.0	0.8	1.0	0.9	1.0	7.8	Muy significativo
			Perdida de fuentes hídricas	1.0	0.7	0.8	1.0	1.0	5.4	Significativo
			Perdida de la calidad del agua	1.0	0.7	0.8	1.0	1.0	5.8	Significativo
		Suelo	Contaminación de suelos por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	0.6	5.6	Significativo
			Generación de desechos químicos	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	6.5	Significativo
			Perdida de cobertura natural	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	5.2	Significativo

Ecosistema	Erosión de los suelos	1.0	0.8	0.5	1.0	0.8	4.3	Moderado
	Deforestación	1.0	0.6	0.8	1.0	0.7	3.7	Moderado
	Perdida de fauna	1.0	0.8	0.9	0.7	0.7	4.6	Moderado
	Perdida de flora	1.0	0.8	0.8	1.0	0.7	5.1	Significativo
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.8	0.8	1.0	0.7	4.5	Moderado
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	4.6	Moderado
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.7	0.9	0.9	0.8	5.2	Significativo
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural	1.0	0.9	0.9	1.0	0.7	6.0	Significativo
	Contaminación visual	1.0	0.8	1.0	1.0	0.7	5.5	Significativo
	Contaminación por ruido	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	5.4	Significativo
	Presencia de nuevos emplazamientos	0.9	0.9	1.0	1.0	0.7	6.1	Significativo
	Construcción de vías	0.9	0.8	0.9	1.0	0.7	4.9	Moderado
Sociales	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	7.3	Significativo
	Obstaculización de vías	1.0	0.5	0.9	1.0	0.7	3.6	Moderado
	Generación de empleo	1.0	0.7	0.6	1.0	0.7	3.6	Moderado
	Accidentalidad laboral	1.0	0.7	0.7	1.0	0.7	4.4	Moderado
	Desarrollo social	1.0	0.6	0.8	1.0	1.0	4.1	Moderado
	Crecimiento económico	1.0	0.8	0.5	1.0	1.0	4.8	Moderado
	Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	0.5	0.6	0.9	0.7	2.0	Poco significativo
	Afectación a la salud de la población	1.0	0.6	0.6	1.0	0.7	3.3	Moderado
	Cambio de actividad económica de la población	0.9	0.9	0.9	1.0	0.7	5.4	Significativo
IMPACTO NETO							181.91	

Procesamiento	Aire	Generación de gases efecto invernadero	1.0	0.8	1.0	0.7	1.0	6.2	Significativo
		Generación de material particulado	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	6.8	Significativo
		Contaminación zonal del aire	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	7.0	Significativo
		Perdida de la calidad del aire	0.9	0.7	0.4	0.8	0.8	3.1	Moderado
	Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.8	0.8	0.9	0.9	5.6	Significativo
		Contaminación de fuentes hídricas subterráneas	1.0	0.7	0.8	0.9	1.0	5.4	Significativo
		Contaminación de fuentes hídricas por derrames	1.0	0.7	0.9	0.9	1.0	5.8	Significativo
		Dispersión de contaminantes en agua	1.0	0.7	0.9	0.9	1.0	6.1	Significativo
		Perdida de fuentes hídricas	0.9	0.6	0.6	1.0	1.0	3.2	Moderado
		Perdida de la calidad del agua	0.9	0.5	0.6	1.0	1.0	3.0	Moderado
		Suelo	Contaminación de suelos por derrames	0.9	0.7	1.0	1.0	0.6	4.3
	Generación de desechos químicos		1.0	0.6	1.0	1.0	0.8	4.1	Moderado
	Perdida de cobertura natural		0.9	0.6	0.7	0.9	0.8	3.5	Moderado
	Erosión de los suelos		0.9	0.7	0.5	1.0	0.8	3.3	Moderado
	Ecosistema	Deforestación	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	4.3	Moderado
		Perdida de fauna	0.9	0.8	0.9	1.0	0.7	5.0	Significativo
		Perdida de flora	1.0	0.8	0.8	1.0	0.7	4.7	Moderado
		Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.7	0.8	1.0	0.7	4.3	Moderado
		Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	5.3	Significativo
		Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.6	0.9	1.0	0.8	4.0	Moderado
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural	1.0	0.8	0.9	0.8	0.7	4.8	Moderado	
	Contaminación visual	1.0	0.8	0.8	0.9	0.7	4.7	Moderado	

		Contaminación por ruido	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	5.6	Significativo
		Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	0.9	0.9	0.9	0.7	6.0	Significativo
		Construcción de vías	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8	5.5	Significativo
		Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	7.3	Significativo
		Obstaculización de vías	0.9	0.6	1.0	0.9	0.7	3.5	Moderado
		Generación de empleo	1.0	0.7	0.6	1.0	0.7	3.6	Moderado
		Accidentalidad laboral	1.0	0.7	0.7	1.0	0.7	4.4	Moderado
	Sociales	Desarrollo social	1.0	0.6	0.7	1.0	1.0	4.2	Moderado
		Crecimiento económico	0.9	0.8	0.6	1.0	1.0	5.1	Significativo
		Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	0.5	0.6	0.9	0.7	2.0	Poco significativo
		Afectación a la salud de la población	1.0	0.6	0.6	1.0	0.7	3.3	Moderado
		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.9	0.8	1.0	0.7	5.5	Significativo
IMPACTO NETO								160.36	
Transporte de materia prima		Generación de gases efecto invernadero	0.9	0.8	0.9	0.7	0.9	5.5	Significativo
	Aire	Generación de material particulado	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	6.4	Significativo
		Contaminación zonal del aire	0.9	0.6	0.9	0.9	1.0	4.3	Moderado
		Perdida de la calidad del aire	0.9	0.6	0.8	0.8	0.9	3.9	Moderado
		Contaminación de fuentes hídricas por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.7	Significativo
	Agua	Dispersión de contaminantes en agua por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	7.1	Significativo

	Perdida de la calidad del agua por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	7.1	Significativo
Suelo	Contaminación de suelos por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	5.9	Significativo
	Perdida de cobertura natural por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	6.1	Significativo
	Erosión de los suelos por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	5.7	Significativo
	Perdida de fauna por derrames	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	6.1	Significativo
Ecosistema	Perdida de flora por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	5.7	Significativo
	Perdida de cobertura vegetal por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	5.2	Significativo
	Perdida de refugios faunísticos por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	6.0	Significativo
	Afectación a la salud de la fauna por derrames	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	5.9	Significativo
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural	1.0	0.5	1.0	1.0	0.8	3.4	Moderado
	Contaminación por ruido	1.0	0.5	0.8	1.0	0.8	3.4	Moderado
	Construcción de vías	0.8	0.8	1.0	1.0	0.7	5.0	Significativo
Sociales	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	0.9	0.9	1.0	0.8	6.4	Significativo
	Obstaculización de vías	1.0	0.6	0.9	1.0	0.8	4.0	Moderado
	Generación de empleo	1.0	0.8	0.8	1.0	0.7	5.0	Moderado
	Accidentalidad laboral	1.0	0.7	0.9	1.0	0.8	4.9	Moderado
	Desarrollo social	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	7.4	Significativo
	Crecimiento económico	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	6.6	Significativo
	Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	0.8	0.6	0.8	0.9	4.5	Moderado
Afectación a la salud de la población	1.0	0.5	0.7	1.0	0.8	3.3	Moderado	

Conversión de la energía	Conversión de la Energía	Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.6	0.8	1.0	0.7	3.4	Moderado	
		IMPACTO NETO							144.81	
		Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.8	0.7	1.0	0.9	0.9	4.9	Moderado
			Generación de material particulado	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	3.1	Moderado
			Contaminación zonal del aire	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	4.0	Moderado
			Perdida de la calidad del aire	0.8	0.7	1.0	0.9	0.9	4.3	Moderado
		Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	3.5	Moderado
			Contaminación de fuentes hídricas subterráneas	0.6	0.2	0.7	0.7	0.5	0.5	Poco significativo
			Contaminación de fuentes hídricas por derrames	0.8	0.5	0.7	0.8	0.6	1.7	Poco significativo
			Perdida de fuentes hídricas	0.8	0.5	1.0	1.0	0.6	2.3	Poco significativo
			Perdida de la calidad del agua	0.8	0.4	0.5	0.7	0.6	1.1	Poco significativo
			Contaminación de suelos por derrames	0.8	0.6	0.8	0.8	0.6	2.3	Poco significativo
		Suelo	Generación de desechos químicos	0.9	0.6	0.8	0.8	0.8	3.4	Moderado
			Perdida de cobertura natural	0.8	0.4	0.7	0.7	0.5	1.5	Poco significativo
			Erosión de los suelos	0.9	0.4	0.4	0.8	0.5	1.2	Poco significativo
		Ecosistema	Deforestación	0.6	0.4	0.6	0.7	0.4	0.9	Poco significativo

	Perdida de fauna	0.7	0.4	0.6	0.6	0.5	0.9	Poco significativo
	Perdida de flora	0.6	0.5	0.6	0.7	0.4	0.9	Poco significativo
	Perdida de cobertura vegetal	0.6	0.5	0.5	0.7	0.3	0.7	Poco significativo
	Perdida de refugios faunísticos	0.6	0.5	0.5	0.6	0.3	0.9	Poco significativo
	Afectación a la salud de la fauna	0.7	0.4	0.6	0.6	0.4	0.9	Poco significativo
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural	0.6	0.4	0.6	0.6	0.3	0.6	Poco significativo
	Contaminación visual	0.6	0.3	0.6	0.7	0.3	0.6	Poco significativo
	Contaminación por ruido	0.7	0.3	0.6	0.6	0.3	0.6	Poco significativo
	Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	7.1	Significativo
	Construcción de vías	0.7	0.5	0.8	0.8	0.6	1.8	Poco significativo
Sociales	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	5.4	Significativo
	Obstaculización de vías	0.9	0.6	0.8	0.9	0.7	3.0	Moderado
	Generación de empleo	1.0	0.8	0.9	0.9	0.6	4.4	Moderado
	Accidentalidad laboral	0.8	0.7	0.9	1.0	0.7	3.8	Moderado
	Desarrollo social	1.0	0.9	0.6	0.8	1.0	5.7	Significativo
	Crecimiento económico	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	6.8	Significativo

Mejoramiento de la calidad de vida	1.0	0.9	0.7	1.0	0.7	5.1	Significativo
Afectación a la salud de la población	0.9	0.5	0.6	0.8	0.6	2.0	Poco significativo
Cambio de actividad económica de la población	0.8	0.8	0.6	0.8	0.6	2.7	Moderado
IMPACTO NETO						88.16	
IMPACTO NETO TOTAL						575.25	

ANEXO II Matriz EPM o Arboleda – Biomasa

Matriz EPM para La Biomasa

<i>Etapa</i>	<i>Sub-etapa</i>	<i>Impacto</i>	<i>Efecto</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	<i>Ca</i>	<i>Impacto Ambiental</i>
Ciclo Inicial del combustible	Cultivo	Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.7	0.4	0.5	0.8	0.8	1.4	Poco significativo
			Generación de material particulado	0.6	0.3	0.8	0.5	0.7	1.0	Poco significativo
			Contaminación zonal del aire	0.7	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	Poco significativo
			Perdida de la calidad del aire	0.6	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	Poco significativo
		Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales por pesticidas y fertilizantes	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	4.1	Moderado
			Contaminación de fuentes hídricas subterráneas por pesticidas y fertilizantes	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	4.6	Moderado
			Dispersión de contaminantes en agua	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	4.6	Moderado
			Disminución caudal de fuentes hídricas	0.7	0.5	0.4	0.8	0.8	1.8	Poco significativo
			Perdida de la calidad del agua	0.9	0.5	0.7	0.9	0.9	3.1	Moderado

Suelo	Deforestación de bosques	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	3.1	Moderado
	Perdida de cobertura natural	0.9	0.7	1.0	0.7	0.7	4.4	Moderado
	Reemplazo de cultivos alimenticios	1.0	0.7	0.8	0.7	0.7	4.3	Moderado
	Implementación de monocultivos	1.0	0.9	1.0	0.8	0.7	6.1	Significativo
	Degradación del suelo por monocultivos	1.0	0.9	0.5	0.8	0.7	4.4	Moderado
	Sobreexplotación del suelo	1.0	0.9	0.6	0.8	0.7	4.6	Moderado
	Perdida de fertilidad del suelo	1.0	0.6	0.6	0.9	0.7	3.6	Moderado
	Erosión de los suelos	1.0	0.6	0.6	0.8	0.7	3.3	Moderado
Ecosistema	Deforestación	1.0	0.8	0.9	0.8	0.7	5.4	Significativo
	Perdida de fauna	1.0	0.7	0.9	0.7	0.7	4.8	Moderado
	Perdida de flora	1.0	0.8	0.9	0.7	0.6	4.4	Moderado
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.9	0.9	0.7	0.7	5.7	Significativo
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.9	0.9	0.7	0.6	4.9	Moderado
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.9	0.7	0.7	0.6	4.4	Moderado
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural autóctono	1.0	0.7	0.7	0.8	0.5	3.5	Moderado
	Contaminación visual	0.9	0.6	0.6	0.8	0.6	2.7	Moderado
	Presencia de nuevos emplazamientos	0.9	0.7	0.6	0.8	0.6	3.3	Moderado
	Construcción de vías	0.9	0.6	0.6	0.8	0.5	2.6	Moderado
Sociales	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	0.8	0.6	1.0	0.8	5.5	Significativo
	Obstaculización de vías	0.9	0.4	0.6	0.6	0.3	1.2	Poco significativo
	Generación de empleo	1.0	0.8	0.9	0.9	0.9	6.5	Significativo
	Accidentalidad laboral	1.0	0.4	0.7	0.8	0.4	1.8	Poco significativo

	Desarrollo social	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	5.7	Significativo	
	Crecimiento económico	0.9	0.9	0.8	0.8	0.6	4.7	Moderado	
	Mejoramiento de la calidad de vida	1.0	0.7	0.8	0.8	0.6	4.1	Moderado	
	Afectación a la salud de la población	0.9	0.4	0.4	0.7	0.5	1.2	Poco significativo	
	Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.7	0.9	1.0	0.8	4.9	Moderado	
IMPACTO NETO							132.73		
Transporte	Aire	Generación de gases efecto invernadero	1.0	0.9	1.0	0.8	0.8	6.9	Significativo
		Generación de material particulado	1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	7.1	Significativo
		Contaminación zonal del aire	1.0	0.7	1.0	0.8	0.9	6.2	Significativo
		Perdida de la calidad del aire	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	5.0	Moderado
	Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	0.7	0.4	0.7	0.4	0.4	0.9	Poco significativo
		Perdida de la calidad del agua	0.7	0.4	0.7	0.4	0.4	1.0	Poco significativo
	Suelo	Contaminación de los suelos por pérdidas de material durante el transporte	0.8	0.6	0.8	0.5	0.5	1.9	Poco significativo
	Ecosistema	Perdida de cobertura vegetal	0.6	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6	Poco significativo
		Perdida de refugios faunísticos	0.6	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	Poco significativo
		Afectación a la salud de la fauna	0.6	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6	Poco significativo

		Perdida de paisaje rural	0.6	0.3	0.6	0.4	0.3	0.5	Poco significativo	
		Contaminación visual	0.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.5	Poco significativo	
	Paisajísticos	Contaminación por ruido	0.6	0.5	0.6	0.3	0.3	0.7	Poco significativo	
		Construcción de vías	0.6	0.5	0.4	0.6	0.3	0.9	Poco significativo	
		Valorización o desvalorización del terreno	0.7	0.5	0.6	0.6	0.4	1.3	Poco significativo	
		Obstaculización de vías	0.6	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	Poco significativo	
		Generación de empleo	0.9	0.8	0.9	0.9	0.7	4.9	Moderado	
		Accidentalidad laboral	1.0	0.8	0.7	0.4	0.4	2.3	Poco significativo	
	Sociales	Desarrollo social	0.6	0.4	0.6	0.6	0.3	0.8	Poco significativo	
		Crecimiento económico	0.7	0.4	0.6	0.6	0.4	0.9	Poco significativo	
		Mejoramiento de la calidad de vida	0.5	0.4	0.5	0.6	0.3	0.7	Poco significativo	
		Afectación a la salud de la población	0.6	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5	Poco significativo	
		Cambio de actividad económica de la población	0.9	0.7	0.8	1.0	0.7	4.2	Moderado	
		IMPACTO NETO							49.29	
Co nv ers Pr od ucc	Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.8	0.6	1.0	0.8	0.8	3.5	Moderado	

	Generación de material particulado	0.8	0.6	1.0	0.8	0.8	3.4	Moderado
	Contaminación zonal del aire	0.8	0.6	1.0	0.8	0.8	3.6	Moderado
	Perdida de la calidad del aire	0.7	0.6	1.0	0.8	0.8	3.4	Moderado
Agua	Contaminación química de fuentes hídricas superficiales	0.8	0.6	1.0	0.7	0.8	3.3	Moderado
	Contaminación química de fuentes hídricas subterráneas	0.8	0.6	1.0	0.7	0.8	3.1	Moderado
	Perdida de la calidad del agua	0.7	0.5	0.6	0.5	0.7	1.5	Poco significativo
Suelo	Contaminación química de suelos	0.7	0.4	0.7	0.5	0.5	1.1	Poco significativo
	Generación de desechos químicos	0.7	0.6	1.0	0.7	0.6	2.7	Moderado
	Perdida de cobertura natural	0.7	0.4	0.6	0.6	0.5	1.1	Poco significativo
	Erosión de los suelos	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	1.1	Poco significativo
Ecosistema	Deforestación	0.7	0.3	0.6	0.6	0.4	0.8	Poco significativo
	Perdida de fauna	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.7	Poco significativo
	Perdida de flora	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.7	Poco significativo
	Perdida de cobertura vegetal	0.6	0.3	0.6	0.6	0.4	0.7	Poco significativo
	Perdida de refugios faunísticos	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.7	Poco significativo

		Afectación a la salud de la fauna	0.7	0.4	0.5	0.6	0.3	0.9	Poco significativo
		Perdida de paisaje rural	0.6	0.3	0.6	0.6	0.4	0.7	Poco significativo
	Paisajsticos	Contaminación visual	0.9	0.6	0.8	0.9	0.6	3.1	Moderado
		Contaminación por ruido	0.9	0.7	0.8	0.8	0.6	3.3	Moderado
		Presencia de nuevos emplazamientos	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	1.1	Poco significativo
		Construcción de vías	0.6	0.3	0.4	0.6	0.3	0.6	Poco significativo
		Valorización o desvalorización del terreno	0.7	0.6	0.3	0.6	0.4	1.1	Poco significativo
	Sociales	Obstaculización de vías	0.8	0.6	0.5	1.0	0.6	2.8	Moderado
		Generación de empleo	0.9	0.8	0.7	0.9	0.6	4.5	Moderado
		Accidentalidad laboral	0.9	0.6	0.5	0.9	0.6	2.8	Moderado
		Desarrollo social	0.9	0.8	0.7	0.9	0.6	4.0	Moderado
		Crecimiento económico	1.0	0.9	0.9	0.9	0.7	6.1	Significativo
		Mejoramamiento de la calidad de vida	0.9	0.8	0.8	1.0	0.7	5.1	Significativo
		Afectación a la salud de la población	0.7	0.5	0.5	0.8	0.5	1.6	Poco significativo
		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.7	0.8	1.0	0.7	4.8	Moderado
		IMPACTO NETO						74.09	
Transfor mación	Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.7	0.5	0.9	0.8	0.7	2.4	Poco significativo
		Generación de material particulado	0.8	0.5	1.0	0.7	0.8	2.6	Moderado

	Contaminación zonal del aire	0.8	0.5	0.9	0.7	0.7	2.4	Poco significativo
	Perdida de la calidad del aire	0.8	0.4	0.9	0.8	0.8	2.4	Poco significativo
Agua	Contaminación de fuentes hídricas	0.5	0.2	0.5	0.6	0.5	0.5	Poco significativo
	Perdida de fuentes hídricas	0.5	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6	Poco significativo
	Perdida de la calidad del agua	0.6	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	Poco significativo
Suelo	Contaminación de suelos	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.5	Poco significativo
	Generación de desechos químicos	0.6	0.2	0.4	0.6	0.4	0.4	Poco significativo
	Perdida de cobertura natural	0.6	0.2	0.3	0.6	0.3	0.3	Poco significativo
	Erosión de los suelos	0.6	0.3	0.3	0.6	0.4	0.4	Poco significativo
Ecosistema	Deforestación	0.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	Poco significativo
	Perdida de fauna	0.5	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	Poco significativo
	Perdida de flora	0.4	0.2	0.3	0.4	0.3	0.1	Poco significativo
	Perdida de cobertura vegetal	0.4	0.1	0.3	0.5	0.3	0.1	Poco significativo

	Perdida de refugios faunísticos	0.4	0.1	0.3	0.5	0.3	0.1	Poco significativo
	Afectación a la salud de la fauna	0.5	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	Poco significativo
	Perdida de paisaje rural	0.4	0.2	0.4	0.4	0.2	0.1	Poco significativo
	Contaminación visual	0.5	0.3	0.5	0.5	0.2	0.4	Poco significativo
Paisajísticos	Contaminación por ruido	0.4	0.2	0.4	0.4	0.2	0.1	Poco significativo
	Presencia de nuevos emplazamientos	0.5	0.4	0.5	0.6	0.3	0.6	Poco significativo
	Construcción de vías	0.5	0.4	0.5	0.6	0.3	0.6	Poco significativo
	Valorización o desvalorización del terreno	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.7	Poco significativo
	Obstaculización de vías	0.6	0.3	0.5	0.6	0.4	0.6	Poco significativo
	Generación de empleo	0.9	0.7	0.8	1.0	0.8	4.9	Moderado
Sociales	Accidentalidad laboral	0.9	0.5	0.6	0.8	0.8	2.7	Moderado
	Desarrollo social	0.8	0.7	0.6	0.7	0.5	2.2	Poco significativo
	Crecimiento económico	0.9	0.7	0.6	0.8	0.6	3.1	Moderado
	Mejoramiento de la calidad de vida	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7	4.3	Moderado
	Afectación a la salud de la población	0.6	0.4	0.3	0.7	0.4	0.7	Poco significativo

		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.8	0.7	0.9	0.7	4.8	Moderado
		IMPACTO NETO						39.90	
Infraestructura	Aire	Generación de gases efecto invernadero	0.5	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	Poco significativo
		Generación de material particulado	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5	0.7	Poco significativo
		Contaminación zonal del aire	0.6	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	Poco significativo
		Perdida de la calidad del aire	0.5	0.4	0.6	0.6	0.6	0.8	Poco significativo
	Agua	Contaminación de fuentes hídricas	0.7	0.4	0.6	0.7	0.5	1.2	Poco significativo
		Perdida de fuentes hídricas	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	Poco significativo
		Perdida de la calidad del agua	0.6	0.4	0.5	0.4	0.5	0.7	Poco significativo
	Suelo	Contaminación de suelos	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	Poco significativo
		Generación de desechos	0.6	0.5	0.4	0.2	0.5	0.6	Poco significativo
		Perdida de cobertura natural	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	Poco significativo
		Erosión de los suelos	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	Poco significativo
	Ecosistema	Deforestación	0.5	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4	Poco significativo

	Perdida de fauna	0.5	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	Poco significativo
	Perdida de flora	0.5	0.2	0.2	0.4	0.3	0.1	Poco significativo
	Perdida de cobertura vegetal	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	Poco significativo
	Perdida de refugios faunísticos	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	Poco significativo
	Afectación a la salud de la fauna	0.4	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	Poco significativo
Paisajísticos	Perdida de paisaje rural	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	0.2	Poco significativo
	Contaminación visual	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.1	Poco significativo
	Contaminación por ruido	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.1	Poco significativo
	Presencia de nuevos emplazamientos	0.7	0.4	0.5	0.6	0.2	0.8	Poco significativo
	Construcción de vías	0.5	0.2	0.4	0.4	0.1	0.1	Poco significativo
	Valorización o desvalorización del terreno	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	1.5	Poco significativo
Sociales	Obstaculización de vías	0.5	0.1	0.4	0.5	0.2	0.2	Poco significativo
	Generación de empleo	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	1.1	Poco significativo

Accidentalidad laboral	0.6	0.3	0.3	0.6	0.3	0.4	Poco significativo
Desarrollo social	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	1.3	Poco significativo
Crecimiento económico	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	1.3	Poco significativo
Mejoramiento de la calidad de vida	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	1.2	Poco significativo
Afectación a la salud de la población	0.6	0.2	0.2	0.6	0.3	0.3	Poco significativo
Cambio de actividad económica de la población	0.6	0.5	0.3	0.6	0.5	0.9	Poco significativo
IMPACTO NETO						16.78	
IMPACTO NETO TOTAL						312.78	

ANEXO III Matriz EPM o Arboleda – Energía Nuclear

Matriz EPM para La Energía Nuclear

<i>Etapa</i>	<i>Sub-etapa</i>	<i>Impacto</i>	<i>Efecto</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	<i>Ca</i>	<i>Impacto Ambiental</i>
Ciclo Inicial del combustible	Minería y Molienda de Uranio	Aire	Generación de gases efecto invernadero	1.0	0.5	0.9	1.0	1.0	4.7	Moderado
			Generación de material particulado	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.6	Muy significativo
			Contaminación zonal del aire	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	9.0	Muy significativo
			Perdida de la calidad del aire	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	6.9	Significativo
		Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.8	1.0	0.9	1.0	7.4	Significativo
			Contaminación de fuentes hídricas subterráneas	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	7.9	Muy significativo
			Contaminación química de fuentes hídricas	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	7.1	Significativo
			Dispersión de contaminantes en agua	1.0	0.8	1.0	0.9	1.0	7.3	Significativo
			Perdida de fuentes hídricas	0.9	0.7	1.0	0.9	1.0	5.4	Significativo
		Suelo	Perdida de la calidad del agua	1.0	0.8	0.9	0.9	1.0	6.6	Significativo
			Contaminación química de suelos	1.0	0.7	1.0	1.0	0.6	4.8	Moderado
			Generación de desechos químicos	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.8	Significativo

	Perdida de cobertura natural	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	5.4	Significativo
	Erosión de los suelos	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.6	Significativo
Ecosistema	Deforestación	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	4.4	Moderado
	Perdida de fauna	1.0	1.0	0.8	0.8	1.0	7.1	Significativo
	Perdida de flora	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	6.6	Significativo
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	5.7	Significativo
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	5.4	Significativo
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	5.6	Significativo
	Perdida de paisaje autóctono	1.0	1.0	0.9	0.9	0.6	5.4	Significativo
Paisajísticos	Contaminación visual	0.8	0.9	0.8	1.0	0.6	4.2	Moderado
	Contaminación por ruido	0.9	0.9	1.0	1.0	0.5	5.1	Significativo
	Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	5.9	Significativo
	Construcción de vías	1.0	0.9	0.7	0.9	1.0	6.5	Significativo
	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	0.7	1.0	0.6	5.4	Significativo
Sociales	Obstaculización de vías	1.0	0.7	1.0	0.6	0.6	3.6	Moderado
	Generación de empleo	0.9	0.8	0.9	1.0	0.7	4.7	Moderado
	Accidentalidad laboral	1.0	0.7	0.7	1.0	0.6	3.7	Moderado
	Desarrollo social	0.9	0.6	0.8	1.0	0.8	3.8	Moderado
	Crecimiento económico	1.0	0.7	0.8	0.9	0.8	4.6	Moderado
	Mejoramiento de la calidad de vida	0.8	0.6	0.8	0.9	0.8	3.3	Moderado
	Afectación a la salud de la población	1.0	0.8	0.5	0.7	0.8	3.4	Moderado
	Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.9	0.7	0.9	0.8	5.0	Moderado
IMPACTO NETO							193.81	

Conversión y Enriquecimiento	Aire	Generación de gases efecto invernadero	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	6.9	Significativo
		Generación de material particulado	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.3	Significativo
		Contaminación zonal del aire	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	6.9	Significativo
		Perdida de la calidad del aire	1.0	0.8	1.0	0.9	1.0	7.4	Significativo
	Agua	Contaminación de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.7	1.0	0.9	1.0	5.8	Significativo
		Contaminación de fuentes hídricas subterráneas	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	5.0	Moderado
		Contaminación química de fuentes hídricas	1.0	0.6	0.9	0.9	1.0	5.0	Significativo
		Dispersión de contaminantes en agua	1.0	0.7	0.7	0.9	1.0	4.9	Moderado
		Perdida de fuentes hídricas	1.0	0.5	0.8	0.9	1.0	3.9	Moderado
		Perdida de la calidad del agua	1.0	0.7	0.7	0.9	1.0	4.8	Moderado
	Suelo	Contaminación química de suelos	1.0	0.7	0.7	0.9	0.8	3.9	Moderado
		Generación de desechos químicos	1.0	0.9	0.7	1.0	0.8	5.3	Significativo
		Perdida de cobertura natural	1.0	0.7	0.6	0.9	0.8	3.7	Moderado
		Erosión de los suelos	1.0	0.7	0.7	1.0	0.8	4.5	Moderado
	Ecosistema	Deforestación	1.0	0.7	0.6	0.9	0.6	3.4	Moderado
		Perdida de fauna	0.9	0.8	0.7	1.0	0.6	4.0	Moderado
		Perdida de flora	1.0	0.9	0.6	0.9	0.6	4.4	Moderado
		Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.9	0.6	1.0	0.6	4.3	Moderado
Perdida de refugios faunísticos		1.0	0.8	0.7	1.0	0.6	4.6	Moderado	
Afectación a la salud de la fauna		1.0	0.9	0.7	1.0	0.6	4.5	Moderado	
Paisajísticos	Perdida de paisaje autóctono	1.0	0.8	0.6	1.0	0.6	4.0	Moderado	

		Contaminación visual	1.0	0.5	0.5	0.9	0.6	2.4	Poco significativo
		Contaminación por ruido	1.0	0.6	1.0	1.0	0.6	4.1	Moderado
		Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	0.8	0.9	0.9	0.6	4.6	Moderado
		Construcción de vías	1.0	0.7	1.0	0.9	0.6	4.6	Moderado
		Valorización o desvalorización del terreno	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	5.6	Significativo
		Obstaculización de vías	1.0	0.6	0.7	1.0	0.7	3.4	Moderado
		Generación de empleo	1.0	0.7	0.8	1.0	1.0	5.7	Significativo
		Accidentalidad laboral	1.0	0.6	0.6	0.9	0.6	2.6	Moderado
	Sociales	Desarrollo social	1.0	0.7	0.7	1.0	0.8	4.3	Moderado
		Crecimiento económico	1.0	0.8	0.7	0.9	0.8	5.0	Moderado
		Mejoramiento de la calidad de vida	1.0	0.6	0.6	0.9	0.8	3.5	Moderado
		Afectación a la salud de la población	1.0	0.6	0.6	0.9	0.8	3.5	Moderado
		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.7	0.5	1.0	0.8	3.7	Moderado
		IMPACTO NETO						156.64	
Construcción de la Central Nuclear	Construcción de la Central Nuclear	Generación de gases efecto invernadero	0.7	0.5	0.7	0.7	0.8	1.8	Poco significativo
		Generación de material particulado	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	2.1	Poco significativo
	Aire	Contaminación zonal del aire	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	2.3	Poco significativo
		Perdida de la calidad del aire	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	1.5	Poco significativo

Agua	Contaminación de fuentes hídricas	0.8	0.4	0.5	0.8	0.8	1.5	Poco significativo
	Dispersión de contaminantes en agua	0.8	0.5	0.7	0.8	0.9	2.3	Poco significativo
	Perdida de fuentes hídricas	0.7	0.4	0.5	0.7	0.8	1.2	Poco significativo
	Perdida de la calidad del agua	0.7	0.4	0.6	0.8	0.8	1.3	Poco significativo
Suelo	Contaminación de suelos	0.9	0.6	0.6	0.8	0.5	2.0	Poco significativo
	Generación de desechos químicos	0.8	0.4	0.5	0.5	0.4	0.9	Poco significativo
	Perdida de cobertura natural	1.0	0.8	0.8	0.7	0.6	3.4	Moderado
	Erosión de los suelos	1.0	0.5	0.8	0.7	0.6	2.2	Poco significativo
Ecosistema	Deforestación	1.0	0.8	1.0	1.0	0.6	5.8	Significativo
	Perdida de fauna	1.0	0.8	0.8	1.0	0.6	4.6	Moderado
	Perdida de flora	1.0	0.8	0.7	1.0	0.6	4.2	Moderado
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.8	0.8	0.9	0.6	4.7	Moderado
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.8	0.7	0.8	0.6	3.7	Moderado
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.8	0.7	0.7	0.6	4.0	Moderado
Paisajísticos	Perdida de paisaje autóctono	1.0	0.8	0.7	1.0	0.6	4.3	Moderado
	Contaminación visual	0.9	0.7	0.7	0.9	0.6	3.0	Moderado
	Contaminación por ruido	1.0	0.9	0.9	0.7	0.6	4.7	Moderado
	Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	0.8	0.7	0.7	0.6	3.9	Moderado
	Construcción de vías	1.0	0.8	0.6	0.7	0.6	3.5	Moderado

		Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	0.8	0.6	0.7	5.1	Significativo	
		Obstaculización de vías	1.0	0.5	0.7	0.6	0.8	2.7	Moderado	
		Generación de empleo	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	5.4	Significativo	
		Accidentalidad laboral	1.0	0.7	0.8	0.8	0.8	4.2	Moderado	
	Sociales	Desarrollo social	1.0	0.8	0.8	0.6	0.7	4.2	Moderado	
		Crecimiento económico	1.0	0.9	0.9	0.7	0.6	4.7	Moderado	
		Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	4.5	Moderado	
		Afectación a la salud de la población	1.0	0.4	0.5	0.7	0.7	1.4	Poco significativo	
		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	4.6	Moderado	
IMPACTO NETO								105.54		
Ciclo Final del Combustible		Ciclo Final del Combustible	Generación de gases efecto invernadero	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9.5	Muy significativo
			Generación de material particulado	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	Muy significativo
	Contaminación zonal del aire		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9.2	Muy significativo	
	Perdida de la calidad del aire		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	Muy significativo	
	Agua		Contaminación radiactiva de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.6	Muy significativo
			Contaminación radiactiva de fuentes hídricas subterráneas	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	8.4	Muy significativo
			Contaminación de fuentes hídricas	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	4.6	Moderado

	Dispersión de contaminantes y radiactividad en agua	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.2	Muy significativo
	Perdida de fuentes hídricas	1.0	0.6	0.9	1.0	1.0	4.6	Moderado
	Perdida de la calidad del agua	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	7.6	Muy significativo
Suelo	Contaminación radiactiva de suelos	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.5	Significativo
	Generación de desechos químicos y radiactivos	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.5	Muy significativo
	Perdida de cobertura natural por radiactividad	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.5	Significativo
Ecosistema	Deforestación	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	5.0	Moderado
	Perdida de fauna	1.0	0.7	1.0	1.0	0.7	4.6	Moderado
	Perdida de flora	1.0	0.5	1.0	1.0	2.5	9.3	Muy significativo
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.6	1.0	1.0	0.6	3.7	Moderado
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.7	1.0	1.0	0.5	4.0	Moderado
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.9	0.9	1.0	0.6	5.7	Significativo
	Mutación de fauna	1.0	0.9	0.5	1.0	1.0	5.9	Significativo
	Mutación de flora	1.0	0.9	0.5	1.0	1.0	5.9	Significativo
	Manejo de basura radiactiva	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	Muy significativo
Paisajísticos	Perdida de paisaje autóctono	1.0	0.8	0.7	1.0	0.6	4.4	Moderado
	Contaminación visual	1.0	0.8	0.8	1.0	0.6	4.6	Moderado
	Cercado de áreas por basuras radiactivas	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.1	Muy significativo
	Contaminación por ruido	1.0	0.8	1.0	1.0	0.6	4.9	Moderado

		Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	6.3	Significativo
		Construcción de vías	1.0	0.6	0.8	1.0	0.7	3.6	Moderado
		Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	0.8	1.0	0.6	6.2	Significativo
		Obstaculización de vías	1.0	0.5	0.6	1.0	0.6	2.4	Poco significativo
		Generación de empleo	0.9	0.4	0.5	0.9	1.0	1.9	Poco significativo
		Accidentalidad laboral	1.0	0.9	0.5	0.9	0.6	3.8	Moderado
	Sociales	Desarrollo social	1.0	0.5	0.4	1.0	1.0	2.5	Moderado
		Crecimiento económico	0.9	0.5	0.5	1.0	1.0	2.6	Moderado
		Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	0.4	0.5	0.9	1.0	1.7	Poco significativo
		Afectación a la salud de la población	1.0	0.9	0.6	1.0	1.0	6.0	Significativo
		Cambio de actividad económica de la población	1.0	0.5	0.5	1.0	0.6	2.3	Poco significativo
		IMPACTO NETO						217.26	
Desmantelamiento de la Central Nuclear	Desmantelamiento de la Central Nuclear	Generación de gases efecto invernadero	1.0	0.7	1.0	0.9	0.7	5.3	Significativo
		Generación de material particulado	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.1	Muy significativo
	Aire	Contaminación zonal del aire	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.1	Muy significativo
		Perdida de la calidad del aire	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	8.2	Muy significativo

Agua	Contaminación radiactiva de fuentes hídricas superficiales	1.0	0.7	1.0	0.9	1.0	6.1	Significativo
	Contaminación radiactiva de fuentes hídricas subterráneas	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	6.0	Significativo
	Contaminación de fuentes hídricas	1.0	0.7	1.0	1.0	0.7	4.8	Moderado
	Dispersión de contaminantes y radiactividad en agua	1.0	0.7	1.0	0.8	1.0	6.6	Significativo
	Perdida de fuentes hídricas	0.9	0.9	0.7	0.9	1.0	5.5	Significativo
	Perdida de la calidad del agua	0.9	0.7	0.7	1.0	1.0	4.5	Moderado
Suelo	Contaminación radiactiva de suelos	1.0	0.8	1.0	1.0	0.6	5.6	Significativo
	Generación de desechos químicos y radiactivos	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	9.4	Muy significativo
	Generación de escombros radiactivos	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	9.7	Muy significativo
	Perdida de cobertura natural	1.0	1.0	0.6	0.9	0.6	4.5	Moderado
	Erosión de los suelos	1.0	0.6	0.6	0.9	0.6	3.0	Moderado
	Deforestación	1.0	0.9	0.7	0.7	0.5	3.6	Moderado
Ecosistema	Perdida de fauna	1.0	0.9	0.7	0.7	0.6	4.0	Moderado
	Perdida de flora	1.0	0.9	0.6	0.8	0.4	3.5	Moderado
	Perdida de cobertura vegetal	1.0	0.8	0.6	0.8	0.6	3.4	Moderado
	Perdida de refugios faunísticos	1.0	0.4	0.7	0.8	0.6	1.8	Poco significativo
	Afectación a la salud de la fauna	1.0	0.4	0.6	0.8	0.6	1.7	Poco significativo
	Manejo de basura radiactiva	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	8.9	Muy significativo

Paisajísticos	Recuperación de paisaje	0.9	0.8	0.2	0.9	0.7	2.2	Poco significativo
	Contaminación visual	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7	3.4	Moderado
	Cercado de áreas por basuras radiactivas	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	6.7	Significativo
	Contaminación por ruido	0.9	0.8	0.7	1.0	0.8	4.4	Moderado
	Presencia de nuevos emplazamientos	1.0	0.6	0.2	0.9	0.6	2.1	Poco significativo
	Construcción de vías	1.0	0.6	0.3	0.9	0.8	2.4	Poco significativo
Sociales	Valorización o desvalorización del terreno	1.0	1.0	0.7	0.9	0.8	5.8	Significativo
	Obstaculización de vías	0.7	0.3	0.4	0.7	0.4	0.5	Poco significativo
	Generación de empleo	0.8	0.7	0.7	0.8	0.5	2.1	Poco significativo
	Accidentalidad laboral	1.0	0.8	0.7	0.8	0.7	4.3	Moderado
	Desarrollo social	0.7	0.5	0.6	0.8	0.5	1.4	Poco significativo
	Crecimiento económico	0.7	0.6	0.6	0.8	0.5	1.6	Poco significativo
	Mejoramiento de la calidad de vida	0.9	1.0	0.7	0.9	0.8	5.2	Significativo
	Afectación a la salud de la población	0.9	0.6	0.7	0.9	0.6	2.7	Moderado
Cambio de actividad económica de la población	0.9	0.8	0.7	0.9	0.6	3.5	Moderado	
IMPACTO NETO							170.44	

IMPACTO NETO TOTAL

843.68