Propuesta de Proyecto de Ciencia, Tecnología e Innovación
Adaptación para trabajos de grado de posgrado

ECONOMÍA CIRCULAR EN ARACATACA, MAGDALENA: GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

PRESENTADO POR:
MANUEL ANDRÉS FUENTES CUADRADO – 2020284003
STULY TATIANA QUINTO CAMARGO - 2019284007

PRESENTADO A:
CONSEJO DE PROGRAMA
MAESTRÍA EN DESARROLLO TERRITORIAL SOSTENIBLE

DIRECTOR:
MERCEDES ISABEL RODRIGUEZ SARMIENTO
ETNA MERCEDES BAYONA VELÁSQUEZ

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES Y ECONÓMICAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN DESARROLLO TERRITORIAL SOSTENIBLE
2022

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos inicialmente al creador de la vida, que me ha dado la bendición según sus propósitos de alcanzar las metas que me he propuesto en su infinita gracia y bondad, a mis padres y hermanos, quienes siempre han creído en mis capacidades y alentado a salir adelante, a mi futuro esposo, por su incondicional apoyo y paciencia, a mis compañeros de maestría por hacer este viaje tan ameno, a mi amigo manu y compañero de proyecto, por invertir su tiempo, habilidades, corazón y compartir todo eso conmigo, a nuestras tutoras quienes con sus aportes nos dieron un norte para llegar a buen puerto.

Stuly Quinto

Una vez en la época escolar me preguntaron sobre mi proyecto de vida, y una de las metas que manifesté fue trabajar por el progreso de mi pueblo, y con el pasar del tiempo fueron creciendo los ánimos de contribuir positivamente con la naturaleza, que de ahí se despertase la pasión por mi profesión como Ingeniero Ambiental y desde entonces uno de mis intereses fue propender por el desarrollo sostenible de los territorios, sueño que hoy se materializa con la entrega del presente proyecto de investigación para optar al título de Magister en Desarrollo Territorial Sostenible. Donde primordialmente, quiero agradecer a Dios y toda su infinita grandeza, por el permitirme concretar cada una de mis metas, a mis padres y hermana quienes han sido testigo, apoyo y sostén en el camino recorrido. A los maestros quienes con sus enseñanzas fortalecen conocimientos y forjan profesionales para el futuro, al apoyo incondicional de los amigos quienes celebran y alientan en cada triunfo, a la oportunidad laboral que me permitió dar el paso en mi formación académica y quien día a día me enseña la importancia de tomar decisiones con criterios de sostenibilidad ambiental. A mis directoras de proyecto de grado quienes contribuyeron al desarrollo oportuno de la investigación y a mi compañera de trabajo de grado que fue la cómplice de conocimientos que materializó una investigación que esperamos pueda implementarse y contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de una población.

Manuel Fuentes

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen 7
2. Presentación 8
3. Descripción de la propuesta de Investigación 10
3.1. Contextualización del problema 10
3.2. Motivación y justificación 16
3.3. Objetivos 17
3.3.1. General 17
3.3.2. Específicos 17
4. Marco Teórico 18
4.1. Introducción a la Economía Circular 18
4.1.1. Antecedentes de la Economía Circular 20
4.1.2. Principios y Características de la Economía Circular 23
4.2. Transición energética 25
4.2.1. Matriz energética Mundial 26
4.2.2. Matriz energética colombiana 29
4.2.3. Escenarios de transición energética para Colombia 30
4.2.4. Las fuentes renovables en la matriz energética 32
4.3. Economía Circular en la transición energética 33
4.4. Generación de energía mediante el aprovechamiento de biomasa 34
4.4.1. Energías Renovables 35
4.4.2. Concepto, clasificación y usos de la biomasa 36
4.4.3. Generalidades del biogás 38
4.4.4. Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa 39
4.5. Estado del Arte de la Economía Circular aplicado a la generación de biogás a partir del aprovechamiento de aguas residuales 40
4.5.1. Tratamiento de aguas residuales 41
4.5.2. Producción de Biogás a partir del tratamiento de aguas residuales 43
4.5.3. Economía circular en Colombia 45
4.5.4. Casos exitosos de economía circular en Colombia 48

5. Metodología 51
6. Discusión y Resultados 57
6.1. Capítulo I - Descripción del sistema de captación y aprovechamiento de aguas residuales domésticas 59
6.1.1. Generalidades de las aguas residuales domésticas del municipio de Aracataca 59
6.1.2. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales 62
6.1.3. Sistema para el aprovechamiento y conversión de aguas residuales domésticas en energías renovables 69
6.2. Capítulo IV - Análisis de viabilidad para la implementación del modelo de economía circular 80
6.2.1. Compatibilidad con el concepto de Economía Circular 106
6.2.2. Establecimiento del Modelo de Economía Circular 111
6.2.3. Análisis de las dimensiones del desarrollo territorial 117
6.2.4. Propuesta de Iniciativa Clúster 120
7. Reflexiones Finales 123
8. Referencias 125
9. Anexos 130

LISTADO DE TABLAS, FIGURAS, GRÁFICAS E IMÁGENES

Tabla 1 Fuentes de Energía 35
Tabla 2 Tipos de tratamiento de aguas residuales 41
Tabla 3 Etapas del tratamiento de aguas residuales 42
Tabla 4 Marco normativo colombiano de Economía Circular aplicado a las aguas residuales 46
Tabla 5 Casos colombianos exitosos de economía circular 48
Tabla 6. Operacionalización de variables de a fase 2. 54
Tabla 7. Atributos Método Conesa Simplificado. 56
Tabla 8. Clasificación del Impacto Ambiental 57
Tabla 9. Consumo de energía eléctrica en zona residencial 57
Tabla 10. Consumo de energía eléctrica reportado por el operador Aguas de Aracataca S.A.S. 58
Tabla 11 Características estación de bombeo aguas residuales 60
Tabla 12 Características físicas de las aguas residuales domésticas 71
Tabla 13 Características físicas de las aguas residuales domésticas 72

Tabla 14. Resultados de la Caracterización fisicoquímica del agua de entrada del sistema 81
Tabla 15. Resultados de estimación de Biogás PTARD Aracataca. 85
Tabla 16. Actividades seleccionadas para la identificación y evaluación de impactos ambientales. 86
Tabla 17. Componentes e impactos ambientales usados para la identificación y valoración de impactos socioambientales del Proyecto. 88
Tabla 18. Matriz causa efecto para la identificación de los impactos ambientales del Proyecto. 89
Tabla 19. Matriz de evaluación de impacto socioambiental 98
Tabla 20. Jerarquización de los impactos 103
Tabla 21. Resultado de valoración por impactos. 105
Tabla 22 Análisis de los principios claves de la Economía Circular 112
Tabla 23. Potenciales beneficios de la construcción del Biodigestor. 117
Tabla 23. Análisis de la dimensión económica 117
Tabla 25. Análisis de la dimensión ambiental 119
Tabla 26. Análisis de la dimensión social 119

Figura 1 Emisiones de GEI por sectores económicos 26
Figura 2 Consumo mundial de energía primaria 2016 27
Figura 3 Consumo mundial de energía 1991-2016 28
Figura 4 Consumo energético regional por fuente 28
Figura 5 Matriz energética de consumo 2015 29
Figura 6 Matriz energética primaria 2015 30
Figura 7 Tipos de Biomasa 36
Figura 8 Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones 37
Figura 9 Esquema del Sistema de Alcantarillado de Aracataca 60
Figura 10 Cobertura de alcantarillado 2016-2018 62
Figura 11 Distribución Espacial de la Laguna 66
Figura 12 Dimensiones de la de la Laguna 67
Figura 13 Elementos del sistema de aprovechamiento y conversión de aguas residuales domésticas en energías renovables 70
Figura 14 Origen y descripción de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales 74
Figura 15 Tasas de producción y características típicas de los lodos 75
Figura 16. Pasos para el aprovechamiento de Biogás 75
Figura 17. Flujograma de metodología para la determinación del potencial energético del biogás generado en la PTARD de Aracataca. 82
Figura 18. Herramienta BioWATT con datos de la PTARD del Municipio de Aracataca 85

Figura 19. Diagrama sistémico flujo continuo de materiales técnicos y biológicos de la Economía Circular 107
Figura 20. Ciclo Integral del Agua 108
Figura 21. Economía Circular vs Economía Lineal 113
Figura 22. Reutilización de aguas residuales en la economía circular 114
Figura 23. Sistema de aprovechamiento para la Generación de Biogás analizado con las etapas de la economía circular de aguas residuales 115
Figura 24. Modelo de economía circular del biogás 116
Figura 25. Importancia del Clúster 121
Figura 26. Clúster del Biogás 122

Gráfico 1. Impactos positivos y negativos identificados en el componente abiótico 100100
Gráfico 2. Impactos positivos y negativos identificados en el componente biótico. 101101
Gráfico 3. Impactos positivos y negativos identificados en el componente socioeconómico 102
Gráfico 4. Actividades más impactantes del Proyecto 1033
Gráfico 5. Impactos con mayor valoración del Proyecto. 1044

Imagen 1 Estación de Bombeo de Aguas Residuales del municipio de Aracataca61
Imagen 2 Mantenimiento del Pozo cribado con el equipo de succión 63
Imagen 3 Limpieza Manual de la rejilla 64
Imagen 4 Pozo de bombas 65
Imagen 5 Desarenador de entrada a la laguna 66
Imagen 6 Laguna de oxidación del municipio de Aracataca 2018 67
Imagen 7 Laguna de oxidación del municipio de Aracataca 2021 68
Imagen 8 Canal que conduce las aguas hacia el Rio Aracataca. 69
Imagen 9 Ejemplo de biodigestor anaerobio 76

1. Resumen

El tratamiento de las aguas residuales es una de las actividades desarrolladas por los municipios para el manejo adecuado de sus residuos líquidos, las cuales se realizan desconociendo el potencial de aprovechamiento de los subproductos como lodos y biogás que pueden volver a un ciclo de suministro como materias primas, y hasta incluso generar energía eléctrica que supla las necesidades de la población y mitigue las problemáticas por la mala presentación del servicio energético. Es así, como el principal objetivo que plantea el presente trabajo de grado es determinar la viabilidad de implementación de un modelo de economía circular basado en la generación de energía eléctrica a partir del biogás originado en el tratamiento de las aguas residuales domesticas del municipio de Aracataca.

De manera inicial se realizó un reconocimiento en sitio del actual sistema de tratamiento y sus condiciones de operación, así mismo, se obtuvo la información de base del diseño del sistema y su información del comportamiento de las variables fisicoquímicas relevantes en la entrada y salida del sistema, estos datos, se convirtieron en las variables claves para realizar la estimación de la generación de biogás y la tasa de generación energética del sistema; información permitió identificar la tecnología más apropiada para la captura del biogás, siendo esta un biodigestor y a partir de allí se realizó una identificación, evaluación y análisis de los potenciales impactos ambientales y sociales que se puedan presentar por la implementación de esta tecnología como una estrategia de economía circular. Los resultados mostraron la alta compatibilidad y viabilidad de la iniciativa con los conceptos y establecimiento de un modelo de economía circular en el municipio, generando beneficios socioeconómicos y ambientales contribuyendo con el desarrollo territorial sostenible.

Palabras Claves: Biogás, Economía Circular, Aguas Residuales

2. Presentación

En el siglo XX y hasta el día de hoy el mundo utilizó como fuentes energéticas primarias (de manera prioritaria) los denominados combustibles fósiles, a saber, el petróleo, el carbón y el gas natural. Sin embargo, dadas las condiciones actuales, frente al cambio climático, se requiere reemplazar las fuentes energéticas y tecnologías de consumo tradicionales a través de un proceso de transición a fuentes de energías renovables no convencionales (Orbe, 2016). Colombia no es ajena a esta necesidad, por lo que debe explorar alternativas de generación de energía por fuentes más limpias.

El tratamiento de aguas residuales, como parte de la infraestructura del servicio de agua y saneamiento de los centros de población, se ha transformado en una infraestructura que ofrece mucho más que un tratamiento habitual. En la actualidad, están siendo redefinidas con proyectos innovadores que integran criterios de sostenibilidad y circularidad del recurso, como instalaciones de reutilización eficientes, de producción y aprovechamiento de biogás, así como de recuperación de nutrientes y de reducción de emisiones (CONAMA, 2019)

El municipio de Aracataca, en el Departamento del Magdalena posee un Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR, operada por AGUAS DE ARACTACA S.A. E.S.P., que cuenta con un sistema potencialmente apto para la implementación de un modelo de económica circular, a partir de la generación de energía renovable usando biogás, compuesto principalmente por gas metano, el cual cuenta con diferentes usos debido a sus propiedades. Entre estos la conversión de su energía química en energía eléctrica, térmica o en ambas permite aprovecharlo, por ejemplo, para generar electricidad de autoconsumo en la PTAR, como combustible vehicular, industrial o residencial (Ramírez, Medrano, & Ecobedo, 2020),.

En este sentido, el objetivo del trabajo de investigación es analizar un estudio de caso como el municipio de Aracataca, y establecer la viabilidad para la implementación de un modelo de economía circular basado en la generación de biogás a través del aprovechamiento de sus aguas residuales. Para cumplir con el objetivo propuesto, se realizará un estado de arte de diferentes escuelas económicas con el fin de fundamentar con sus enfoques el manejo y aprovechamiento de residuos líquidos. Posteriormente, se evaluará el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás originado en el aprovechamiento de las aguas residuales generadas por los sectores residenciales del municipio de Aracataca, para así realizar un análisis de los impactos ambientales y socioeconómicos que permita determinar la viabilidad de la implementación de un

modelo de economía circular y su contribución al desarrollo territorial sostenible del municipio.

Estos sistemas o modelos energéticos sostenibles traen muchas ventajas a los territorios, sin embargo, en países como Colombia se suelen recalcar los problemas y dificultades de desarrollarlos, por lo que resulta relevante proyectos de investigación como el presente, que permitan la identificación de metodologías y/o estrategias que puedan servir en el entorno nacional y local para que los municipios entiendan en qué consiste el aprovechamiento de las aguas residuales en el marco de un modelo de economía circular y cómo llevar esto a la realidad.

Finalmente, esta investigación abordará algunos ejes transversales a la generación de energía renovable a partir del biogás producido en el tratamiento de las aguas residuales domésticas municipales, como: i) la relación entre estado y sociedad para que proyectos de este tipo logren materializarse; ii) la articulación con el modelo de ordenamiento del territorio; iii) los beneficios ambientales y al desarrollo sostenible que se pueden obtener por el aprovechamiento energético de las aguas residuales.

3. Descripción de la propuesta de Investigación

3.1. Contextualización del problema

En la actualidad existe un conflicto entre la naturaleza y la sociedad moderna la cual se ha caracterizado por la globalización económica y el constante incremento en la transferencia de tecnologías de información y comunicaciones, las altas tasa de crecimiento poblacional, escases de agua y energía (particularmente convencional), aumento de los desechos sólidos y líquidos, la tensión climática a partir de cambios en la composición de la atmósfera de la tierra y la inestabilidad del sistema económico global (Moreno, 2018). No obstante, la población humana ha generado mayor conciencia respecto a esta situación y los impactos negativos que particularmente la generación de residuos sólidos y líquidos produce en el entorno, conduciendo paralelamente a la necesidad de hacer frente a la creciente escasez de recursos naturales ocasionada por el uso indiscriminado del agua, la tierra y los recursos forestales. De no existir alternativas de cambio en la sociedad con el fin de incrementar la resiliencia del sistema socioeconómico (entendido como la capacidad que le permite a una región o entidad resistirse y/o adaptarse ante las fuerzas de cambio), adaptar nuevas estrategias que permitan encaminar el futuro de la sociedad hacia un desarrollo sostenible, y mantener un equilibrio entre el crecimiento acelerado, la calidad de vida de la población y la reducción del deterioro ambiental del planeta; se pone en peligro el futuro de los recursos para las siguientes generaciones y el daño causado sobre el entorno ambiental puede llegar a ser irreversible y trascendental (Moreno, 2018).

Por otra parte, muchos países desde el siglo XIX han venido trabajando el desarrollo e implementación de matrices energéticas para atender el exigente consumo de una sociedad capitalista con un crecimiento desbordado que requería enormes cantidades de energía. El siglo XX conocido como el siglo del petróleo, se caracterizó principalmente por el crecimiento exponencial del número de vehículos, el desarrollo de la aviación y el transporte, y el avance en otro tipo de tecnologías que en conjunto requerían gran cantidad de energía. El crecimiento de la economía global para este siglo se derivó del uso de estos recursos energéticos más abundantes: petróleo, el carbón y el gas natural (Corredor, 2018). No obstante, a finales del siglo XX se comenzó a evidenciar los efectos derivados por el uso de estas fuentes de energía traducidos en impactos potenciales negativos a la salud humana y a los ecosistemas, originando a su vez un agotamiento de los recursos naturales y aumento de la vulnerabilidad de los territorios ante los efectos del cambio climático. Ya en el siglo XXI se ha profundizado mucho sobre el tema, y la comunidad científica mundial concuerda en que el cambio climático es una realidad

y que gran parte de la responsabilidad recae sobre las actividades antropogénicas. Dentro de esta responsabilidad el uso de combustibles fósiles ocupa un lugar destacado, por lo que esta situación ha llevado a muchos países a plantear la necesidad de modificar la matriz energética y reemplazar estas fuentes convencionales por otras más limpias (Corredor, 2018). Para el año 2030 se calcula un aumento de tres billones de consumidores en el mundo que generarán una importante demanda de energía, por ello es esencial revertir la lógica de descartar los desperdicios, por un modelo donde estos se reutilicen y valoricen (World Economic, 2014) . De esta forma, en la actualidad se apuesta a reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) a través de un cambio de las fuentes energéticas y las tecnologías de consumo.

Por lo cual, surge el Acuerdo de París como un nuevo tratado internacional que se adoptó en 2015 durante la Conferencia de las Partes - COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este es un acuerdo universal y vinculante que busca reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza. La agenda para la acción climática Lima-París, incentivada por el gobierno de Perú y Francia –anfitriones de la COP 20 y 21– buscaba desarrollar acciones ambiciosas entre diferentes actores estatales y no estatales para hacerle frente al cambio climático. Esta agenda giró en torno al tema de bosques, agricultura, transporte, energía renovable, eficiencia energética, resiliencia, ciudades sostenibles, construcción, sector corporativo, finanzas privadas y gases contaminantes de corta vida; donde más de 11.000 compromisos encaminados a reducir las emisiones en estos sectores se registraron durante la COP21 (García Arbelaez, Vallejo, Higgings, & Escobar, 2016).

En este contexto en Colombia, se anunció en el año 2015, durante el mandato del entonces Presidente Juan Manuel Santos, el compromiso de reducir el 20 % de las emisiones de GEI para 2030, no obstante, en noviembre del 2020, el actual presidente Iván Duque, anuncio la actualización de la meta al comprometerse con emitir como máximo 169.44 millones de t CO2 eq en 2030, equivalente a una reducción del 51% de las emisiones respecto a la proyección de emisiones en 2030 en un escenario de referencia, compromiso que se enmarco en el proceso de actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia, conocida como NDC “la hoja de ruta del país para establecer acciones para enfrentar los efectos del cambio climático de cara a los próximos 10 años”, este compromiso implica fortalecer acciones como la transición energética, la movilidad limpia, la lucha contra la deforestación, la siembra de 180 millones de árboles, el Pago por Servicios Ambientales y la conservación de la Amazonía y de los páramos, así mismo aborda 29 medidas en adaptación y más de 30 en mitigación del cambio

climático (MADS, 2020). Cabe destacar que, en el escenario de referencia de emisiones GEI, desarrollado por Colombia enmarcado en la Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC), se posiciona el sector energía como el segundo mayor generador de GEI con una proyección a 2030 de 124,80 Mt CO_2 eq (MADS, 2020).

Adicionalmente, según el Ministerio de Minas y energías, Colombia cuenta con una de las matrices de generación de energía eléctrica más limpias del mundo ya que cerca del 70% de la energía que consume el país proviene de fuentes hídricas, un 12,3% de termoeléctricas que utilizan gas natural para su operación, un 9,3% de térmicas a carbón, el 7,8% se genera a partir de combustibles líquidos como la gasolina y el diésel y un 1% a partir de fuentes no convencionales de energías renovables como la solar y la eólica (Ministerio de Minas y Energías, 2020), no obstante, según datos de la UMPE la oferta de energía primaria en Colombia está compuesta predominantemente por combustibles fósiles (carbón y petróleo), con una participación cercana al 77% del total mientras que la hidroelectricidad, el gas natural y las fuentes no convencionales de energía renovable (bagazo, biocombustibles, biogás y leña) suman el restante 23% (UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, 2019). Si bien la oferta de combustibles fósiles es alta, estas reservas se están agotando, por consiguiente, no es sostenible su extracción a largo plazo y las alternativas de desarrollo de yacimientos no convencionales y campos costa afuera, tienen costos ambientales elevados. En cuanto a la alta concentración en los recursos hídricos para la generación de energía, se hace altamente vulnerable ante eventos de variabilidad climática como el Fenómeno de El Niño. De acuerdo con Naciones Unidas, el 90% de la meta de reducción de emisiones de CO_2 que se requiere a nivel global para el año 2050 dependerá de una mayor incorporación de energías renovables, un uso cada vez más eficiente de los recursos energéticos y de la electrificación de nuestras sociedades y de la economía (Ministerio de Minas y Energías, 2020). En conclusión, se debe iniciar un proceso de transición hacia una economía productiva menos contaminante con la ayuda de un cambio en los esquemas de producción tradicionales mediante acciones inmediatas (Moreno, 2018).

La región Caribe Colombiana es altamente vulnerable al déficit energético, situación que se vio reflejada desde el año 1992, con el racionamiento de energía eléctrica causado por el fenómeno de El Niño, poniendo en evidencia los problemas estructurales y financieros que aquejaban al sector eléctrico, especialmente en la región Caribe.; lo cual llevó al gobierno nacional a diseñar una estrategia que permitiera reorganizar el sector y modificar su tendencia deficitaria, para asegurar la adecuada prestación del servicio. Es así, como en 1994 el Gobierno Nacional impulsó la expedición de las leyes 142 y 143, abriendo la posibilidad para que

particulares participaran de la prestación de los servicios públicos, donde el Estado se concentre en las actividades de planeación, regulación, control y supervisión del servicio, cediendo al sector privado las actividades de orden empresarial (Mateus, 2016).

En el año 1997 en el caso del Magdalena, la empresa prestadora del servicio Electrificadora del Magdalena, Electromag S.A., quien operaba en tres zonas: Ciénaga (Zona Bananera), Aracataca-Fundación-Pivijay y El Banco-Plato-Guamal-Salamina, presentaba según lo manifestó la controlaría en su momento, deficiencias en el suministro de energía, lo que se reflejaba en los continuos apagones, así como en las quejas de los usuarios y aseguró que Electromag S.A., no ha adelantaba programas efectivos de mantenimiento de líneas y redes, por lo que aumentaba el estado de obsolescencia y deterioro de los equipos y se hacían continuas las interrupciones del servicio (EL TIEMPO, 1997).

En virtud de lo anterior y los malos manejos financieros, el Gobierno decidió liquidar las electrificadoras existentes entre estas, Electromag y creo cinco nuevas empresas para la prestación del servicio públicos, entre las cuales se encontraban Electricaribe y Electrocosta, que realizarían las actividades de distribución y comercialización de energía, producto de este proceso en agosto de 1998 Electricaribe y Electrocosta fueron capitalizadas en un 65% por el consorcio conformado entre Houston Industries y La Electricidad de Caracas. Estas dos compañías posteriores a su estabilidad operativa y financiera se fusionaron en 2007, resultando Electricaribe, como el operador del servicio. Pese a todos estos esfuerzos prevaleció el alto grado de subnormalidad eléctrica, para la población de la costa cerca de un 40% y que representa el 92% la subnormalidad nacional, Electricaribe manifestó que esto era producto de la crisis económica en parte al robo de energía y la inviabilidad financiera (EL TIEMPO, 1997).

Según el diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia del año 2017, realizado por la Dirección técnica de gestión de energía del Departamento Nacional de Planeación DNP, Electricaribe S.A. reporta para el indicador SAIDI, el cual mide en horas y da cuenta de la duración promedio de las interrupciones percibidas por un usuario conectado a un sistema de distribución de energía eléctrica, un valor mayo a 90 horas, o lo que es lo mismo, 3 días y 18 horas sin servicio de energía eléctrica, valor que es más del doble de la duración promedio del país, ELECTRICARIBE S.A. E.S.P. reporta un valor de SAIDI que es más de tres veces el valor del indicador del país que es de 20 horas. En el caso del indicador SAIFI, el cual mide la cantidad de veces promedio que se presenta una interrupción para un usuario conectado al sistema de distribución local, ELECTRICARIBE S.A. E.S.P. Obtuvo valor mayor a 110 veces, superando el valor del país, que es de 51,3

veces. Por otro lado, en el mismo diagnóstico se establece que esta compañía dejo de reportar información de interrupciones para cerca de mil quinientos transformadores de distribución; y finalmente concluyó que los usuarios de ELECTRICARIBE S.A. E.S.P. reciben el servicio de energía eléctrica con el indicador de continuidad más bajo del país (DNP, 2018).

En el caso puntual del departamento del Magdalena para el año 2015, los usuarios del servicio de energía eléctrica presentaron 23.972 peticiones, quejas y reclamos. En este departamento tanto el mayor número de horas como la mayor cantidad de interrupciones del servicio se presentaron en la zona del municipio de Ciénaga hasta Fundación abarcando las poblaciones: Riofrío, Santa Rosalía, Guacamayal, Manzanares, Tucurinca y Aracataca (Vence, 2016). Así mismo en este mismo año, según datos de la Alcaldía Municipal de Aracataca, el municipio tenía una cobertura del servicio del 94% en la cabecera municipal; caracterizado por presentar fallas ocasionalmente por el mantenimiento no adecuado a líneas de interconexión. En la zona rural es prestado en forma irregular, con permanentes y prolongados racionamientos.

Según el Informe de Evaluación Integral de Prestadores de servicio de Aracataca elaborado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en el año 2018, se presentaron riesgos potenciales que pueden afectar el funcionamiento de los servicios públicos del municipio, como el desbordamiento de las aguas residuales por taponamiento de alcantarillado producto de la falta de energía eléctrica en las estaciones de bombeo de aguas residuales o suspensión total del fluido eléctrico, donde a su vez se plantea como medida correctiva el plantear la posibilidad de autogeneración de energía con otra fuente alterna, de tal forma que no se suspenda el fluido eléctrico (Vence, 2016).

Bajo este escenario Electricaribe fue intervenida en 2016 por Superservicios, dando lugar posteriormente a su liquidación, consolidándose el 1 de octubre de 2020, cuando Electricaribe desaparece como empresa de energía eléctrica, y el servicio eléctrico de los departamentos del Caribe Colombiano son asumidos por las empresas AFINIA Grupo EPM y AIR-E, siendo la compañía A-IRE, quien distribuye energía en los departamentos de Atlántico, Magdalena y Guajira. Posterior a esta transición, se continua con la alta vulnerabilidad a una crisis energética en la costa Caribe, causada en gran potencia por los efectos del cambio climático sobre eventos como el Fenómeno del Niño, con la falta de previsiones del gobierno colombiano y la aun deficiente calidad en la prestación del servicio de energía, expreso, en las inconformidades que a través de medios de comunicación locales reporta en especial la comunidad de Aracataca, donde indican que debido a los cortes de energía que superan hasta las 8 horas sin el fluido eléctrico, por

causa del mal servicio que presta la empresa de energía eléctrica; tienen que pasar sus días con gran malestar, enfrentando la inseguridad por la penumbra en la que pasan sus noches, en la que muchos antisociales salen a atracarlos; sumado a esto, la ola de calor que se presentan en tiempos de fuerte verano por los que atraviesa esta parte del departamento del Magdalena. Ante esta situación los "cataqueros" están solicitando insistentemente solución a los problemas que se presentan con el servicio de energía y lo referente a la ampliación de la electrificación rural (El Artículo, 2020).

En ese orden de ideas, el modelo de economía circular a través del aprovechamiento energético del biogás generado a partir de las aguas residuales producidas por las actividades domésticas de los pobladores de un territorio, se propone como una alternativa de solución que permite atender dicha problemática y contribuir al crecimiento económico de la sociedad, la sustentabilidad ambiental y la disminución de los riesgos por la volatilidad e incertidumbre de precios de las materias primas y los recursos energéticos. Por otra parte, con el trámite de ingreso a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que agrupa a 35 países que generan el 80% de la producción mundial y promueven políticas que mejoran el bienestar económico y social de las personas alrededor del mundo, a Colombia se le hace ineludible implementar el modelo económico circular que se propone como un camino para crear procesos de producción y consumo sostenibles. Este modelo se debe replicar en todos los rincones del país, y constituye un desafío y también una gran oportunidad, ofrece no solamente una mayor eficiencia en el uso de los recursos, sino que sus soluciones podrán mejorar la competitividad de las empresas y las regiones y crear oportunidades para inversiones sostenibles (Moreno, 2018).

En relación con la problemática anterior este proyecto busca responder la siguiente pregunta ¿Es viable implementar un modelo de economía circular basado en la generación de biogás a través del aprovechamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Aracataca?

Sistematización del problema

- ¿Cuál es el sistema de captación y aprovechamiento energético del biogás generado a partir de las aguas residuales domésticas?
- ¿Cuál es el potencial de generación de biogás producido a partir del aprovechamiento de las aguas residuales de origen doméstico del municipio de Aracataca?

- ¿Cuáles son los impactos ambientales y socioeconómicos que permiten determinar la viabilidad de implementación de un modelo de economía circular en el municipio de Aracataca?

3.2. Motivación y justificación

El crecimiento acelerado de la economía, y el aumento de la población, ha generado una alta demanda de recursos naturales principalmente de recursos energéticos, que implica directamente una aceleración en la dinámica del mercado y por ende una problemática ambiental, donde se hace imprescindible que exista un equilibrio entre el desarrollo económico, el medio ambiente y el entorno social; por lo cual, la implementación del modelo económico circular posibilitará que los territorios se encaminen a la planeación estratégica sostenible de sus actividades, por medio de técnicas y tecnologías que satisfagan la demanda energética y generen una economía amigable con el entorno gracias a la gestión de los residuos, como son las aguas residuales de origen domestico del territorio.

El modelo económico colombiano es intensivo en el uso de energía, por lo que el principal reto del sector eléctrico en este contexto es cómo y a partir de que fuentes suministrar suficiente energía para poder cubrir esta demanda creciente. Esta situación ha provocado una fuerte exposición a la volatilidad de los precios del petróleo, las sequias y, en última instancia, ha incrementado el coste de energía en la región. Además, en el caso específico del municipio de Aracataca, se afronta una crisis energética reflejada en la disminución de la capacidad del suministro de energía, mala prestación del servicio y agotamiento de los recursos energéticos; por lo que con este proyecto de investigación se estarían generando fuentes de energía alternativas en el territorio, que además de suplir la demanda de la población y mejorar sus condiciones de vida, se caractericen por ser amigables con el ambiente disminuyendo así los índices de contaminación ambiental.

Por otro lado, esta investigación pretende identificar las potencialidades para la generación de energías a través del biogás producido por las aguas residuales domesticas del el municipio de Aracataca en el Departamento del Magdalena, lo cual permitirá identificar potencialmente beneficios tales como la diminución de los costos del suministros de energías, incentivos tributarios por parte del estado, potencial de desarrollo de la industria y la economía en la región al poder ofrecer a empresas, una fuente de abastecimiento de energía confiable y de bajo costo, entre otros.

Así mismo, dada la ausencia de trabajos de investigación en la temática abordada, el proyecto de investigación permitirá sentar las bases técnicas y científicas en el municipio de Aracataca en materia de generación del conocimiento y apropiación de sistemas para el aprovechamiento del biogás producido a partir de las aguas residuales, contribuyendo al proceso de articulación entre el estado y la academia representada por los institutos de investigación y centros educativos.

Aunado a lo anterior, con el desarrollo de esta investigación se establecen los lineamientos para la implementación de este tipo de estrategias mediante la configuración de un modelo de economía circular que garantice la sostenibilidad de la dimensión económica garantizando el crecimiento económico, dimensión social garantizando el progreso social y dimensión medioambiental garantizando la efectiva protección del medio ambiente y el uso racional de los recursos.

3.3. Objetivos

3.3.1. General

- Determinar la viabilidad de implementación de un modelo de economía circular basado en la generación de energía eléctrica a partir del biogás originado en el aprovechamiento de las aguas residuales domesticas del municipio de Aracataca.

3.3.2. Específicos

- Describir las principales características de un sistema de captación y aprovechamiento energético del biogás generado a partir de las aguas residuales domésticas del municipio.

- Evaluar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás originado en el aprovechamiento de las aguas residuales domesticas del municipio de Aracataca.

- Identificar y valorar los impactos ambientales y socioeconómicos que permitan determinar la viabilidad de implementación de un modelo de economía circular en el Municipio de Aracataca.

4. Marco Teórico

El marco teórico es organizar de manera sistematizada la información que le da soporte teórico a la investigación., en este caso se desarrollan las distintas teorías relacionadas con nuestro estudio de caso “Economía Circular en Aracataca, Magdalena: Generación de Biogás Mediante el Aprovechamiento de Aguas Residuales Domésticas”. Las bases teóricas y referencias de bibliografía se refieren en primera instancia a una introducción a la economía circular donde destacamos los antecedentes, principios y sus características, posteriormente se hace énfasis en la matriz energética mundial y nacional, para así contextualizar sobre los distintos escenarios de transición energética para Colombia, donde se destacan las fuentes renovables no convencionales como uno de los principales mecanismos.

Es así, como se profundiza sobre la relevancia de la economía circular en estos escenarios de transición energética, que permita abordar los principales conceptos sobre la generación de energías renovable puntualizando en el biogás como eje central de la investigación, y que permitirá comprender teóricamente la descripción del sistema de captación y aprovechamiento energético que se pueda implementar en el municipio de Aracataca.

4.1. Introducción a la Economía Circular

El sistema de producción lineal y consumo no ha cambiado desde hace más de un siglo. Con el inicio de la revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVIII se fomentó una transformación en los lentos sistemas de producción gracias a diversos factores, como el desarrollo tecnológico, el desarrollo organizacional, la globalización de mercados y recursos, la disponibilidad de energía asequible, y la mano de obra, sin embargo, la sociedad actual aún se basa en la extracción de materia prima, la producción de bienes, el consumo desmedido y la generación de altos volúmenes de residuos tanto sólidos como líquidos. Así mismo, en términos de desarrollo y bienestar, el sistema lineal ha sido provechoso, sin embargo, no es sostenible a causa del aumento de la población, el incremento de la intensidad material y energética que amerita, no obstante, se fortalece por el crecimiento del consumo, actividad que no es compatible en un planeta de recursos limitados, de la misma manera, la capacidad de adaptación al creciente impacto de las emisiones de agentes contaminantes. Es así, como surge el concepto de economía circular que busca desasociar el uso de recursos naturales por parte del hombre (Moreno, 2018).

Lo anterior, se corrobora con el Informe del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas World Population Prospects. The 2017 Revisión (en español “Revisión de las Perspectivas de Población Mundial”) indica que hay un 95 % de probabilidades de que la actual población mundial, de 7 600 millones de habitantes a mediados del 2017, se sitúe entre los 8 400 y 8 700 millones en 2030, entre 9 400 y 10 200 millones en 2050, y entre 9 600 y 13 200 millones en 2100. Aproximadamente, cada año se añaden 83 millones de personas a la población mundial, y se espera que continúe la tendencia en alza, aun suponiendo que los niveles de fecundidad sigan disminuyendo. Por tanto, y ante esta situación, surgen, con renovada fuerza, planteamientos para afrontar el necesario cambio de paradigma de la economía convencional mediante un nuevo modelo de producción y consumo sostenible. Así se plantea una nueva economía ecológicamente racional, ecoeficiente e inclusiva, actuando sobre las causas fundamentales de los desequilibrios, vale decir, sobre las actuales pautas económicas no solo de producción y consumo, denominada economía verde, que ha constituido un eje fundamental en la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible de 2012 (comúnmente conocida como la Cumbre de Río +20) tal como ha quedado plasmado en su documento final denominado El Futuro que Queremos.

La delimitación del concepto economía circular o economía verde “*green economy*” no es simple, pero se puede afirmar que es un conjunto de modelos de producción integral que toma en consideración variables ambientales y sociales, produce bajas emisiones de carbono, utiliza los recursos de forma eficiente y es socialmente incluyente (Martínez & Porcelli, 2018). Como se ha mencionado, la economía circular propone un cambio radical en los sistemas de producción y consumo, fortalece el desarrollo socioeconómico a escala local por medio de la cohesión social e integración que se refleja en la creación de puestos de trabajo, adicionalmente, reduce los daños irreversibles en el clima, la biodiversidad y la salud humana producidos por la generación de residuos y las emisiones de gases efecto invernadero. En este enfoque, el residuo pierde su condición de tal y se convierte en la materia prima o se transforma para hacer parte de nuevos productos tecnológicos con un mínimo gasto energético. Se considera un modelo cíclico que imita a la naturaleza y se conecta con ella, por lo anterior es necesario que los territorios y las empresas incluyan internamente políticas amigables con el medio ambiente a través de la disminución de residuos y la prolongación del ciclo de vida de los productos (Moreno, 2018).

El modelo de economía circular plantea sistemas regenerativos y restauradores, con el fin de mantener el valor de los recursos (materiales, agua, suelo y energía) y de los productos, reduce insumos de materias primas y recursos energéticos e impulsa la innovación y eficiencia empresarial, así como la

competitividad y sostenibilidad de un territorio. Este modelo trata en definitiva de desvincular el desarrollo económico global del consumo de recursos finitos, se concibe como un ciclo de desarrollo positivo continuo que preserva y mejora el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar reservas finitas y flujos renovables (EMF, 2014).

Como se puede identificar, este modelo lleva el nombre de circular porque precisamente pretende hacer una transición de una economía extractivista lineal, donde se extraen las materias primas agotando las reservas, se transforma, se comercializa y se generan residuos que son dispuestos a través de diferentes métodos sin regresar nuevamente al proceso o cicla de vida de un producto; por un modelo que como plantea (Moreno, 2018) “cierre el círculo” con respecto a los ciclos de vida de los productos a través de un mayor reciclado y reutilización de estos, con el fin de que beneficien tanto al medio ambiente como a la economía, en otras palabras, extrae el máximo valor y uso de las materias primas, productos y residuos, para fomentar el ahorro energético y reducir el deterioro ambiental. El uso eficiente de los recursos genera rentabilidad y se reducen costos para la sociedad, por ello es vital conservar el capital natural. Colombia tiene bastantes ventajas comparativas en relación con otros países, por lo anterior, el crecimiento verde es la plataforma del futuro para impulsar un crecimiento económico con base en la biodiversidad y riqueza de recursos naturales con los que cuenta el país.

4.1.1. Antecedentes de la Economía Circular

Las grandes escuelas de pensamiento relacionadas con la economía circular surgieron en los años 70, gracias a un pequeño número de académicos, líderes de pensamiento y empresas, pero recién a partir de la década de los 90 cobraron importancia. A continuación, se mencionarán las principales filosofías que confluyeron en el modelo circular (Martínez & Porcelli, 2018):

1) Diseño Regenerativo (Regenerative Design): John T. Lyle, profesor Universidad P. de Pomona (California), postuló que cualquier sistema —partiendo de la agricultura— se puede organizar de forma regenerativa, emulando el funcionamiento de los ecosistemas, donde los productos se crean e interaccionan sin producir residuos. Podría decirse que sentó las bases del marco de la economía circular, que se desarrolló especialmente y ganó notoriedad gracias a McDonough, Braungart y Stahel.
2) Economía del Rendimiento (Performance Economy): en 1976, el arquitecto y economista Walter Stahel, acreditado por ser el inventor de la expresión “Cradle to Cradle” (de la cuna a la cuna), esbozó la visión de una economía en bucles —o economía circular—y su impacto en la creación del empleo, en la competitividad económica, en el ahorro de

recursos y en la prevención de residuos. Persigue cuatro objetivos principales: la extensión de la vida del producto, los bienes de larga duración, las actividades de reacondicionamiento y la prevención de residuos. Además, insiste en la importancia de la venta de servicios en lugar de productos.

3) De la Cuna a la Cuna. Cradle to Cradle. C2C: el químico y visionario alemán Michael Braungart desarrolló, junto con el arquitecto estadounidense Bill McDonough, el concepto Cradle to Cradle (de la cuna a la cuna) en oposición a cradle to grave (de la cuna a la tumba) propio de la economía lineal. En el año 2002 publicaron el libro De la cuna a la cuna. Rediseñando la forma en que hacemos las cosas (en inglés: Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things) en cual exponen una nueva forma de interpretar el ecologismo, o como la denominan: la próxima Revolución Industrial. A diferencia de la consigna principal del ecologismo centrada en “reducir, reutilizar y reciclar”, estos autores plantean un cambio de premisa, proponiendo que se aborden los problemas desde su misma raíz, vale decir, que los productos se diseñen y conciban sin necesidad del gasto de energía, incluso que el balance de gastos y aportes sea positivo. Esta filosofía de diseño considera a los materiales involucrados en los procesos industriales y comerciales como nutrientes, clasificándolos en técnicos y biológicos. Los pilares en los cuales se asienta esta filosofía básicamente son: a) eliminar el concepto de residuos: parten de la premisa de que los residuos equivalen a alimentos. En los ecosistemas del planeta, no existe la basura, por tanto, la sociedad puede hacer lo mismo diseñando todos los productos, de modo que los materiales se reciclen en el mismo uso, o bien se reciclen “hacia arriba”, es decir que el siguiente uso tenga más valor que el actual. Los productos y procesos se diseñan para ser indefinidamente retomados por la naturaleza (biosfera) o por las fábricas (tecnosfera), pasando del actual sistema de reciclaje imperfecto e insuficiente al upcycling; b) hacer uso de la energía renovable, y c) celebrar la diversidad: gestionar el uso del agua para maximizar la calidad, promover ecosistemas saludables y respetar los efectos a nivel local. En consecuencia, persigue ayudar a crear una mejor sociedad más allá de la idea de sostenibilidad convencional, a partir del buen diseño de productos, bienes y servicios. Como se puede identificar, el uso de la energía renovable a través del aprovechamiento de residuos propendiendo por la disminución en la generación de los mismos, es la articulación de dos de los pilares de esta corriente filosófica de la economía circular.
4) Ecología industrial (Industrial Ecology IE): a menudo denominada “ciencia de la sostenibilidad”, tiene sus orígenes contemporáneos en un artículo

publicado en 1998 intitulado “Strategies for Manufacturing” de Robert Frosch y Nicholas Gallopoulos. Consiste en un enfoque del diseño industrial de productos y procesos buscando que se utilicen de manera más eficiente los recursos, que se mejore la calidad de vida humana y ambiental y que resurja ante todo la equidad social. Por otra parte, pretende que los actuales sistemas industriales se organicen de manera más equilibrada, para obtener productos o sustancias cuyo consumo satisface sus necesidades, haciendo posible la supervivencia del sistema. Adopta un punto de vista sistémico, diseñando los procesos de producción atendiendo a las restricciones ecológicas tratando de darles forma para que sean lo más parecido posible a los sistemas vivos. Finalmente, la ecología industrial no solo apunta hacia los temas de contaminación y ambiente, sino que revisten igual importancia las tecnologías, la economía de los procesos y la interrelación entre los negocios, financiación y política gubernamental, por lo cual no solo se presenta como una opción efectiva para la protección del ambiente, sino también para optimizar el uso de los recursos naturales no renovables. En consecuencia, presenta como novedad la capacidad de combinar los estudios de cada sector mediante procesos integradores, para lo cual requiere del dominio de disciplinas muy diversas como la ingeniería, física, química, ecología, derecho, economía, filosofía y ecodiseño.

5) Biomimesis (“Biomimicry”): es la disciplina científica que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración. No se trata simplemente de copiar a la naturaleza, sino de hacerlo como ella: sin generar residuos, de forma fácil y ahorrando energía. Se basa en tres principios fundamentales: la naturaleza como modelo, como medida y como mentor. Presenta un gran compromiso ecológico y es fundamental el rol de los ecosistemas ya que propone que el sistema socioeconómico los emule. Como bien afirmó el biólogo alemán Frederic Vester, citado por Pérez, “la naturaleza es la única empresa que nunca ha quebrado en 4 000 millones de años”.
6) Economía Azul (Blue Economy): impulsada por Gunter Pauli, consideró que la denominada economía verde solo era para ricos y poco sostenible, a diferencia de la economía azul que se inspira en la tierra. Presenta puntos de contacto evidentes con los postulados del Cradle to Cradle y los fundamentos de la biomimesis. Se trata de un concepto holístico e innovador en el planteamiento empresarial, que emula los ecosistemas naturales para ser eficientes en la producción de bienes y servicios, con responsabilidad compartida y respeto para las generaciones futuras. En 1994 Pauli puso en marcha ZERI (siglas en inglés de Emissions Research and Initiatives, en español: Iniciativa e Investigación de Emisiones Cero), una red global para extender sus ideas. Desde entonces, ha creado 50

000 empleos y más de 1 500 empresas, con proyectos como el cultivo de hongos comestibles de alta calidad con desechos de café, detergentes biodegradables con restos de cáscaras de naranja o la transformación de gasolineras en estaciones de recarga para vehículos eléctricos.

7) Capitalismo Natural (Natural Capitalism): el capitalismo es el uso productivo y la reinversión del capital; sin embargo, el capital comprende no solo dinero y bienes, sino también gente y naturaleza, que son aún más valiosas. Lovins profetiza que el capitalismo natural subsumirá al capitalismo industrial como el capitalismo industrial subsumió al agrarismo. El capitalismo natural es una propuesta de desarrollo empresarial y social impulsada por el Rocky Mountain Institute (RMI) de Estados Unidos y elaborada por los expertos Paul Hawken y Amory Lovins. Su tesis básica es que hay que pasar de la economía del consumo a la de los servicios y reinvertir los beneficios obtenidos en garantizar la conservación de los recursos naturales. Las propuestas básicas para avanzar hacia un nuevo desarrollo minimizando el daño a los ecosistemas son: aumentar la productividad natural de los recursos reduciendo los desperdicios y el flujo destructivo de recursos, cambiar hacia modelos de producción inspirados en la naturaleza, avanzar hacia un modelo de negocio basado en las soluciones y no en los productos, impulsar un nuevo modelo socioeconómico que se sustente en el flujo de servicios y reinvertir en capital natural; el negocio debe reponer, sostener y expandir los ecosistemas del planeta.

4.1.2. Principios y Características de la Economía Circular

La economía circular se basa en tres principios claves, cada uno de los cuales aborda varios de los retos en términos de recursos y del sistema a los que han de hacer frente las economías industriales (Martínez & Porcelli, 2018):

- ✓ Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables: de necesitarse recursos, el sistema circular busca que sean diseñados mediante un ciclo de desensamblado y reutilización y elige, en la medida de lo posible, tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento. En esencia, busca que los productos sean diseñados y optimizados mediante un ciclo de desensamblado y reutilización. En este principio se identifican dos pilares: el ecodiseño y la economía funcional, a los que se añade la reducción del derroche. El diseño ecológico considera el impacto ambiental durante el diseño del producto.
- ✓ Principio 2: Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo

momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos: implica diseñar para refabricar, reacondicionar y reciclar —las tres R— para mantener los componentes técnicos y materias circulando. En el caso de los componentes técnicos, se diseñan desde su inicio para la reutilización, y los productos sujetos a rápidos avances tecnológicos se están diseñado para ser actualizados. El primer paso consiste en la reutilización (recuperar un producto a utilizar sin cambiar su forma o función). Pero puede ser que sea necesaria su reparación, es la renovación o la remanufactura, pero cuando no se puede usar, a veces es posible utilizar parte del mismo para crear otro objeto, entonces se trata de refabricación, llegando incluso al up-cycling, cuando el valor del objeto recién creado es mucho mayor que el valor del objeto original. Por último, se llega al final de la vida útil de un producto y para poder valorizar más todos los materiales que lo constituyen es necesario el reciclaje.

- ✓ Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos. Incluye reducir los daños al uso humano, tales como los relacionados con los alimentos, la movilidad, la vivienda, la educación, la salud y el ocio. Además, la energía requerida para este ciclo debería ser renovable por naturaleza, para disminuir la dependencia a los recursos y aumentar la capacidad de recuperación del sistema (por ejemplo, frente a una crisis del petróleo).

Así mismo, una economía circular se define a partir de las siguientes características fundamentales: a) los residuos se eliminan del diseño (basura=alimento), b) la diversidad genera solidez y la energía necesaria para impulsar la economía circular debe ser de carácter renovable, para reducir la dependencia de los recursos e incrementar la resiliencia de los sistemas, c) pensar en sistemas: muchos elementos del mundo real, como empresas, personas o plantas, forman parte de sistemas complejos en los que las distintas partes están fuertemente vinculadas entre sí. En una economía circular, estos vínculos se tienen en cuenta en todo momento, d) los precios deben decir la verdad: los precios u otros mecanismos de retroalimentación deben reflejar los costes reales ya que los precios actúan como mensajes, y e) reemplazo del concepto de consumidor por el de usuario: la economía circular trae aparejada una nueva relación entre los consumidores y las cosas (Martínez & Porcelli, 2018).

Por lo cual, se puede analizar después de interpretar todas las corrientes filosóficas, principios y características de la economía circular, que existen elementos comunes como la reutilización de los residuos sólidos y líquidos, promoción del uso de energías renovables incentivando una transición energética y los sistemas económicos que sean amigables con el ambiente y propendan por un desarrollo sostenible; por lo que la economía circular surge como una alternativa

para seguir creciendo sin comprometer los recursos naturales, en otras palabras, seguir creciendo y al mismo tiempo disminuir el consumo de recursos y los impactos ambientales.

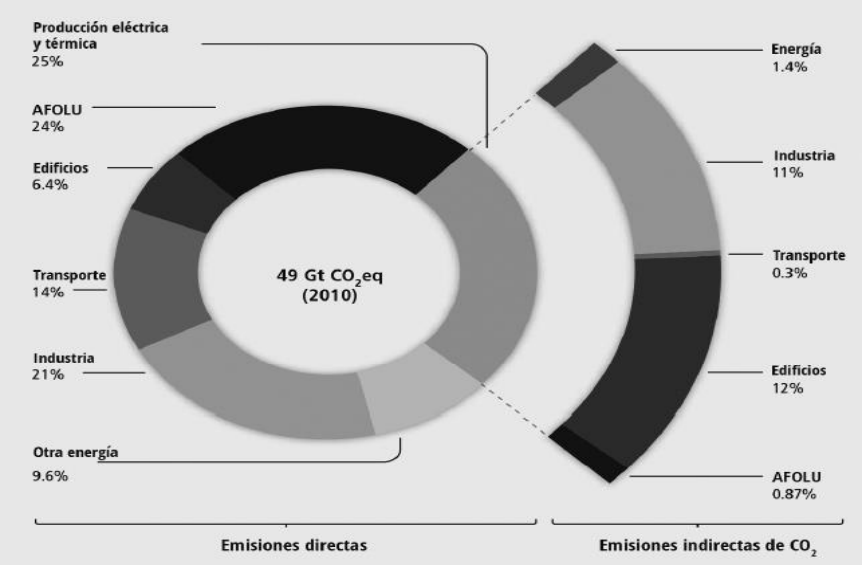
4.2. Transición energética

Las evidencias del cambio climático son claras. El incremento de la temperatura media de la tierra en el periodo 1910-2016 es de aproximadamente 1,4ºC, cifra que se considera alta si se tiene en cuenta la gran sensibilidad de las especies a este parámetro. Por otra parte, en lo que va corrido del siglo XXI el incremento ha sido de 0,5ºC, es decir casi el 40% del incremento de todo el siglo anterior. Según datos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850 (IPCC, 2014).

El informe del IPCC (2014a, 2014b) plantea además que: desde mediados del siglo XIX, el ritmo de la elevación del nivel del mar ha sido superior a la media de los dos milenios anteriores (nivel de confianza alto). Durante el periodo 1901-2010, el nivel medio global del mar se elevó 0,19 [0,17 a 0,21] m […] En los últimos 800 000 años, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso han aumentado a niveles sin precedentes. Las concentraciones de dióxido de carbono han aumentado en un 40% desde la era preindustrial debido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de los combustibles fósiles y, en segundo lugar, a las emisiones netas derivadas del cambio de uso del suelo. Los océanos han absorbido alrededor del 30% del dióxido de carbono antropógeno emitido, provocando su acidificación (IPCC, 2014).

Esta conclusión resulta muy importante en los análisis que se puedan hacer sobre las perspectivas de la variación de la temperatura en el presente siglo. Se han estudiado diversas causas de este fenómeno, algunas de ellas naturales, como erupciones volcánicas o movimientos geológicos, pero en lo que todos concuerdan es que gran parte del problema es antropogénico: diversos sectores como la agricultura, la deforestación, el transporte, la generación de electricidad, la actividad industrial, entre otras, hacen sus aportes a las emisiones de GEI. Sin embargo, los usos energéticos asociados a combustibles fósiles como la generación eléctrica, el uso de combustibles en industria y transporte, son la principal fuente de emisión de GEI, como se puede observar en la Figura 1 (Corredor, 2018).

Figura 1 Emisiones de GEI por sectores económicos



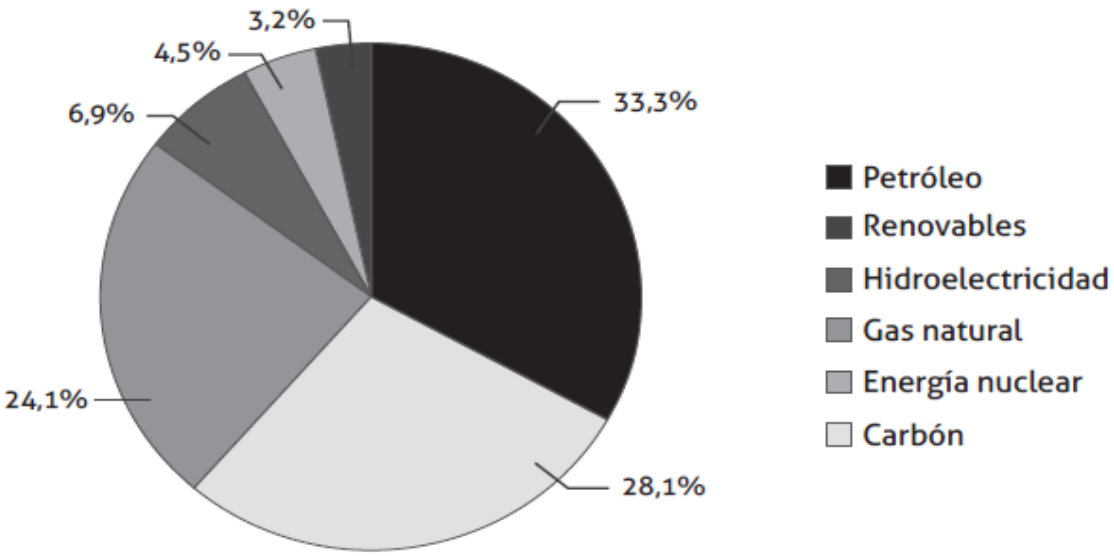
Fuente: Tomado de IPCC (2014b, p. 9).

En este contexto, resulta muy importante analizar la matriz energética mundial y la del país para evaluar que se está haciendo para resolver este problema de dimensiones globales y de consecuencias aún impredecibles.

4.2.1. Matriz energética Mundial

La utilización de fuentes de energía primaria en el mundo se concentra fundamentalmente en los combustibles fósiles convencionales (petróleo, gas natural y carbón). El 85,5% del consumo mundial de energía proviene de estas tres fuentes, mientras que el 4,5% proviene de la energía nuclear, el 6,9% de la hidroelectricidad y tan solo el 3,2% de las fuentes renovables no convencionales (BP, 2017) (ver Figura 2)

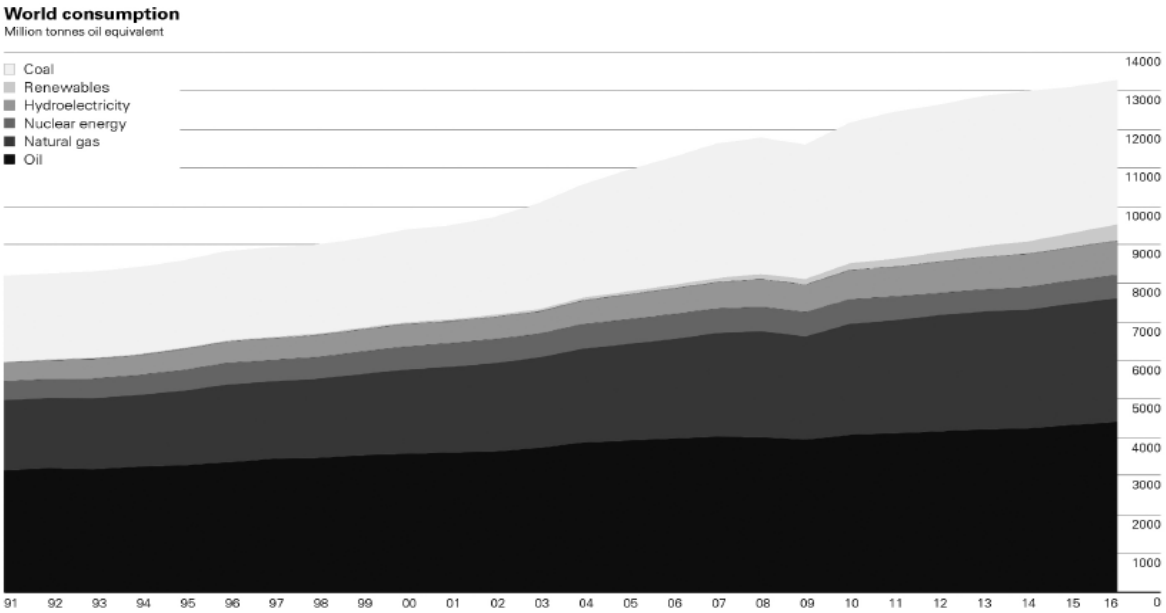
Figura 2 Consumo mundial de energía primaria 2016



Fuente: Corredor (2018, p. 112)

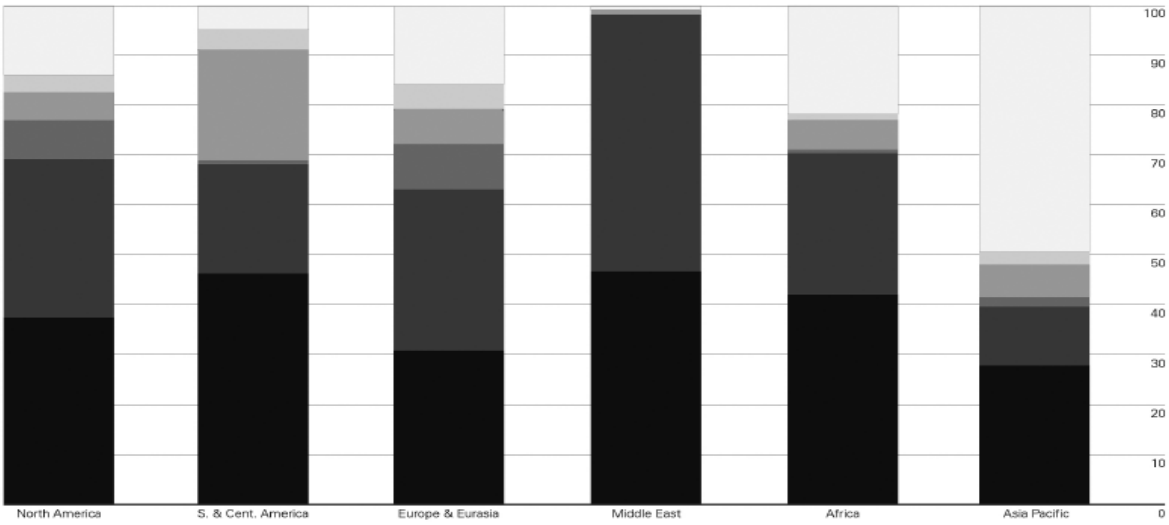
Esta situación es aún más preocupante si se considera que en los últimos años el cambio de la matriz ha sido muy lento como lo muestra la Figura 3. Como se observa, la penetración de las fuentes renovables que se empieza a percibir en los primeros años del presente siglo es aún minúscula, mientras la utilización del carbón, el petróleo y el gas siguen dominando la escena energética mundial. El análisis regional de la matriz de consumo de energía, indica que la zona de Centro y Sur América tiene una matriz más limpia que en otras regiones del mundo debido a la mayor presencia de la hidroelectricidad, especialmente en países como Brasil y Colombia. Sin embargo, en esta región la dependencia del petróleo es más alta que en el resto de regiones del planeta. La Figura 4 muestra la situación para las diferentes regiones del mundo respecto a la matriz energética de consumo.

Figura 3 Consumo mundial de energía 1991-2016



Fuente: Corredor (2018, p. 113)

Figura 4 Consumo energético regional por fuente

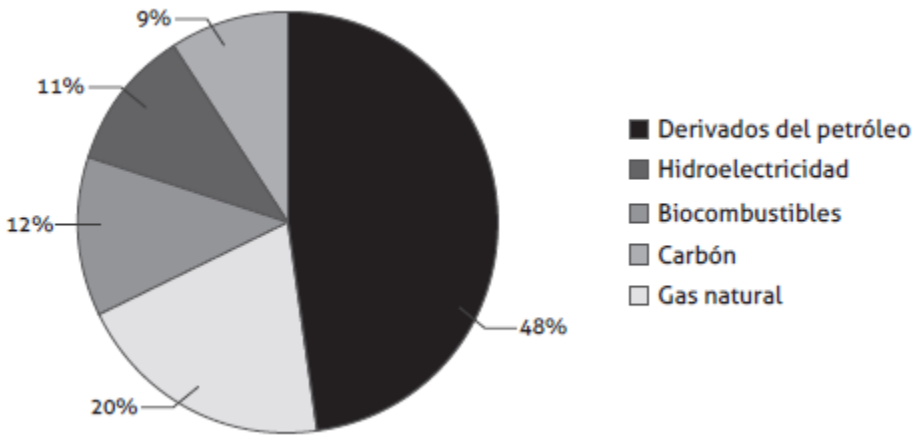


Fuente: Corredor (2018, p. 114)

4.2.2. Matriz energética colombiana

La matriz energética en Colombia es diferente a la de la mayoría de países debido a la importancia de la hidroelectricidad. No obstante, y a pesar de que esto es cierto en la generación eléctrica, al nivel de consumo total de energía el país es altamente dependiente de las fuentes convencionales (petróleo y gas fundamentalmente). La Figura 5 muestra la matriz de consumo para el año 2015 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015). Las variaciones en términos porcentuales de la participación de los energéticos en estos últimos años no han sido significativas.

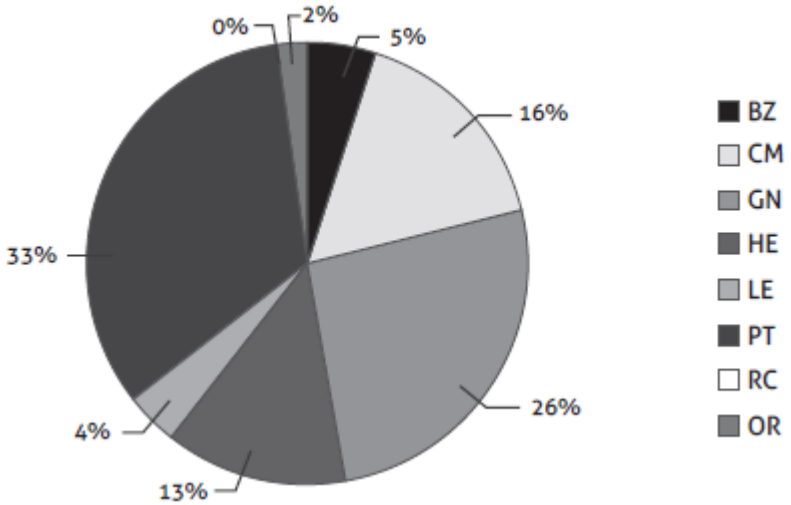
Figura 5 Matriz energética de consumo 2015



Fuente: Corredor (2018, p. 116)

Como se aprecia en la Figura 5, el petróleo y sus derivados representaron en el año 2015, el 48% del consumo interno y el gas natural 20%, mientras la hidroelectricidad 11% y el carbón 9%. Las fuentes renovables no convencionales son irrelevantes en la matriz de consumo del país. En cuanto a la oferta de energía primaria, la matriz varía debido a que buena parte de la producción de carbón se exporta, es decir, no se consume en el país, lo mismo que la de petróleo. La matriz de oferta de energía primaria para el país en el año 2015 fue la siguiente (ver Figura 6):

Figura 6 Matriz energética primaria 2015



Fuente: Corredor (2018, p. 117) Adaptado de UPME (2015a). Las convenciones utilizadas en este gráfico son: BZ= bagazo; CM= Carbón mineral; GN= Gas natural; HE= hidroelectricidad; LE=Leña; PT= Petróleo; RC= Otros residuos; OR= Otros renovables

En este caso, los combustibles fósiles ocupan la mayor parte de la producción de energía del país con 75% del total de la producción nacional de energía primaria. Entre 1975 y 2015, el cambio más importante en la matriz energética ocurrió por la disminución en la oferta y consumo de la leña, cuya producción pasó de representar 19,9% de la oferta total de energía primaria a participar solo en 5% en el año 2015. Esta disminución se reflejó en el incremento de la participación del gas natural que pasó de 9,7% en el año 1975 a 26% en el año 2015; y de la hidroelectricidad que pasó de 5,8% a 13% en el mismo periodo. En cuanto a producción de energía secundaria, la cual se consume mayoritariamente en el país se distribuye en un 29% en Diésel, 28% electricidad, 23% gasolina para motor y el resto en otras energías. Nuevamente se evidencia una matriz de energía secundaria con alta participación de fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles (Corredor, 2018).

4.2.3. Escenarios de transición energética para Colombia

La entidad encargada de la planeación energética en el país es la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). El trabajo más reciente de elaboración de escenarios energéticos es del año 2015. En este trabajo, la UPME construyó cuatro escenarios posibles sobre el desarrollo energético que parten de un Escenario Base (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015).

Escenario Base

Los principales supuestos de este escenario son:

- Crecimiento anual de la economía de 4,6% constante desde el año 2014 hasta el año 2030, y del 3,5% del año 2031 al año 2050.
- Proyección de población del DANE hasta el año 2020 y desde ese año tasa constante de crecimiento hasta el año 2050.
- Crecimiento de la demanda de energía eléctrica a una tasa del 2% promedio anual.
- Crecimiento del gas natural a una tasa de 2,98% para los sectores de consumo final y 2,6% para los procesos de transformación.
- Crecimiento de consumo de energéticos por sector de acuerdo con las tendencias de años recientes.
- Estructura de usos de energía y eficiencias en la industria y en el transporte, de acuerdo con estudios de la UPME.
- Disminución del uso de la leña, especialmente en el sector residencial rural, en beneficio del uso del gas natural, del Gas Licuado del Petróleo (GLP) y la electricidad.
- Ampliación de la cobertura de electricidad y gas natural.
- Crecimiento de la demanda de energía en el sector transporte en función del parque automotor y de los viajes realizados en los principales centros urbanos del país.
- Penetración del gas natural en el segmento de transporte de carga.

De acuerdo con estos supuestos, en este escenario donde se mantienen las políticas energéticas actuales sin incentivar nuevas fuentes, los resultados al año 2050 no muestran cambios importantes en la matriz de consumo. El gas natural gana un pequeño espacio y el diésel y la gasolina siguen siendo fuentes muy importantes de energía en el país. La hidroelectricidad pierde participación en beneficio del petróleo y el gas natural.

- ✓ Escenario tecnológico 1 (T1): Este parte del escenario base, suponiendo un mayor consumo de gas natural y de energía eléctrica en detrimento de uso de energéticos tradicionales y del carbón mineral, lo anterior con el fin de disminuir emisiones de GEI y buscar mayor eficiencia en procesos industriales.

- ✓ Escenario tecnológico 2 (T2): Este parte del escenario tecnológico 1 (T1), suponiendo que la firma del acuerdo de paz conlleve a un mayor crecimiento económico y a la aplicación de políticas para el impulso de las Fuentes No Convencionales de Energía, que podría reflejarse en un mayor desarrollo

rural y en un aumento de la biomasa en la matriz energética. Además, se presenta una mayor participación de la electricidad y del GLP en detrimento del gas natural.

- ✓ Escenario Mundo Eléctrico: Este parte del escenario base y supone que el energético principal es la electricidad, por lo que se reemplaza en todos los sectores donde es posible hacerlo técnicamente. Para el suministro se plantean dos posibilidades: Fuentes Convencionales y Fuentes No convencionales. En este escenario, como es lógico, el resultado es un fuerte incremento de la electricidad que cambia drásticamente la matriz energética al quedar muy reducido el uso del diésel y la gasolina debido a la sustitución en el transporte por vehículos eléctricos. Si bien es un escenario poco probable, resulta interesante observar que, si se impulsara esta política, Colombia lograría reducciones muy importantes en las emisiones de GEI y una mayor eficiencia energética. Se requeriría un 18,5% menos de energía para atender el crecimiento económico del país en el año 2050.

- ✓ Escenario Eficiencia Energética (EE): Parte del escenario base, suponiendo metas de aumento de la eficiencia en procesos agrícolas e industriales (25% al año 2039 y 30% al año 2050), así como en procesos de cocción y calentamiento de agua en el sector residencial, también presenta penetración de energía solar (0,6%) y eólica (2%) en los procesos de transformación. Este escenario, como el anterior, reduce el consumo de energía, aunque en menor proporción (10%), pero no modifica sustancialmente la participación de las fuentes actuales en la matriz energética.

De este estudio fácilmente se concluye que una combinación de electrificación del transporte y una mayor eficiencia energética, sería lo más deseable para el país si se quiere hacer una transición energética hacia una producción y consumo más limpio y sostenible de la energía.

4.2.4. Las fuentes renovables en la matriz energética

En el caso de Colombia, la posición oficial considera que la matriz eléctrica del país es lo suficientemente renovable (80% hidroelectricidad) como para preocuparnos. Esta visión que considera a las grandes plantas hidroeléctricas como energía limpia ha impedido el impulso de las fuentes renovables no convencionales (Corredor, 2018).

La expedición de la Ley 1715 de 2014, de iniciativa parlamentaria, que promueve el uso de las fuentes renovables y la eficiencia energética ha tenido retrasos importantes en su reglamentación, lo cual, a pesar del gran interés por la instalación de plantas solares y eólicas, no ha tenido una concreción efectiva. Además, subsisten barreras regulatorias que dificultan que nuevos actores entren en el mercado de la generación eléctrica. La principal de ellas es la inexistencia de contratos de largo plazo que permitan que un nuevo generador obtenga financiación de manera rápida. Solo las grandes compañías existentes tienen la capacidad financiera para construir estos proyectos, lo cual conduce a una mayor concentración de la propiedad, y por tanto, a una menor competencia reflejada en mayores precios para el consumidor final. Es mucho lo que falta en términos de decisión política para lograr un cambio de paradigma en la producción de electricidad (Corredor, 2018).

En cuanto al transporte, el sector donde más cambios se pueden lograr, las políticas del país son muy tímidas y como en muchos otros sectores, se ha dejado al mercado la transformación de las fuentes energéticas. Esta política claramente no es la más efectiva. Muchos países “desarrollados” como Noruega, Reino Unido, Francia, y próximamente China, han definido fechas precisas para dejar de utilizar combustibles fósiles en el transporte. Por otro lado, en Colombia se acaba de emitir un Decreto para eliminar aranceles y reducir el IVA a 5% a un total de 46.000 vehículos eléctricos e híbridos[7] en los próximos diez años. Esta medida resulta absolutamente marginal si se tiene en cuenta que el país cuenta con cerca de trece millones de vehículos (Corredor, 2018).

Colombia se comprometió en el COP21 a reducir al 20% las emisiones totales al año 2030 o 30% para el mismo año si se cuentan con recursos de cooperación internacional. En el caso del sector energético ello solo será posible si se logra tener al menos un millón de vehículos eléctricos (de los cuales seiscientos mil se destinarán al transporte público y de carga), asegurando que el suministro de este aumento de la demanda se haga a partir de fuentes renovables no convencionales (preferiblemente diferentes al agua para reducir su vulnerabilidad ante el cambio climático) (Corredor, 2018).

4.3. Economía Circular en la transición energética

De acuerdo con los principios de la bioeconomía y de la economía circular, el aprovechamiento de la biomasa como la proveniente del tratamiento de las aguas residuales y de los residuos orgánicos de los procesos productivos resulta la mejor alternativa tanto para reducir la dependencia de los hidrocarburos como para dar paso a la transición hacia un paradigma ambiental. Dicha transición se presenta aprovechando parte de las viejas tecnologías en combinación con las más

novedosas y con el paulatino cambio de los patrones de consumo frente a la oferta de nuevos productos que satisfacen necesidades ya reconocidas y otras nuevas, en todo este proceso es necesario instalar modificaciones a los procesos productivos, que al incorporar los criterios ambientales las podemos definir como ecoeficiencias y al hacer transformaciones más radicales se enmarcan en estrategias como la producción más limpia, la simbiosis industrial o el análisis de ciclo de vida (González & Ponce, 2019).

La utilización de energías alternativas a partir de fuentes no convencionales forma parte de este proceso de transición donde el insumo clave de todo producto generado es algún tipo de biomasa, se componen de una variedad de estructuras productivas integradas que optimizan el procesamiento de los insumos utilizados (González & Ponce, 2019). Las energías alternativas son aquellas que no implican la quema de combustibles fósiles para su generación, además de ser indispensables para asegurar la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente. La contaminación atmosférica ha sido una constante evolutiva a través de los años y a medida que esta crece también se incrementa la necesidad de disminuirla para mejorar la calidad de vida de los seres vivos. A causa de esto se considera generar energías alternativas las cuales permiten suplir las necesidades del ser humano a partir de la utilización de los recursos naturales existentes. Una de las energías alternativas que en la actualidad ha estado en constante y evolución es la producción de biogás a partir de digestión anaerobia de las aguas residuales u otro tipo de tratamiento de las mismas ((Masera, 2010)

4.4. Generación de energía mediante el aprovechamiento de biomasa

Desde el descubrimiento de la electricidad por Benjamín Franklin y su pararrayo impulso a otros científicos para descubrir el uso que se podría obtener de la electricidad esto nos conlleva a que en la actualidad uno de los recursos más utilizados por la humanidad es la electricidad ya sea por la creación de energía: Eólica, Hidráulica, Nuclear, Térmica, Solar, Biomasa. La generación de energía mediante descomposición de materia orgánica conlleva a nuevas y mejoras de utilidades de energía barata para la humanidad ayudando al medio ambiente (Aguilar, 2017).

Dado el costo elevado de energía renovable su inserción en el mercado es lenta sin embargo a medida que el costo de energía convencional incrementa los yacimientos de recursos se van agotando, para esto las ventajas en el uso de este tipo de recurso (biogás) es sustancial por:

a) Mínimo impacto sobre el medio ambiente.

b) No generan residuos difíciles de tratar, ni gases contaminantes como lo hacen los combustibles fósiles (Petróleo).

La promoción de la eficiencia en el uso de las nuevas fuentes alternas de energías no evitará que estas se exploten en el largo plazo. Esto debido a que el petróleo seguirá siendo una buena opción para la generación de energía primaria. Existen oportunidades reales para cambiar combustibles tradicionales por combustibles alternativos, que serán los que desplacen al petróleo y al gas natural, algo que ya ocurrió en el pasado. Por ejemplo, la madera fue la fuente predominante de energía desde el tiempo de la fundación de las primeras colonias americanas en el siglo XVII hasta finales del siglo XIX. En el siglo XIX, aproximadamente en 1895 el petróleo comenzó a desplazar al carbón, el cual a su vez había complementado a la energía hidroeléctrica. Posteriormente en 1957 apareció la energía nuclear, lo que permitió la diversificación del sector de las fuentes generadoras de energía eléctrica (Aguilar, 2017).

4.4.1. Energías Renovables

Las distintas fuentes de energía se clasifican en dos grupos, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Fuentes de Energía

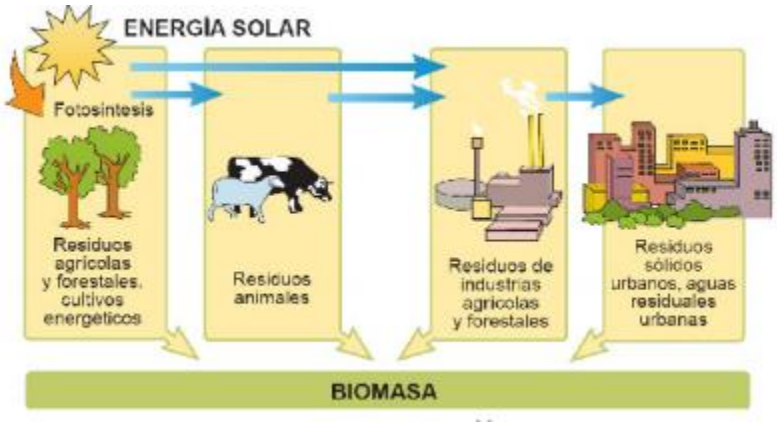
TIPO DE FUENTES	RENOVABLES	NO RENOVABLES
Descripción	Son aquellas fuentes que no desaparecen al transformar su materia en energía útil; se renuevan continuamente a causa de la presencia de fuerzas físicas como marea, viento, gradiente térmico del océano o la generación de materia vegetal y animal	Es el sistema material que se agota al transformar su energía en energía útil, se refiere principalmente a combustibles fósiles depositados en la tierra hace cientos de millones de años, cuando son explotados se reduce su capital energético.
Ejemplos	Agua almacenada en presas (energía hidráulica). El Sol (energía solar). El viento (energía eólica). La biomasa (materia orgánica) Las mareas (energía mareomotriz). Las olas.	Combustibles fósiles: Carbón. Petróleo. Gas Natural. Geotérmica. Uranio (energía nuclear de fisión).

Fuente: Elaboración Propia, 2021. Adaptado de Aguilar (2017, p. 28).

4.4.2. Concepto, clasificación y usos de la biomasa

Se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Figura 7). Por tanto, los recursos biomásicos provendrán de fuentes muy diversas y heterogéneas (Herguedas, Taranco, García, & Paniagua, 2012).

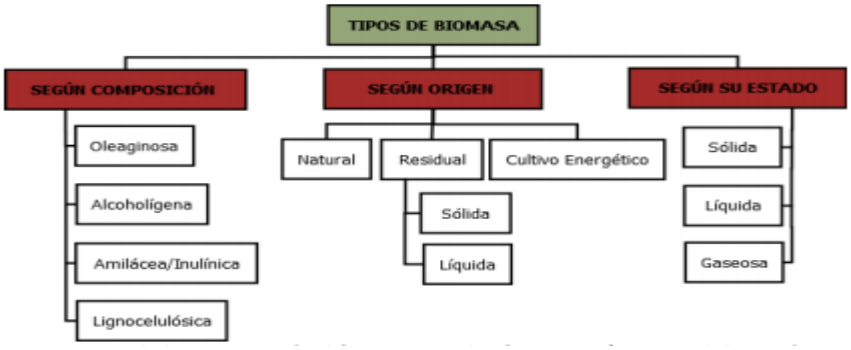
Figura 7 Tipos de Biomasa



Fuente: Herguedas et al, (2012, p. 4)

La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol: a partir del proceso denominado fotosíntesis, las plantas absorben energía lumínica del sol, agua del suelo y el CO2 de la atmósfera, almacenando en ellas sustancias orgánicas (energía) y liberando oxígeno durante el proceso. Posteriormente, los animales incorporan y transforman esta energía al alimentarse de las plantas, por lo que los productos de esta transformación, que se consideran residuos, también pueden ser utilizados como recurso energético (Herguedas, Taranco, García, & Paniagua, 2012). Existen numerosas clasificaciones de biomasa, pero las más aceptadas, y fundamentadas en su composición, origen, y estado, son las que se reflejan en la Figura 8:

Figura 8 Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones



Fuente: Herguedas et al, (2012, p. 5)

4.4.2.1. Según su origen:

Natural: Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana. Su explotación, en general, no es interesante por razones económicas ya que la gestión de la adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización no son rentables. A pesar de ello, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vías de desarrollo.

Residual: Consiste en la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos, y entre ellos pueden citarse:

- Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería: pajas de cereales, zuros de maíz, excedentes agrícolas, los originados en los tratamientos silvícolas, etc.
- Residuos de industrias agrícolas y forestales: como las provenientes de la producción de aceite de oliva, aceite de orujo de oliva, industria vinícola y alcoholera, producción de frutos secos, recortes de madera, serrín, etc…
- Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU).
- Residuos ganaderos: principalmente purines.
- Residuos agroindustriales: industrias lácteas, papeleras, destilerías, almazaras, conserveras, etc.
- Aceites alimentarios usados.

Cultivo energético: Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas alimenticios, los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de

biomasa, y no de calidad, y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo y, por tanto, el precio de la biomasa final.

4.4.2.2. Según su estado:

Biomasa sólida: Este tipo de biomasa es el más conocido, y en él podemos englobar la madera obtenida de tratamientos silvícolas forestales, residuos de las industrias que trabajan con cualquier tipo de biomasa (carpinterías, papeleras, etc.), residuos obtenidos en las podas y limpieza de parques y jardines, subproductos o residuos de naturaleza agrícola (e.j. paja), cultivos energéticos, turba, residuos agroindustriales (orujo, serrín, huesos de aceituna), fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), etc.

Biomasa líquida: Este grupo englobaría a los residuos ganaderos, los residuos industriales biodegradables y las aguas residuales urbanas (ARU). Gran parte de la bibliografía consultada incluye también en este punto los aceites y biocarburantes (bioetanol y biodiesel).

Biomasa gaseosa: Se trata del metano o biogás obtenido a partir de residuos de animales, residuos agroalimenticios, vertederos y escombreras, etc., a través de diversos procesos (termoquímicos, microbiológicos, etc.).

4.4.3. Generalidades del biogás

Como se ya se expuso, una de las principales formas de generación de energías renovables es a través del aprovechamiento de biomasa, donde el biogás es un gas combustible que se puede obtener a partir de ella, tal como son los residuos urbanos, residuos agrícolas, y de los efluentes de tratamiento de aguas. Este gas puede ser utilizado, por ejemplo, como combustible para generar electricidad o para generar energía calorífica demostrando ser un bioenergético capaz de sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía (Briseño, 2017).

Lo constituye una codigestantes de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones de operación de los reactores donde se obtiene. El biogás contiene aproximadamente 60% de metano y 40% de dióxido de carbono y una pequeña cantidad de ácido sulfhídrico el cual produce un olor a huevo podrido. (Briseño, 2017). El mecanismo predominante para la conversión de la biomasa en biogás es la conversión bioquímica o digestión de biomasa orgánica que debe entenderse como un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos simultáneamente. El método más común de producción de biogás es la digestión anaerobia, por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Uno de los

sistemas más comunes en los que se lleva a cabo, es en tanque cerrado llamado 'biodigestor'. La codigestión de la biomasa en el digestor con agua para formar una suspensión, en la cual la digestión anaerobia se realiza en dos pasos. En el primer paso, llamado licuefacción, la materia orgánica es descompuesta por hidrólisis enzimática y fermentada para producir principalmente ácidos y alcoholes. El segundo paso, llamado gasificación, las bacterias metanogénicas rompen los ácidos y los alcoholes, para producir metano y dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico (Briseño, 2017).

Las vías microbiológicas de producción de energía a partir de sustratos biológicamente degradables representan una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables que se utilizan en la actualidad. Esto es especialmente interesante dentro del campo de las instalaciones agroindustriales las que pueden cubrir una parte de sus necesidades energéticas a partir de sus propios residuales, para complementar o reemplazar los combustibles fósiles, por lo tanto, la digestión anaerobia se presenta como el método más ventajoso en el tratamiento de aguas residuales y de residuos orgánicos, para aprovecharse en la generación de biogás. La composición química del biogás es determinada por la naturaleza del sustrato y las condiciones de operación de la digestión anaerobia. Es una combinación de gases flamables generados por un grupo de bacterias anaerobias específicas en la descomposición de compuestos orgánicos (digestión anaerobia), contiene de 50-70% de metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2), junto con estas algunas trazas de hidrógeno (H2) y sulfuro de hidrógeno (H2S) (Briseño, 2017).

4.4.4. Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa

La utilización de la biomasa con fines energéticos posee numerosas ventajas, no solo para el propietario de la instalación, sino también para el conjunto de la sociedad. Estas ventajas pueden agruparse en:

Ventajas ambientales:

- Disminución de las emisiones de CO2 respecto a otros combustibles fósiles: Ya que, aunque para realizar el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión (que dará como resultado H20 y CO2), la cantidad de dióxido de carbono emitida, causante del efecto invernadero, se considera que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Por tanto, esta combustión no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- No emite contaminantes sulforados o nitrogenados (causantes de la lluvia ácida), ni apenas partículas sólidas: Además, el uso de biocarburantes en

motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas, SO2 y CO).

- Disminución de residuos: Gracias al reciclaje de la biomasa procedente de residuos de otras actividades. Por ejemplo, el empleo del proceso de digestión anaerobia para tratar las biomasas residuales húmedas, además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia (residuos) pueden utilizarse como fertilizantes en la agricultura.
- Evita la erosión y la degradación del suelo: A través de la implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas, sobre todo si se realiza con especies perennes.

Ventajas socioeconómicas

- Diversificación energética: El aprovechamiento de la biomasa contribuye a este objetivo marcado por los planes energéticos nacionales y europeos.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- Nuevas oportunidades para el sector agrícola: ya que los cultivos energéticos podrían sustituir a los cultivos excedentarios en el mercado de alimentos.
- Puede contribuir a un aumento económico en el medio rural: con el aprovechamiento de algunos tipos de biomasa, principalmente la forestal y los cultivos energéticos.

Pero no hay que olvidar algunos pequeños inconvenientes derivados de las características que presenta la biomasa:

- Poseen menores rendimientos energéticos que los combustibles derivados de los combustibles fósiles.
- De momento, poseen mayores costes de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- La biomasa posee una baja densidad energética, es decir, que para conseguir la misma cantidad de energía se requiere utilizar más cantidad de materia prima. Esto hace que pueden darse problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización.

4.5. Estado del Arte de la Economía Circular aplicado a la generación de biogás a partir del aprovechamiento de aguas residuales

Una vez abordada las bases conceptuales y teóricas sobre la economía circular, la transición energética y la generación de energías renovables mediante el aprovechamiento de biomasa, es preciso ampliar la información relevante a la

alternativa que se propone para el presente estudio de caso, la cual se orienta al aprovechamiento de las aguas residuales en el municipio de Aracataca. En consecuencia, se presenta a continuación los resultados de la revisión de literatura referente a la producción de biogás mediante el tratamiento y aprovechamiento de las aguas residuales, y como se conecta con el modelo economía circular, resaltando los casos exitosos que se han presentado a nivel nacional e internacional, que sienten las bases para determinar la viabilidad de implementación del precitado modelo en el territorio.

4.5.1. Tratamiento de aguas residuales

Una estación depuradora de aguas residuales o una planta de tratamiento de agua dedicada a la depuración de aguas residuales, tiene como objetivo fundamental recolectar las aguas residuales de una población o de un sector industrial, y eliminar las sustancias contaminantes de esta para, posteriormente, ser devuelta al ciclo del agua, bien sea mediante desagüe al mar y ríos o bien mediante su reutilización directa. Entre las distintas sustancias que se han de eliminar, se encuentran residuos, aceites, arenas y distintos sólidos sedimentables, compuestos con nitratos, amoniaco y fosfatos, entre otros (Fair, Geyer, & Okun, 1966). En la revisión de la literatura se pudo identificar que se pueden presentar los siguientes tipos de tratamientos:

Tabla 2 Tipos de tratamiento de aguas residuales

TIPO DE TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
Físico	Son aquellos métodos en los que se aplica una separación física, generalmente de sólidos. Estos métodos suelen depender de las propiedades físicas de los contaminantes, como la viscosidad, tamaño de partículas, flotabilidad, etc. Entre ellos podemos encontrarnos el tamizado, la precipitación, separación y filtración de sólidos
Químico	Son aquellos métodos que dependen de las propiedades químicas del contaminante o reactivo incorporado al agua. Podemos destacar la eliminación del hierro y del oxígeno, la eliminación de fosfatos y nitratos, la coagulación, los procesos electroquímicos, la oxidación, intercambio de iones, etc.
Biológico	En estos métodos se utilizan procesos biológicos, de manera que se pretende eliminar los contaminantes coloidales. Son microrganismos que actúan sobre la materia en suspensión transformándola en solidos sedimentables. Pueden ser procesos aeróbicos o anaeróbicos, como los lodos activos, los filtros percoladores, la biodigestión anaerobia o las lagunas aireadas.

Fuente: Elaboración Propia, 2021. Adaptado de (Fair, Geyer, & Okun, 1966)

Del mismo modo, para el adecuado tratamiento de aguas residuales se deben realizar las siguientes etapas:

Tabla 3 Etapas del tratamiento de aguas residuales

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Pre-tratamiento	Este proceso regula y mide el caudal de aguas residuales entrantes en la estación. En esta etapa se eliminan los sólidos de mayor tamaño, la arena y la grasa, que hay presente en las aguas negras. Estos compuestos son eliminados mediante filtrado. También suele realizarse un proceso de pre-aireación, para disminuir así los compuestos orgánicos volátiles disueltos en el agua, los cuales otorgan mal olor y aumentan la DQO del agua.
Tratamiento Primario	La función de esta primera etapa es la de eliminar los sólidos suspendidos, lo cual se realiza mediante un proceso de sedimentación gravitatoria o bien mediante precipitación, bien asistida o bien por sustancias químicas añadidas. La eliminación de sólidos se realiza mediante la criba en base al tamaño de partícula. Posteriormente, se añaden compuestos como aluminio, polielectrolitos floculantes y sales férricas, además de precipitar el fósforo disuelto en pequeños coloides o en una suspensión muy fina, mediante el uso de maquinaria hidráulica. Entre los principales métodos nos encontramos el decantador primario (sedimentación gravitatoria), el flotador por aire disuelto (separación de partículas en suspensión mediante burbujas) y los tratamientos químicos, con adición de reactivo para aumentar la sedimentación de los sólidos disueltos.
Tratamiento Secundario	El objetivo de esta segunda etapa es el de eliminar la materia orgánica disuelta y en estado coloidal, mediante procesos de oxidación bioquímicos. Además, se degradan sustancias biológicas originadas por los desechos humanos. En estos tratamientos nos encontramos con procesos aeróbicos y anaeróbicos. Los procesos aerobios son realizados en presencia de oxígeno, introducido mediante burbujeo en os tanques de almacenamiento. Los procesos anaerobios están realizados en ausencia de oxígeno. En estos procesos tienen lugar las reacciones de fermentación de la materia orgánica, que se convierte en energía liberada, CO2, CH4 y C. Algunos de los procesos anaerobios y anaerobios más empleados son los lodos activos, los filtros verdes, las lagunas aireadas, los lechos bacterianos y la digestión anaerobia. Estos procesos disminuyen gran parte de la DBO y eliminan el resto de sólidos sedimentables. Generalmente suelen darse combinaciones entre estos distintos tratamientos, dando lugar a procesos biológicos de dos o más etapas. En esta etapa también se incluye la decantación secundaria, separando el agua tratada y el fango generado en el proceso biológico

Tratamiento Terciario	En esta etapa final del tratamiento se realizan procesos para la eliminación de agentes patógenos, como bacterias de origen fecal, aumentando los estándares de calidad requeridos para ser devuelta al ciclo del agua, por descarga al mar, en ríos, lagos, recargas de acuíferos, embalses y demás sistemas hídricos. Entre los procesos que se realizan encontramos en primer lugar la filtración en filtros de arena, que retiene gran parte de la materia en suspensión. El carbón activo que sobra retiene el resto de toxinas. El tratamiento en lagunas proporciona la sedimentación necesaria, además de una ventaja biológica adicional. Es básicamente una imitación de los procesos naturales de autodepuración que realiza un río o un lago. Además de ser lagunas extremadamente aerobias, lo que genera un crecimiento habitual de cañadas, los invertebrados de alimentación filtrante también ayudan al proceso de eliminación de sólidos.

Fuente: Elaboración Propia, 2021. Adaptado de (Fair, Geyer, & Okun, 1966)

4.5.2. Producción de Biogás a partir del tratamiento de aguas residuales

Se realizó una búsqueda de estudios e investigaciones del estado actual del uso de biogás y su potencial de producción, a partir del tratamiento de las aguas residuales, así como las metodologías abordadas para este fin.

Según la revisión realizada por (Bodik, Sedlacek, Kubaská, & Hutnam, 2011), Los países europeos han evolucionado desde 1940 en la producción y uso del biogás en aplicaciones como, producción de calor y vapor, generación de energía/cogeneración, combustible vehicular y elaboración de productos químicos, sostienen que, presentan aumentos anuales de la producción de biogás en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del 4,5% al 5%, siendo este continente un abanderado en este tipo de fuente de energía renovable, Alemania es el mayor productor de biogás en Europa y junto con Dinamarca han alcanzado sus tasas máximas de valorización de biogás a partir de las PTAR teniendo en cuenta su población.

(Berktay & Nas, 2007), investigaron la generación de biogás a partir de lodos de tratamiento de aguas residuales, su potencial energético y también su uso en algunas plantas de tratamiento operadas en Turquía, dentro de las metodologías, usadas para la estimación de la generación de biogás, proponen, la metodología de cantidad de Demanda Quimica de Oxigeno (DQO), la de solidos volátiles, y la metodología en función del beneficio de la población. Sostienen que el biogás no solo como una fuente de energía renovable, sino más aún como una de las soluciones prometedoras al gran problema ambiental relacionado con el manejo de las aguas residuales, la contaminación del agua y la emisión de CO2.

(Haroum, Tisser, Altawil, & Osman, 2020), estudiaron el Potencialidad de los lodos municipales para la producción de gas biológico en la estación de Soba al sur de Jartum (Sudán), al considerar el biogás se considera la fuente de energía renovable más alentadora en Sudán. Partiendo del análisis del proceso de digestión anaerobia, para el tratamiento de las aguas y fuente de biogás, y cerrando el ciclo con el uso de las aguas tratadas y los lodos como acondicionadores de suelos para mejoramiento de productividad agrícola, para la determinación de potencial del biogás se desarrolló un biodigestor en laboratorio con capacidad de 5 litros, obteniendo como resultado final oportunidad energética significativa al estimar la producción de energía en 35 KWh.

(Ramírez, Medrano, & Ecobedo, 2020), desarrollaron estudios para estimar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Zona Noreste, Villahermosa, México, mediante cuatro métodos, en función de la cantidad de sólidos volátiles, por la Demanda Química de Oxigeno (DQO) removida, por la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO_5) y el método de la población beneficiada. Los resultados obtenidos fueron altamente favorables, al establecer que la producción de energía, 17,312.59 kWh/día, era suficiente para el autoabastecimiento de la operación de la PTAR, y generar excedentes para diversos usos.

(Amosse & Nedelec, 2010), exponen el caso del Sindicato Interdepartamental de Saneamiento para la Aglomeración Parisina (SIAAP), quien se encarga del tratamiento de las aguas residuales de París, manejando un volumen de 2,7 m^3/d, y posee un sistema de aprovechamiento del biogás desde 1940, en evolución constante, es así, como en el 2005, cubrió el 70% de las necesidades energéticas de la operación de la planta Seine Aval, la cual consume tanta energía como una ciudad de 500.000 habitantes, mostrando así un caso exitoso del uso de biogás como fuente de energía renovable esencial para limitar el uso de combustibles fósiles y en la reducción de gases de efecto invernadero y su valoración presenta, además, un interés económico innegable.

(Carillo & Ponce, 2019) sostienen que la bioeconomía, en coincidencia con la economía circular, representa una oportunidad para reorientar la visión del mundo, al identificar claramente al consumo excesivo como la principal causa del desastre ecológico y ofrecer una idea concreta de cómo se puede reducir la presión que se genera sobre el planeta limitando el uso de materia prima virgen y fomentando el uso de materias primas secundarias y residuos de biomasa tanto para la generación de productos como de energía, exponen en su publicación ejemplos de sistemas de

economía circular en industrias, donde se obtiene como producto Biogás para la generación de energía.

(Rakascan, y otros, 2021) Presentan un modelo de economía circular a partir del aprovechamiento de los subproductos del sorgo, este estudio fue realizado en dos localidades de la Republica de Serbia, en la región de Bannat, localidades de Ilandza y Dolovo, donde se analizó los beneficios de la producción de biogás y fertilizantes orgánicos usados para la sustitución de fertilizantes minerales y remediación de suelos dañados, lo que contribuye a la sostenibilidad desde la bioeconomía y el medio ambiente.

(Kiselev, y otros, 2019) Sostienen que el modelo de economía circular puede reemplazar a la actual economía lineal al mismo tiempo que se abordan los problemas del deterioro ambiental, la equidad social y crecimiento económico a largo plazo. En el contexto de la implementación efectiva de los objetivos de la economía circular, Debe atribuirse especial importancia a la gestión de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a la posibilidad de recuperar materias primas valiosas y aprovechar su potencial energético. En su estudio analizaron el caso de Ekaterinburg, ciudad de Rusia con una población de aproximadamente 1.500.000 habitantes, determinando el potencial de generación de biogás en el sistema de tratamiento de aguas residuales, así como el potencial de generación de energía, en sus conclusiones plantearon que hay grandes beneficios en términos de eficiencia energética y seguridad ambiental y que el enfoque propuesto de la evaluación de las soluciones de biogás y biometano de lodos de depuradora brindan una oportunidad para que las Plantas de Tratamiento de aguas residuales elijan el forma más eficiente de "cerrar el círculo" en un contexto de economía circular.

4.5.3. Economía circular en Colombia

En cuanto al gobierno nacional, ha considerado caminos que permitan la implementación a un modelo económico circular y amigable con el ambiente. Además “El Estado colombiano a través de la Misión de Crecimiento Verde, liderada por el Departamento Nacional de Planificación de Colombia, reconoce la oportunidad que significa generar un ambiente propicio para promover la transición hacia este modelo; siendo así que esta consultoría está alineada con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas” (TECNALIA, 2018).

Por lo anterior, es importante generar oportunidades y garantías a los proyectos enfocados en este modelo, de tal manera que estimule las nuevas ideas las cuales permitirán tener un mayor desarrollo tecnológico, mano de obra y eficiencia energética, todo esto impactando positivamente la economía que lo rodea y aún más mejorando el medio ambiente (EllenMacarthurFoundation, 2017).

También “contempla las actividades económicas en las que se ofertan bienes o servicios, que generan impactos ambientales positivos y además incorporan buenas prácticas ambientales, sociales y económicas con enfoque de ciclo de vida, contribuyendo a la conservación del ambiente como capital natural que soporta el desarrollo del territorio” (Ministerio de Ambiente, 2015). Por lo tanto, se corrobora que la economía circular puede generar grandes oportunidades en la renovación e innovación industrial, gracias al aprovechamiento adecuado de los residuos sólidos o líquidos usados en los distintos procesos, donde se debe tener en cuenta que el uso de los materiales son finitos en una economía lineal, pero en la circular al prolongar la vida útil de los productos se están generando ciertos beneficios como ahorros netos en el costo de los materiales, mejorando procesos, innovación e incrementando el valor de los productos que en otro caso se desechaban (Ministerio de Ambiente, 2015).

A continuación, se describen las políticas, decretos y estrategias que se han sido implementadas, en busca de un marco regulatorio para la economía circular en el país, destacando aquellas que han sido específicas en el aprovechamiento de las aguas residuales.

Tabla 4 Marco normativo colombiano de Economía Circular aplicado a las aguas residuales

Año	Nombre	Descripción
1974	Decreto-Ley 2811 Código de los Recursos Naturales Renovables y de protección al Medio Ambiente	Este decreto permite que se desarrolle el bien “agua” como un patrimonio que gira en torno a la supervivencia humana y que impulsa el desarrollo económico y social del territorio colombiano. El principio rector que rige este decreto es asegurar la disponibilidad del recurso y fomentar nuevos métodos que permitan ver las aguas residuales como una herramienta para ayudar a mantener y preservar el agua potable sin importar la actividad que se realice
1979	Ley 9 - Por la cual se dictan Medidas Sanitarias	Esta ley establece la protección que se debe dar al medio ambiente en protección directa a la calidad del agua y del control sanitario. Todo usuario de las aguas deberá cumplir, además de las disposiciones que establece la autoridad encargada de administrar los recursos naturales, las especiales que establece el Ministerio de Salud. La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuentes receptoras

2010	Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible	Presenta el Plan Nacional de Mercados Verdes como estrategias del Estado Colombiano que promueven y enlazan el mejoramiento ambiental y la transformación productiva a la competitividad empresarial.
2014	Resolución 1207 - Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas	Esta norma fundamenta todos las leyes, decretos y resoluciones anteriores conforme al recurso hídrico, dando valores precisos que se deben obtener al momento de ejercer cualquier tratamiento posterior a las aguas residuales. se especifica los balances de materia o de masa de los vertidos. Por otra parte, se hace indicación de los sectores en los que se puede hacer uso de las aguas residuales generadas y los criterios de calidad al realizar las tomas de muestra del efluente final. La estrategia que plantea el gobierno nacional para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico son las siguientes estrategias: a) aumento de coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado, b) ampliación del tratamiento de aguas residuales, y c) desarrollo de esquemas tarifarios que permitan financiar los costos de inversión y operación de los sistemas de acueducto y alcantarillado.
2015	Decreto 1076 – Decreto único reglamentario del sector ambiente	Compila todas las normas y disposiciones en materia ambiental que deben cumplirse en la ejecución de proyectos que involucre el uso y aprovechamiento de los recursos naturales.
2017	Resolución 0330 - Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, “RAS”.	Considera que corresponde al Ministerio de Desarrollo Económico, formular la política de gobierno en materia social del país relacionada con la competitividad, integración y desarrollo de los sectores productivos del agua potable y saneamiento básico y expedir resoluciones, circulares y demás actos administrativos de carácter general o particular necesarios para el cumplimiento de sus funciones. Por tal se sustenta en los artículos enumerados a continuación: • ARTICULO 86 y ARTICULO 119: gestión de tratamiento y manejo de lodos. • ARTICULO 121: Sistemas de instrumentación y control de aguas potable y residual.

		• ARTICULO 175: Desinfección de los efluentes de las PTAR. • ARTICULO 176: Manejo de lodos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
2019	Lanzamiento oficial de la estrategia Nacional de Economía Circular.	Es un pacto con diferentes entidades y empresas para el manejo eficiente de materiales, agua y energía. Así, Colombia se convertirá en una de las tres economías más competitivas de América Latina para 2030
2020	CONPES 4004 - ECONOMÍA CIRCULAR EN LA GESTIÓN DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y MANEJO DE AGUAS RESIDUALES	Establece los lineamientos para mejorar las capacidades institucionales y de gobernanza para implementar un modelo de economía circular y desarrollar mecanismos de gestión de la información con el fin de promover la oferta de agua en el largo plazo y la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en condiciones de calidad y continuidad

Fuente: Elaboración propia, 2021. Adaptada de (Urrea, 2019) & (Rozo, 2019)

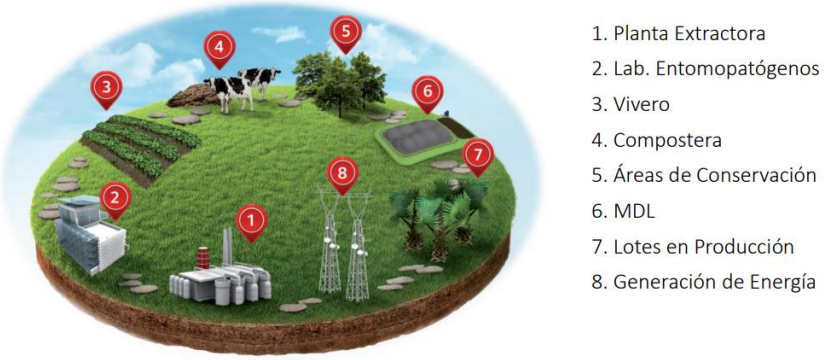
4.5.4. Casos exitosos de economía circular en Colombia

A continuación, se presenta, el listado de los distintos casos exitosos de economía circular en el país que fueron identificados en la revisión de la literatura del presente proyecto de investigación

Tabla 5 Casos colombianos exitosos de economía circular

IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Reutilización de agua depurada de la PTAR El Salitre, Bogotá, Colombia. Un ejemplo de economía circular	La planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”, está encargada de realizar diferentes procesos que permiten hacer una transformación del afluente que llega contaminado y convertirlo en un efluente que este ceñido en virtud de la legislación colombiana con los criterios de calidad para ser vertidos a un medio específico. Esta planta capta todas las aguas residuales de la parte norte de Bogotá las cuales se someten en primer lugar a una etapa inicial de pretratamiento seguido por un tratamiento primario para luego ser vertidas en el rio Bogotá. Hasta el momento se tiene instalada una capacidad máxima para un caudal de 13.132.620 (m3/año). Esta planta tiene generación de subproductos como lodos y biogás los cuales representan hasta el momento una pérdida económica por ignorar su potencial como productos que pueden volver a un ciclo de suministro como materias primas (Urrea, 2019). El principal objetivo que planteó el trabajo fue evaluar la factibilidad técnica- económica de diferentes propuestas de tratamiento de aguas residuales que permitan una regeneración y reutilización de las mismas para sectores industriales, comerciales y especiales (agricultura), los cuales son los que mayor demanda de agua potable utilizan para llevar

	acabo su fin económico. Estas propuestas parten de la base de un análisis previo como lo son aspectos regulatorios, sociales, ambientales, tecnológicos y de explotación. La valoración económica se realizó por el método de Análisis Costo-Beneficio (ACB) y en la técnica de Valor Actual Neto (VAN), el cual consta de poder maximizar todos los beneficios que trae consigo la implementación de tratamientos adicionales, siendo así, previamente se realizó una identificación de los costos privados de explotación y mantenimiento, así como aquellas externalidades positivas y negativas. Esta tesis de maestría que contiene 9 capítulos desarrolló de primera mano una introducción, un análisis de los diferentes tratamientos existentes en Colombia, el marco normativo que rige el control de calidad de aguas residuales, así mismo, se realiza un análisis de cómo ha ido evolucionando la aplicación del concepto de economía circular y sus ventajas, se expone de igual forma el caso concreto de la planta de tratamiento el salitre y se detalla las propuestas de los diferentes trenes de tratamiento propuestos para desarrollar la metodología de análisis técnico económico que permitan obtener el máximo beneficio discutiendo los resultados obtenidos, para finalizar se plantean las diferentes conclusiones de la investigación que se realizó. El estudio realizado en el año 2019 permitió establecer como principal resultado que el precio mínimo de venta del agua regenerada, necesario para recuperar todos los costos de producir 128 351 520 m3/año de agua regenerada, es de 0,2378 €/m3, sin embargo, se optó por una reducción del 15 % sobre el valor actual del agua que pagan por fuente convencional y se obtuvo que de acuerdo a su clasificación de sector comercial deben pagar 5,48€/m3, sector industrial 4,79€/m3 y sector especial 3,66€/m3. Este valor permite que la inversión realizada sea rentable según los criterios del valor actual neto (VAN). La conclusión fundamental de esta tesis es la viabilidad técnica - económica de poder regenerar y reutilizar las aguas residuales, modificando el comportamiento de una economía lineal donde solo se capta, usa y desecha, por una donde se vuelve a incluir el agua ya usada como una nueva fuente de recurso. De esta manera, hay mayor rentabilidad tanto económica y ambientalmente la explotación de fuentes alternativas como lo son las plantas de tratamiento de aguas residuales, al uso de fuentes convencionales.
Coca Cola, Auteco, Pintuco e ingenio Mayagüez	El reciente estudio realizado en el año 2019 por la Universidad Icesi, referente a la CARACTERIZACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN GRANDES EMPRESAS COLOMBIANAS, pudo identificar que existen organizaciones que están desarrollando actividades que impulsan la economía circular, más allá de reconocerlas como aportaciones a este modelo, algunas empresas son Coca Cola, Auteco, Pintuco e ingenio Mayagüez, las cuales se han comprometido por la conservación de las cuencas, tratamiento de aguas residuales, investigaciones para desarrollar empaques ligeros y energías renovables. Las empresas

	están notando la necesidad de tomar alternativas para no caer en el mercado ante la problemática de escasez de recursos naturales y variaciones climáticas. No obstante, muchas aun no indican (según su reporte de sostenibilidad) su preocupación y se enfocan en actuar solo en la disposición de residuos, tratamiento de aguas residuales, optimo uso de sus materias primas, reciclar, reutilizar y eficiencia energética mediante mantenimiento, iluminación led, sensibilización y uso de equipos óptimos como lo hace Procaps (Bravo & Abelardes, 2019).
Mecanismo de Desarrollo Limpio C.I. TEQUENDAMA S.A.S. – Grupo Daabon	C.I. Tequendama S.A.S. Empresa dedicada al cultivo, extracción y procesamiento de Aceite de Palma, Implementó en 2012 en el municipio de Aracataca, Magdalena un Mecanismo de desarrollo Limpio (MDL) en el marco de proyecto sombrilla denominado: "Fedepalma sectoral CDM umbrella project for methane capture, fossil fuel displacement and cogeneration of renewable energy". El Proyecto consiste en un biodigestor anaerobio, donde se realiza la captura del Biogás producido en el proceso de degradación de la materia orgánica de las aguas residuales que llegan al Sistema de tratamiento de aguas residuales no Domestico de la planta de beneficio. El Biodigestor tipo laguna de C.I. TEQUENDAMA S.A.S., consistente en una laguna recubierta capaz de mantener condiciones anaeróbicas con una capacidad de 34.038 m^3, posee una profundidad de 5.50 m, impermeabilizada con geotextil de densidad mínima de 250gr/m^2 y geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) con 60 mils mínimos de espesor y cubierta con geomembrana, tiene un largo total de 137,3m y ancho de 58m. Posee un Sistema de manejo de biogás con los siguientes procesos: Conducción, presurización, secado, filtración y combustión. El uso que actualmente posee el biogás es la cogeneración de energía eléctrica, para lo cual la empresa cuenta con un Sistema compuesto principalmente por dos motogenaradores, motores de combustión interna, que convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica, con capacidad de generar cada uno 750 kWh. (C.I. TEQUENDAMA S.A.S., 2020).  Ilustración 1. Modelo de Economía circular C.I. TEQUENDAMA S.A.S.

	Fuente: Tomado de Economía Circular: la Perspectiva Daabon (Guerrero, 2019)

Fuente: Elaboración Propia, 2021

5. Metodología

Tipo de Investigación: En el presente proyecto se realizará investigación de tipo ***Estudio de Caso***, que "sigue una vía metodológica que tiene como finalidad conocer cómo funcionan todas las partes del caso para crear hipótesis, atreviéndose a alcanzar niveles explicativos de supuestas relaciones causales encontradas entre ellas, en un contexto natural concreto y dentro de un proceso dado (UAM, 2009).".En este caso se abordará de forma individual el municipio de Aracataca, frente a la situación de plantear un modelo de economía circular con las aguas residuales domésticas generadas por el municipio.

Método de Investigación: El método de estudio es deductivo, ya que se parte de lo general para llegar a lo particular, Este tipo de investigación se basa en el estudio de la realidad y la búsqueda de verificación o falsación de unas premisas básicas a comprobar. A partir de la ley general se considera que ocurrirá en una situación particular.

" El método deductivo consiste en extraer una conclusión con base en una premisa o a una serie de proposiciones que se asumen como verdaderas. Lo anterior quiere decir que se está usando la lógica para obtener un resultado, solo con base en un conjunto de afirmaciones que se dan por ciertas. Mediante este método, se va de lo general (como leyes o principios) a lo particular (la realidad de un caso concreto). Cabe señalar que la veracidad de la conclusión obtenida dependerá de la validez de las premisas tomadas como base o referencia." es decir, se parte esencialmente de la Economía Circular como modelo de desarrollo sostenible a cómo puede aplicarse a la generación de energía renovable a través del biogás originado en el tratamiento de las aguas residuales domesticas municipales.

Fundamentos metodológicos de la investigación

La fundamentación metodológica es la forma como se toma un proceso de toma de posición, selección y ubicación teórico-práctica coherente, para estudiar el fenómeno objeto de estudio, mediante la integración del saber (teoría) y el saber hacer (metodología), ambos como elementos básicos para el desarrollo de la investigación. En este caso la investigación de economía circular en Aracataca,

magdalena: generación de biogás mediante el aprovechamiento de aguas residuales domésticas se fundamentó con base a los siguientes pasos

La Metodología Es la ciencia que nos enseña a dirigir determinado proceso de manera eficiente y eficaz para alcanzar los resultados deseados y tiene como objetivo darnos la estrategia a seguir en el proceso.

Es el conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar una gama de objetivos que rigen en una investigación científica, una exposición doctrinal o tareas que requieran habilidades, conocimientos o cualidades especificas

La Investigación Científica está encaminada a profundizar el conocimiento de un proceso ya sea teórico, práctico o teórico-práctico, parte del conocimiento científico y lo lleva a la solución de problemas de la sociedad que de una forma u otra no han sido investigados o su investigación se ha conducido en otra dirección

La metodología de la investigación es un procedimiento ordenado que se sigue para establecer el significado de los hechos y fenómenos hacia los que se dirige el interés científico para encontrar, demostrar, refutar y aportar a un conocimiento.

Es considerada como la disciplina que elabora, sistematiza y evalúa el conjunto de las técnicas utilizadas para encontrar la verdad de la ciencia o de lo que dispone la ciencia.

Por último, la observación del fenómeno, la hipotesis, la experimentación y búsqueda de la información, organización de la información y conclusiones y recomendaciones, estos pasos son los fundamentos para el desarrollo de la investigación.

Fuentes de Información

- ✓ Fuentes primaria: Dentro de la primera fase se desarrollará visita en sitio y reconocimiento de la infraestructura y estado actual de los sistemas de recolección y tratamiento de las aguas residuales domesticas del municipio, que permitan establecer un diagnóstico actual, recolectar datos en sitio con el fin de hacer los cálculos necesarios para determinar los potenciales energéticos.

Se realizará caracterización fisicoquímica de la calidad de agua en parámetros criterios para el cálculo de la generación del gas metano de las aguas residuales generadas por el municipio de origen doméstico.

- ✓ Fuentes secundarias: Se realizará el estado del arte de temas como, diseño de los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales del municipio de Aracataca, Plan de Saneamiento y Manejo del Vertimiento PSMV, legislación colombiana, artículos, documentos, tesis, entre otros, relacionados con el biogás producido a partir de aguas residuales y su potencial aprovechamiento como fuente de energía, guías y/o documentos de temas relacionados con transición energética, economía circular, metodologías de identificación y evaluación de impactos ambientales, Reglamento de Saneamiento Básico y agua potable RAS, entre otros temas relacionados.

- Fases:

- ✓ Fase 1: Describir las principales características de un sistema de captación y aprovechamiento energético del biogás generado a partir de las aguas residuales domésticas del municipio: En esta etapa se realizará una revisión descriptiva y análisis conceptual del sistema más adecuado para generar energía eléctrica. La presente propuesta de investigación en esta fase busca analizar un modelo que permita realizar la captura y el posterior aprovechamiento el biogás a partir de aguas residuales, basado principalmente en la digestión anaerobia, entendiéndose como un proceso de fermentación anaerobia (en ausencia de oxígeno) del cual se obtiene un producto que es una mezcla de gases principalmente dióxido de carbono y metano (CH^4). El biogás que se genera en el proceso se compone de metano en un rango de 50 – 70 % y dióxido de carbono de 30 – 50 %, en donde se encuentran inmersos el nitrógeno, oxigeno, hidrogeno y sulfuro de hidrogeno, existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos.

  El modelo que analizaremos en la presente investigación va dirigido principalmente hacia los digestores anaeróbicos (Biodigestor), el cual se compone principalmente de un reactor o contenedor de las aguas residuales a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas (FAO, 2011).

Se realizará una revisión bibliográfica de la aplicación de este modelo para la captura de biogás y posteriores usos potenciales, enfocándose principalmente en la generación de energía eléctrica.

- ✓ Fase 2: Determinación y evaluación de la tasa de generación energética del biogás producido durante el aprovechamiento de las aguas residuales de origen doméstico del municipio: En esta fase se realizará la cuantificación del biogás que se puede generar de las aguas residuales, y su tasa de potencial de generación de energética, partiendo de la siguiente información base:
  - Caudales de entrada a los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (operador del servicio Aguas de Aracataca) STARD.
  - Parámetros de diseño y operación del actual sistema de tratamiento de las aguas residuales (STARD), tales como dimensiones de la laguna y tiempos de retención hidráulico (TRH).
  - Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales domésticas: Se realizará toma de muestra en sitio para su análisis en laboratorio certificado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) o solicitud de los resultados de las ultimas caracterizaciones de los afluentes y efluentes de los STARD, con mínimo los siguientes parámetros fisicoquímicos: Temperatura (T), Potencial de Hidrogeno (pH), Demanda Química de Oxigeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO_5) y solidos totales (ST).
  - Estimación de Biogás: Este cálculo se realizará haciendo uso de modelos matemáticos de la estimación de biogás (Principalmente gas metano), a través de, bien sea, el modelo de producción de biogás a partir de la Demanda Química de Oxigeno (DQO) y de la cantidad de Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_5). Con los resultados obtenidos se realizará la estimación de la potencial tasa de generación de energía de estas aguas residuales domésticas. En resumen, las variables a tener en cuenta en esta fase de la investigación se describen a continuación:

Tabla 6. Operacionalización de variables de a fase 2.

Variable	Forma de medición	Medida	Fuente
Caudal de aguas residuales domesticas	Método volumétrico o el que él operador del PTARD haya definido	m^3	Trabajo de campo en sitio

Tiempo de retención hidráulico (TRH) – Laguna anaerobia.	Parámetro de diseño y operación	día	Trabajo en Campo: Aporte de información empresa operadora de STARD del municipio de Aracataca
Demanda Química de Oxigeno (DQO)	Toma de muestra y análisis en laboratorio	mg O_2/l	Trabajo en Campo: Toma de muestra y ensayo en laboratorio Acreditado IDEAM o aporte de información empresa operadora de PTARD del municipio de Aracataca.
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DQO)	Toma de muestra y análisis en laboratorio	mg O_2/l	
Potencial de Hidrogeno (pH)	Toma de muestra y análisis en laboratorio	Unidades de pH	
Temperatura (T)	Medición in situ termómetro o multiparámetro	°C	

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

- ✓ Fase 3: Identificación y valoración de impacto ambiental y socioeconómico: en esta fase se emplearán las siguientes metodologías:

  Matriz de identificación de impactos

  Existen variedad de metodologías para la identificación y evaluación de impactos ambientales entre las que se destacan las siguientes: reuniones de expertos, listas de chequeo, matrices simples de causa-efecto, diagramas de flujo y grafos, cartografía y sistemas de información geográfica entre otros.
  Para la presente investigación se propone el uso de una matriz causa-efecto de interacciones simples y por etapas del proyecto, metodologías cualitativas preliminares que proporciona información para valorar las diversas actividades de un mismo proyecto, este consiste en mostrar las relaciones que existen entre los efectos sobre los atributos ambientales, sociales y económicos seleccionados y las etapas del proyecto a desarrollar.

  Matriz de evaluación de impacto:

  Se aplicará metodología matricial de Conesa simplificado para la valoración de impactos ambientales, esta esta metodología se basa en la calificación de 11 atributos que buscan describir de manera detallada el impacto ambiental. Cada atributo es evaluado, empleando escalas cualitativas o adjetivos (como alto, medio, bajo, etc.) a los cuales se les ha asignado un valor numérico, de manera que éste se incrementa en la medida que describe una situación indeseable (Conesa, 2010). En la siguiente tabla se describen los atributos del método:

Tabla 7. Atributos Método Conesa Simplificado.

Atributo	Descripción	Calificación	Valor
NATURALEZA (N)	Expresa el carácter benéfico o perjudicial de las acciones	Impacto beneficioso	(+)
		Impacto perjudicial	(-)
INTENSIDAD (IN)	Expresa el grado de destrucción sobre el factor considerado	Baja	1
		Media	2
		Alta	4
		Total	12
EXTENSIÓN (EX)	Se refiere al área de influencia del impacto con relación al entorno del proyecto	Puntual	1
		Parcial	2
		Extenso	4
		Total	8
		Crítica	+4
MOMENTO (MO)	Es el plazo de manifestación del impacto	Largo plazo (> 1 año)	1
		Mediano plazo (< 1 año)	2
		Corto plazo (< 1 mes)	4
		Crítico	+4
PERSISTENCIA (PE)	Indica la permanencia del impacto	Fugaz (< 1 mes)	1
		Temporal (<1 año)	2
		Permanente (> 1 año)	4
REVERSIBILIDAD (RV)	Expresa la posibilidad de retornar a las condiciones previas a la acción, por medios naturales	Corto plazo (1 año)	1
		Medio plazo (1-5 años)	2
		Irreversible (> 5 años)	4
RECUPERABILIDAD (RC)	Expresa la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas al proyecto mediante la introducción de medidas correctoras	Recuperable de manera inmediata	1
		Recuperable a mediano plazo	2
		Mitigable	4
		Irrecuperable	8
ACUMULACIÓN (AC)	Incremento progresivo	Simple	1
		Acumulativo	4
SINERGIA (SI)	Contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples	Simple	1
		Sinérgico	2
		Muy Sinérgico	4
EFECTO (EF)	Relación causa/efecto	Indirecto	1
		Directo	4
PERIODICIDAD (PR)	Regularidad de la manifestación	Irregular, discontinuo	1
		Periódico	2
		Continuo	4

Fuente: Modificado de (Conesa, 2010)

Esta metodología define la importancia del impacto mediante la siguiente ecuación:

$$I = \pm[(3\ In) + (2\ Ex) + Mo + Pe + Rv + Rc + Si + Ac + Ef + Pr]$$

Para la interpretación del resultado se aplicará la siguiente escala:

Tabla 8. Clasificación del Impacto Ambiental

Categoría	Clasificación
Irrelevante	<25
Moderado	25-50
Severo	50-75
Critico	>75

Fuente: (Conesa, 2010)

- ✓ Fase 4: Análisis de viabilidad para la implementación del modelo de economía circular: Finalmente, en esta fase se realizará un análisis de los resultados obtenidos en las fases anteriores y se procederá a evaluar la viabilidad de la implementación de un modelo de economía circular, de acuerdo a la revisión de la literatura realizada en el proyecto de investigación.

6. Discusión y Resultados

El consumo de energía del municipio de Aracataca en el sector residencial según los datos reportados por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios - SUI, es el siguiente (SUI, 2021):

Tabla 9. Consumo de energía eléctrica en zona residencial

Consumo de energía kWh/mes		
Mes	2020	2021
Ene	1.510.315,80	1.457.790,90
Feb	1.328.711,40	1,401,206.3
Mar	1.392.531,60	1,483,250.1
Abr	1.439.486,84	1,437,626.9
May	1.330.186,80	1,430,332.1
Jun	1.311.135,83	
Jul	1.365.183,90	

Ago	1.538.516,90	
Sep	1.371.631,70	
Oct	1.488.578,30	
Nov	1.504.483,40	
Dic	1.482.129,90	
Promedio	**1.421.907,70**	**1.457.790,90**

Fuente: http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_096

El resultado obtenido de producción de energía eléctrica en este estudio fue de 8.626,84 kWh/día lo equivalente a 258.805,2 kWh/mes, al compáralo con los consumos promedio presentado en la Tabla 9, se muestra que este valor corresponde al 18% de la demanda energética del municipio en su área residencial, no obstante, es importante recalcar que el resultado obtenido, es el calculado en función de una operación correspondiente al 33% de cobertura actual del servicio de alcantarillado del municipio, por tanto este potencial energético incrementará proporcionalmente con el incremento de la cobertura del servicio.

Por otro lado, se determinó que Aguas de Aracataca S.A. E.S.P. en el segundo y tercer trimestre del presente año reportó consumos de energía para operación de la estación de bombeo de aguas residuales EBAR, su Planta de Tratamiento de Agua Potable PTAP San José y el tanque elevado San Martin correspondientes a:

Tabla 10. Consumo de energía eléctrica reportado por el operador Aguas de Aracataca S.A.

PLANTA	Consumo de energía (kWh/mes)						
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
EBAR	8.360	5280	5280	4840	7040	6600	6233
PTAP San José	0	3200	3360	4800	11360	9120	5307
Tanque elevado San Martín	17.120	15.920	18.560	15.440	18.400	25.200	18440
TOTAL, KWh	25.480	24.400	27.200	25.080	36.800	40.920	29980

Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P.

Contrarrestando los valores de la Tabla 10. Con lo obtenido en el estudio de 258.805,2 kWh/mes., se obtiene que es posible abastecer de energía eléctrica la operación en las plantas AGUAS de ARACATACA S.A. en su totalidad, el promedio reportado por la operadora correspondiente 29.890 kWh/mes, al solo representar el 12% del potencial energético resultado.

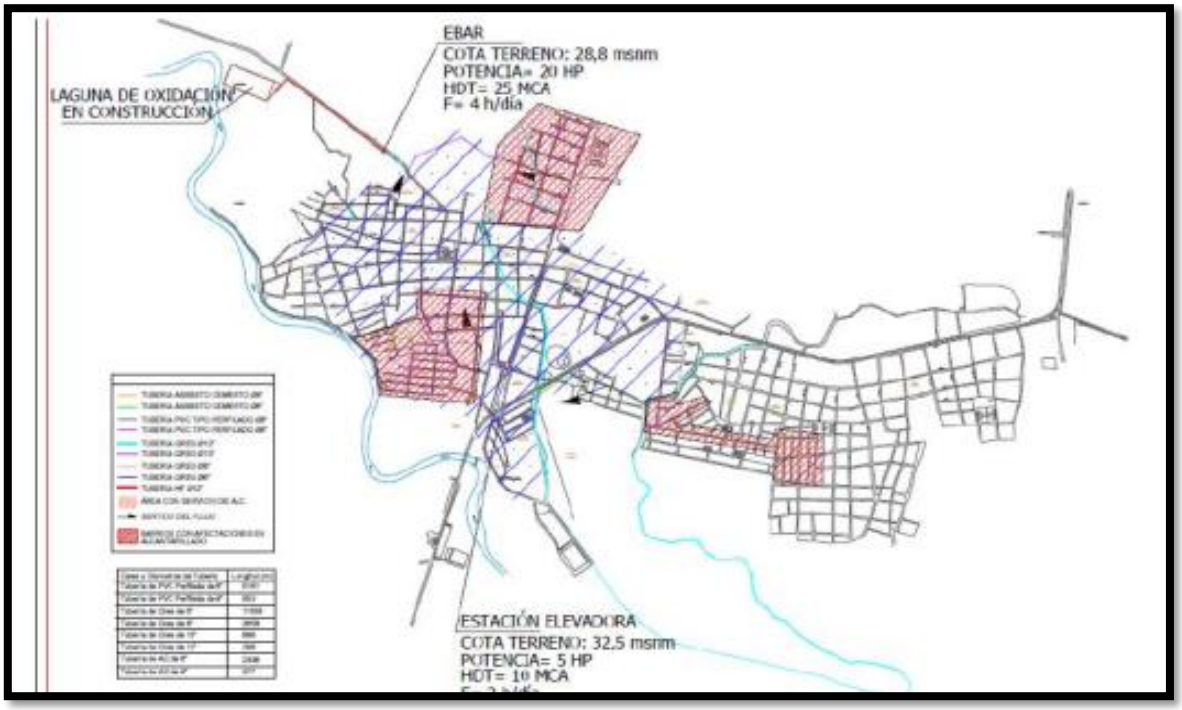
En cuanto a los resultados de la evaluación de los impactos socioambientales de la implementación del proyecto como se evidenció en el análisis de resultados del capítulo III, en su ítem 6.3.3. Análisis de resultados, se demuestra que los impactos socioambientales positivos del proyecto tienen los valores más altos de importancia, principalmente en lo relacionado a la generación de empleo y cambios de la economía local, los impactos socioambientales negativos son es su totalidad irrelevantes, a diferencia de los impactos de naturaleza positiva que se presentan como moderados, presentando así la favorabilidad socioambiental de la implementación de este modelo de económica circular. A continuación, se presentan de forma detallada los hallazgos que permitieron llegar a estos resultados:

6.1. Capítulo I - Descripción del sistema de captación y aprovechamiento de aguas residuales domésticas

6.1.1. Generalidades de las aguas residuales domésticas del municipio de Aracataca

Para analizar el aprovechamiento de las aguas residuales domésticas generadas por el municipio de Aracataca, se hace necesario inicialmente conocer el sistema de recolección implementado por el municipio relacionado principalmente con el sistema de alcantarillado público operado por la empresa AGUAS DE ARACATACA S.A. E.S.P. Es así, como se realizaron dos visitas técnicas al municipio los días 24 de agosto y 08 de octubre del 2021, donde se estableció un dialogo con representantes de la empresa operadora del servicio, quienes se convirtieron en la fuente primaria de información, suministrando toda la documentación técnica asociada a los componentes del sistema de alcantarillado sanitario y el tratamiento de las aguas residuales efectuado en el municipio.

Figura 9 Esquema del Sistema de Alcantarillado de Aracataca



Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P (Superservicios, 2018) (p. 51).

El sistema de alcantarillado funciona por gravedad. En la cabecera municipal de Aracataca, se pudo establecer que la recolección de aguas residuales se realiza a través de tuberías de diámetros entre los 6” y 12”. Respecto a mantenimientos en la red, el prestador menciona que realiza mantenimiento preventivo dos veces al año con el equipo vactor durante 5 meses, divididos 2 meses y medio en el primer semestre y 2 y medio en el segundo semestre del año. Seguido a esto se realizan mantenimientos correctivos y preventivos diariamente con, varillas de rotosonada y bomba sumergible. En la red de alcantarillado existe una estación de bombeo de aguas residuales, cuyas características se describen a continuación:

Tabla 11 Características estación de bombeo aguas residuales

Estación	Bombas Instaladas	Capacidad Instalada (l/S)	Bombas Operación	Altura de bombeo (m.c.a)	Sistema de energía alterno
Aracataca	2	132 c/u	1	13	Sí

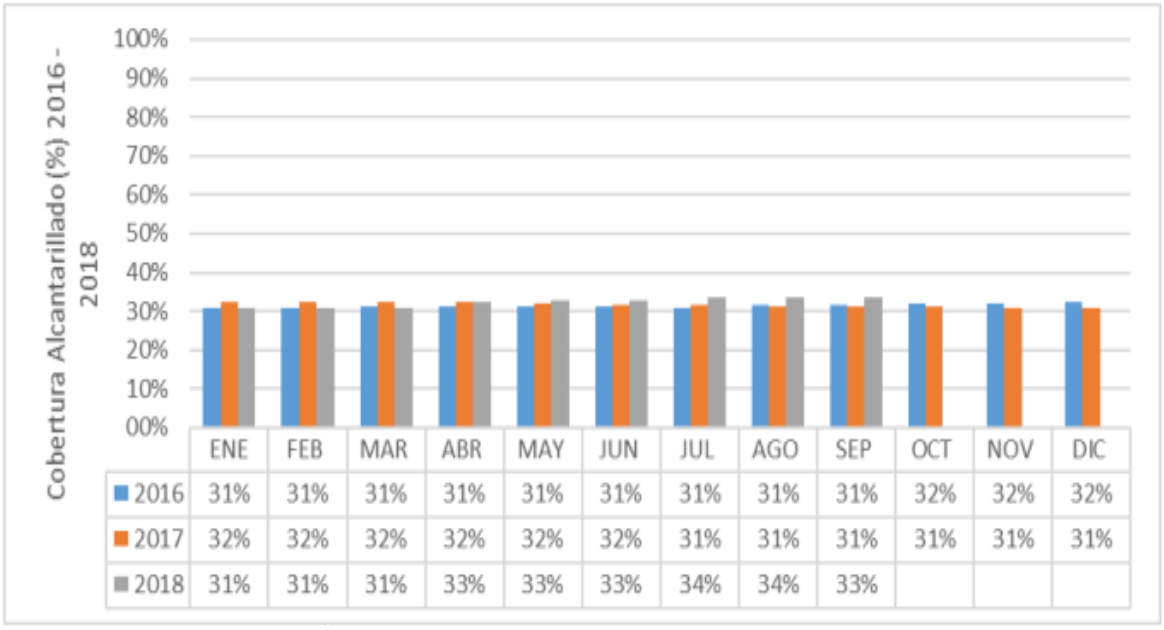
Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P (Superservicios, 2018) (p. 54).

Imagen 1 Estación de Bombeo de Aguas Residuales del municipio de Aracataca
Fuente: Registro fotográfico - visita 24 de agosto de 2021

La Estación de Bombeo de Aguas Residuales (EBAR) del Municipio de Aracataca consiste en un cerramiento de 112 m^2 y una caseta de bombeo de 40 m^2, localizada en la proyección de la Carrera 6, Finca Las Palmas, correspondiente a las coordenadas 10°35'1.02" N – 74°11'42.94" O. La EBAR recibe en un tanque enterrado de 48 m^3 de capacidad, todas las aguas residuales del municipio que confluyen por un emisario final de 27" de diámetro, y cuenta con los siguientes elementos: Rejillas de cribado a la entrada, 2 bombas de 132 lps (11.405 m3/d) c/u con altura de bombeo de 13 m.c.a y sendos motores sumergibles de 115 HP. Se realiza el bombeo a través de una línea en PVC 16" RDE 21 de 585 m hasta el sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR).

Inicialmente, esta infraestructura de recolección de las aguas residuales generadas por el municipio, sería aprovechada como el sistema de conducción de la materia prima de insumo para la generación de biogás, y se articularía con los planes de expansión en cobertura de alcantarillado que se encuentra contemplada en los planes de desarrollo territorial, en el entendido que la cobertura de alcantarillado es del 33,70% de acuerdo al censo del DANE realizado en el año 2018 y conforme al informe de prestadores realizado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Figura 10 Cobertura de alcantarillado 2016-2018



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2016	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	32%	32%	32%
2017	32%	32%	32%	32%	32%	32%	31%	31%	31%	31%	31%	31%
2018	31%	31%	31%	33%	33%	33%	34%	34%	33%			

Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P (Superservicios, 2018) (p. 51).

Revisando el Plan de Desarrollo 2020-2023 “Luchamos de corazón por ARACATACA”, se pudo identificar que la apuesta del municipio es Velar porque las empresas contratista y operadoras de los servicios de saneamiento básico cumplan a cavidad con los proyectos estipulados para vigencia 2020-2023, manifestando que actualmente Aracataca está sobre el 62% en acueducto y un 33% en alcantarillado por lo que debe realizarse una veeduría al operador del servicio para fijar metas claras en la ampliación de cobertura tanto de acueducto como alcantarillado. Del mismo modo, que se realiza un análisis de la cobertura de energía eléctrica necesario para la prestación eficiente de los servicios públicos para la cabecera urbana del 94% y la zona rural del 88,9% pero con déficit en la calidad de prestación.

6.1.2. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

Durante el recorrido en campo, se pudo identificar que el sistema de tratamiento de las aguas residuales, que vierten sus aguas tratadas directamente al rio Aracataca, se encuentran ubicado en el costado Nor-Oeste de la cabecera municipal, en la salida al corregimiento del cauca a unos 2 kilómetros del casco urbano del municipio de Aracataca; está constituido actualmente por un pozo cribado, un pozo de bombas, un desarenador y una laguna de oxidación. A este se le descarga el 100% de caudal de las aguas residuales que proveniente de toda la

población del municipio de Aracataca a través del colector final de 30'', y donde se puede observar que el operador se encuentra realizando un tratamiento primario y secundario a las aguas residuales, para ser vertidas al río Aracataca ignorando el potencial de sub-productos que pueden generarse en el proceso, en el entendido, que no se identificó otro tipo de infraestructura en la zona.

El proceso de tratamiento puede ser resumido mediante el siguiente proceso: las aguas residuales procedentes del casco urbano, llegan primero a un pozo cribado el cual es una estructura de entrada compuesta por dos módulos; cada uno de ellos consta de una estructura de cribado donde el agua pasa por canal rectangular de 4m x 0.80 y allí atraviesa una rejilla en acero inoxidable de 2.80mx0.80 en dos secciones en donde quedan retenidos los sólidos gruesos, los cuales son removidos manualmente hacia una rejilla de escurrimiento en la parte superior de cada canal. Además de esto cuenta con una compuerta manual que impide el paso del agua y permite realizar las labores rutinarias de limpieza y mantenimiento.

Imagen 2 Mantenimiento del Pozo cribado con el equipo de succión
Fuente: Registro fotográfico Aguas de Aracataca

Imagen 3 Limpieza Manual de la rejilla
Fuente: Registro fotográfico Aguas de Aracataca

Seguidamente pasa al pozo de bombas compuesta por dos bombas de 130lts/s cada una, mediante sistema eléctrico que son encendidas impulsando así las aguas residuales desde la parte más baja del pozo a través de una tubería de HD hacia una tubería de impulsión de RDE 21 hasta llegar al compartimiento del desarenador y dos más en la salida que permiten sacarlos de operación para efectos de limpieza y mantenimiento.

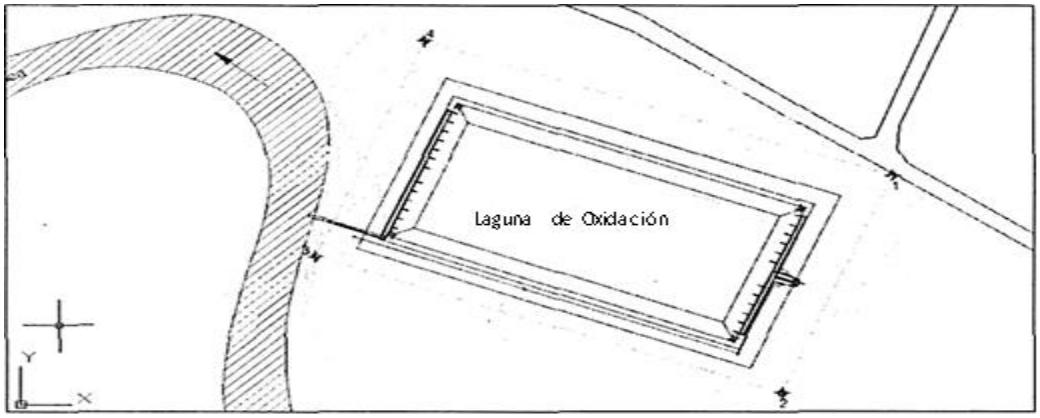
Imagen 4 Pozo de bombas
Fuente: Registro fotográfico – Visita 08 de octubre del 2021

Así mismo, el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del Municipio cuenta con un vertedero lateral para aliviar caudales pico encima del caudal de diseño con una tubería de PVC de 12'' que desagua a la red excesos hasta llegar al rio Aracataca. Una vez que las aguas lleguen a la unidad de desarenado a través de los vertederos que tienen los desarenadores llegan hasta el canal de distribución, el cual tiene una sección rectangular y cuenta con 14 tubos de 8'' PVC donde pasan las aguas a la laguna de oxidación.

Imagen 5 Desarenador de entrada a la laguna
Fuente: Registro fotográfico – Visita 08 de octubre del 2021

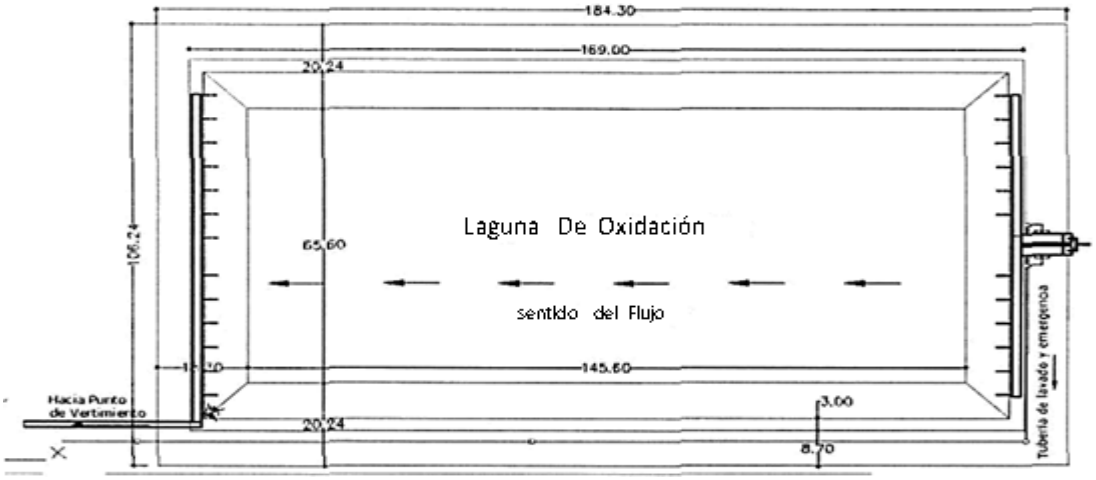
La laguna de Oxidación o estabilización que tiene 80 m de ancho y 160 m de longitud, proporcionando un área total de 12.800 m^2 en donde el agua permanece en contacto con el entorno, principalmente el aire, experimentando un proceso de oxidación y sedimentación, transformando así la materia orgánica en otros tipos de nutrientes que pasan a formar parte de la comunidad diversa de planta y ecosistema bacteriano acuático. Luego de este proceso, la demanda química o biológica de oxigeno del agua a la salida de la laguna de oxidación se encuentra en el orden entre los 70% y 85 %, los cuales son estándares para la liberación de estas aguas hacia una fuente receptora, de tal manera que esta última absorba los residuos sin peligro para el medio ambiente y las especies del entorno (Superservicios, 2018).

Figura 11 Distribución Espacial de la Laguna



Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P

Figura 12 Dimensiones de la de la Laguna



Fuente: Aguas de Aracataca S.A. E.S.P

La laguna de Oxidación presenta dimensiones aproximadas de 160 m de largo, 80 m de ancho, una profundidad de 2,2 m y una altura neta de lámina de agua de 1,5 m, y fue construida mediante contrato CO010-2014 llamado “Optimización y Ampliación del sistema de Alcantarillado Sanitario del Municipio de Aracataca” y fue recibida para inicio de su operación por AGUAS DE ARACATACA S.A. ESP en el mes de febrero de 2018, por lo que se puede afirmar que actualmente la infraestructura se encuentra en buen estado, dado la fecha reciente de su construcción. No obstante, según lo observado en campo se requiere mejorar o aumentar la frecuencia en las labores de limpieza de la laguna.

Imagen 6 Laguna de oxidación del municipio de Aracataca 2018
Fuente: Registro fotográfico SSPD – visita octubre de 2018

Imagen 7 Laguna de oxidación del municipio de Aracataca 2021
Fuente: Registro fotográfico – visita octubre de 2021

Posterior al tratamiento realizado por el sistema, el agua superficial de la laguna de oxidación se distribuye nuevamente a un canal de recolección a través de una serie de tubos de 8'', el cual conduce las aguas tratadas por medio de un vertedero entrega estas aguas hacia un canal que conduce hasta el Rio Aracataca donde finalmente se termina con el 100% del tratamiento aproximadamente a unos dos kilómetros del casco urbano. Cabe resaltar que, el municipio cuenta con un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV aprobado por la Corporación Autónoma Regional del Magdalena - CORPAMAG mediante Resolución No. 483 del 2 de marzo de 2009

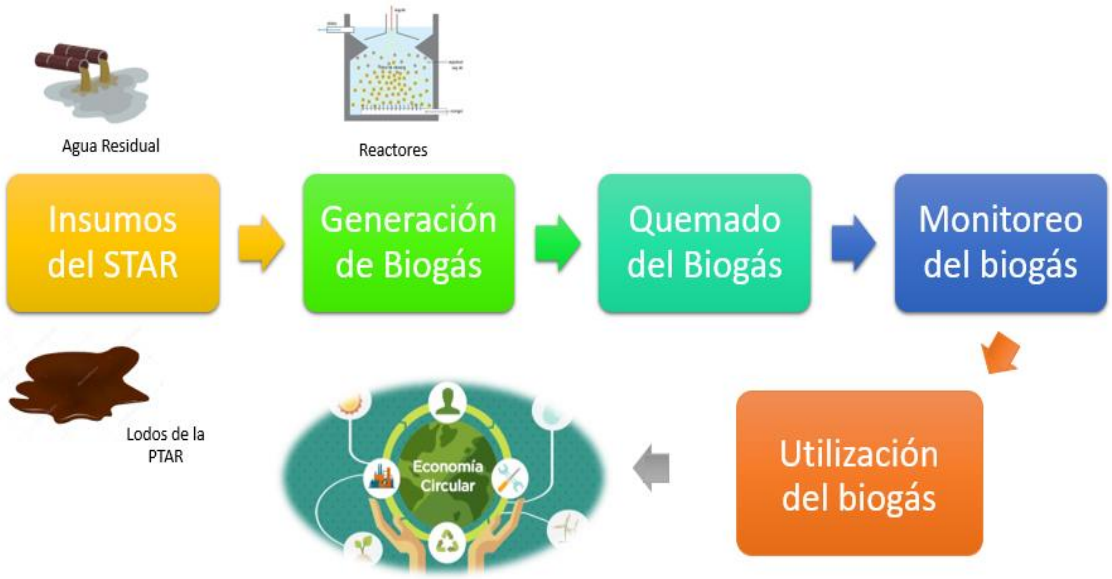
Imagen 8 Canal que conduce las aguas hacia el Rio Aracataca.
Fuente: Registro fotográfico - visita octubre de 2021

Actualmente, se están beneficiando 1867 usuarios con el servicio de alcantarillado con una cobertura del 33%. Este sistema de tratamiento está diseñado para beneficiar el 100% de la población hasta el año 2032 con una población futura de 30.688 habitantes del municipio de Aracataca.

6.1.3. Sistema para el aprovechamiento y conversión de aguas residuales domésticas en energías renovables

Uno de los procesos más recomendados por la literatura para el aprovechamiento y conversión de las aguas residuales en biogás y que de acuerdo con la infraestructura observada en campo se sugiere aplicar en el municipio, es la digestión anaerobia, la cual es un proceso de degradación biológica de la materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno, tiene como subproducto principal el biogás. En una PTAR, el sustrato para la producción del biogás es la materia orgánica contenida en el agua residual y en el lodo de purga (GIZ, 2017). Para lo cual, se relaciona a continuación, los principales elementos que conforman el sistema que se deberá implementar para tales fines.

Figura 13 Elementos del sistema de aprovechamiento y conversión de aguas residuales domésticas en energías renovables



Fuente: Elaboración Propia, 2021

6.1.3.1. Características del agua residual municipal

El agua residual municipal está compuesta volumétricamente en un 99.8% por agua y el 0.2% restante son sólidos suspendidos y sólidos disueltos, formados por compuestos orgánicos, nutrientes, microorganismos y sólidos inertes. Los volúmenes, composiciones específicas y concentraciones de los distintos compuestos, sustratos, materiales, entre otros presentes en el agua residual dependen de la disponibilidad de agua potable, del nivel socioeconómico de la población, de las infiltraciones de agua de lluvia en la red de alcantarillado y de las actividades desarrolladas (incluidas las industriales) en la zona donde se recolecta el agua residual (Von Sperling, 2005)

Las características de las aguas residuales son los parámetros que se pueden comparar con una norma o línea base, evidenciando que compuestos o elementos se deben remover, si se implementa un sistema de tratamiento, o para identificar la calidad ambiental del vertimiento. Estas se clasifican en físicas, químicas y biológicas (Quitián, 2018).

Características físicas

Tabla 12 Características físicas de las aguas residuales domésticas

Parámetro	Generalidades
Temperatura	La temperatura de las aguas residuales es mayor que la de las aguas no contaminadas, esta variación se da debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. Los rangos de temperatura de las aguas residuales oscilan entre 10 a 21 °C.
Turbidez	La turbidez de un agua residual es provocada por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal. Es un fenómeno óptico que consiste en una absorción de luz combinada con un proceso de difusión. Las partículas insolubles de esta turbidez pueden ser aportadas tanto por procesos de arrastre como de remoción de tierras y también por vertidos urbanos e industriales
Color	Es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica.
Olor	El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica
Sólidos Totales	Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables.
Sólidos suspendidos	Son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, etc., y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos sencillos. Dentro de los sólidos suspendidos se pueden distinguir los sólidos sedimentables, que se depositarán por gravedad en el fondo de los receptores. Estos sólidos sedimentables, son una medida aproximada de la cantidad de lodo que se eliminará mediante sedimentación
Sólidos filtrables	Esta fracción se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10-3 y 1 micra. Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas e iones que se encuentran disueltos en el agua. Por lo general, se requiere una coagulación seguida de sedimentación para eliminar estas partículas de la suspensión.

Fuente: (Quitián, 2018). (p. 19).

Características Químicas

Tabla 13 Características químicas de las aguas residuales domésticas

<table>
<tr><th>Parámetro</th><th>Generalidades</th></tr>
<tr><td>Materia orgánica</td><td>La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. La urea, principal constituyente de la orina, es un compuesto orgánico del agua residual. En razón de la rapidez con que se descompone, la urea es raramente hallada en un agua residual que no sea muy reciente. El agua residual contiene también pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas como agentes Tensoactivos, fenoles y pesticidas usados en la agricultura.

Parámetros que dan a conocer el contenido de materia orgánica

<table>
<tr><th>Elemento</th><th>Relación con el agua residual</th></tr>
<tr><td>Demanda bioquímica de oxigeno (DBO)</td><td>Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua. Esta prueba se realiza durante 5 ó 3 días a 20 ºC por lo que se expresa como DBO ó DBO5 respectivamente</td></tr>
<tr><td>Demanda química de oxigeno (DQO)</td><td>Mide la cantidad de materia orgánica del agua, mediante la determinación del oxígeno necesario para oxidarla, pero en este caso proporcionado por un oxidante químico como el permanganato potásico o el dicromato potásico</td></tr>
<tr><td>Carbono Orgánico Total</td><td>Se mide mediante la introducción de una cantidad conocida de muestra en un horno a alta temperatura. El carbono orgánico se oxida a CO2 , en presencia de un catalizador, y se cuantifica mediante un analizador de infrarrojos. Pero como no se oxidan todos los componentes orgánicos presentes, los valores de COT dan una estimación de carbono orgánico inferior a la rea</td></tr>
<tr><td>Demanda Total de Oxígeno</td><td>Esta prueba se realiza en una cámara de combustión catalizada con platino, en la cual se produce una transformación de la materia orgánica en productos finales estables. El oxígeno residual es analizado por cromatografía gaseosa, y por diferencia obtenemos la DTO.</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Materia inorgánica</td><td>Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><th>Elemento</th><th>Relación con el agua residual</th></tr>
<tr><td>Hidrogeno (pH)</td><td>El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra entre 6.5 y 7.5.</td></tr>
<tr><td>Cloruros</td><td>Proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua, intrusión del agua salada (zonas costeras), agua residual doméstica, agrícola e industrial. Suministra información sobre el grado de concentración del agua residual</td></tr>
<tr><td>Nitrógeno</td><td>Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Básico para síntesis de proteínas.</td></tr>
<tr><td>Fosforo</td><td>Incrementa la tendencia de proliferación de algas en el receptor. Íntimamente ligado, igual que el nitrógeno, al problema de la eutrofización.</td></tr>
<tr><td>Azufre</td><td>Requerido en la síntesis de las proteínas y liberado en su degradación</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Gases</td><td>La interacción química de los diferentes compuestos que llegan al agua transforma las propiedades de las aguas residuales generando así reacciones que tienen como producto gases diversos con diferente concentración. Los más comunes encontrados son el oxígeno disuelto, ácido sulfhídrico y metano</td></tr>
<tr><td>Oxígeno disuelto</td><td>Es un gas que va siendo consumido por la actividad química y biológica. La cantidad de oxígeno disuelto depende de muchos factores, como temperatura, altitud, movimientos del curso receptor, actividad biológica, actividad química, etc</td></tr>
<tr><td>Ácido sulfhídrico</td><td>El H_2S es un producto natural de la descomposición anaerobia de la materia orgánica que contiene azufre o por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Su presencia, que se manifiesta fundamentalmente por los olores que produce, es un indicativo de la evolución y estado de un agua residual.</td></tr>
<tr><td>Anhídrido carbónico</td><td>Se produce en la fermentación de los compuestos orgánicos de las aguas residuales negras</td></tr>
<tr><td>Metano</td><td>Se forma en la descomposición anaerobia de la materia orgánica por la reducción bacteriana del CO2.</td></tr>
</table>

Fuente: (Quitián, 2018). (p. 10). Elaborado a partir de Espigares, M & Pérez, J. (1985), Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada.

6.1.3.2. Características del lodo residual de PTAR municipales

Para que pueda emplearse como sustrato en la digestión anaerobia, el lodo residual municipal debe presentar elevadas concentraciones de materia orgánica

biodegradable. Esto se aplica sobre todo a los lodos generados en los clarificadores primarios y a los lodos secundarios producidos en el tratamiento biológico aerobio. Los lodos secundarios están compuestos predominantemente por biomasa; es decir, células bacterianas que crecieron como resultado del proceso de conversión biológica. En la Figura 14 se describe la idoneidad de los lodos formados en la PTAR como sustrato para la digestión anaerobia, mientras que en la figura 15 se presentan valores típicos de producción de lodos según el proceso u operación unitaria que los genera en la PTAR.

Figura 14 Origen y descripción de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales

Fuente: (GIZ, 2017) (p. 26).

Los lodos están caracterizados por los parámetros sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST), que resultan de la conversión de la DQO del agua residual en lodo. El contenido de materia orgánica del lodo está caracterizado por los parámetros sólidos totales volátiles (STV) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). Los lodos que serán digeridos tienen una relación típica entre 75 y 80% STV/ST y los lodos digeridos tienen entre 60 y 65% STV/ST (Andreoli, Von Sperling, & Fernandes, 2010), con el espesamiento previo del lodo, un requisito importante para el dimensionamiento del digestor. En condiciones controladas, el digestor anaerobio reduce alrededor de 50% de SV del lodo (si se supone una mezcla de lodo primario y secundario sin estabilización previa). La producción específica de metano se sitúa entre 0.72 y 1.12Nm3CH4/kg SV destruido (Metcalf & Eddy, 2013).

Figura 15 Tasas de producción y características típicas de los lodos

ORIGEN DEL SISTEMA	RELACIÓN STV/ST	kg SST/kg DQO APLICADA	%SST LODO ESPESADO
Lodo primario – clarificador primario	0.75-0.80	0.35-0.45	4-8
Lodo de purga – Lodos activados convencionales	0.70-0.80	0.50-0.55	2-6
Lodo de purga – Lodos activados en aireación extendida	0.55-0.65	0.25-0.35	2-6

Fuente: (GIZ, 2017) (p. 27).

6.1.3.3. Proceso de Generación de Biogás

El biogás generado en procesos de tratamiento anaeróbico está conformado en su mayor parte por metano (50 - 75%). Este gas es inflamable, por lo que puede ser utilizado con fines energéticos.

Figura 16. Pasos para el aprovechamiento de Biogás

Fuente: Elaboración Propia, 2021. Modificado (Nolasco, 2010) (p. 42).

A continuación, se describen las etapas:

- Generación

El biodigestor anaerobio es uno de los métodos más utilizados para la captura del gas metano CH4 que se genera a partir de la descomposición de la materia orgánica contenida en las aguas residuales, contribuyendo en la mitigación de los gases efecto invernadero y usar el metano para la generación de energía eléctrica, Esta es una estructura profunda cubierta por una geomembrana donde se colectan las aguas residuales de la planta de tratamiento del municipio, que mediante acción bacteriológica reduce la carga orgánica y producen biogás, el cual por su contenido de metano (50-65%) constituye un valioso combustible. El biogás capturado es llevado a dos procesos actualmente uno de combustión a través de un quemador y el otro es su combustión en generadores eléctricos con el fin de transformar el biogás en energía eléctrica. El Biodigestor tipo laguna, consistente en una laguna recubierta capaz de mantener condiciones anaeróbicas en donde el flujo de aguas residuales a tratar ingresa y a través de procesos bacteriológicos produce biogás. Para el caso de municipio de Aracataca, el biodigestor contaría con las mismas dimensiones de la laguna de oxidación, y el terreno identificado en la visita de campo supliría los requerimientos de espacio para la instalación del sistema.

Imagen 9 Ejemplo de biodigestor anaerobio
Fuente: Tomada de (Danish Energy Agency, 2019) (p. 411).

- Acumulación y Captación

El biogás producido queda atrapado en la parte superior del reactor o laguna por una cubierta flexible o rígida. En pequeñas instalaciones, la forma más común de acumularlo es en dicha cubierta; sin embargo, existen casos en que el biogás no es acumulado en el reactor sino en estructuras ad hoc. En las grandes instalaciones es común que antes de la acumulación se remueva el ácido sulfhídrico para evitar la corrosión, y se realice un lavado del gas con el fin de separar el dióxido de carbono para así reducir el volumen necesario de la unidad de acumulación. Dado que las cubiertas no manejan presiones altas, se hace necesario la instalación de un equipo capaz de succionar el biogás producido por el biodigestor y lo empuje a través de todo el sistema de conducción hasta su combustión. El equipo a instalar (Soplador), es el adecuado para manejar el flujo del biogás y presurizado hasta un máximo de 180mba.

- Conducción

La conducción del biogás se realizará por tuberías en polietileno de alta densidad (HDPE), las cuales son inertes al sulfuro de hidrógeno, resistentes a posibles daños producidos por la luz solar, personas o animales, la conducción debe ser enterradas o elevadas y pintadas (Nolasco, 2010). Adicionalmente se instalarán puertos para el muestreo del biogás y válvulas de alivio de biogás en caso de emergencia.

- Condensación

El biogás contiene cierto porcentaje de vapor de agua, el cual arrastra gran cantidad de partículas sólidas inertes. Una vez que el gas abandona el digestor o la estructura de acumulación, ingresa a la tubería de conducción donde la temperatura disminuye notablemente, produciéndose la condensación del vapor de agua. El vapor debe ser removido del biogás debido a que produce obstrucciones en las tuberías y tanto el vapor de agua como las partículas que acarrea, disminuyen el rendimiento energético del biogás. Con la finalidad de cumplir con los parámetros y eliminar la humedad antes de ser enviado a la combustión, se debe instalar un sistema de secado de biogás (Chiler) el cual, mediante un sistema de intercambio de calor, disminuye la temperatura del biogás casi de manera inmediata permitiendo la condensación de la humedad contenida en el biogás.

- Remoción de ácido sulfhídrico (H_2S)

El ácido sulfhídrico se encuentra en el biogás en concentraciones de 0,1% a 0,5%. Es recomendable que este compuesto sea removido para evitar los siguientes

inconvenientes:

- Corrosión de las tuberías e instalaciones;
- Fuerte olor;
- Problemas de salud;
- Producción de ácido sulfúrico (H2SO4), que ocurre cuando el sulfhídrico se combina con el oxígeno. El H2SO4 daña motores e instalaciones

Debido a su bajo costo, efectividad, simplicidad y baja resistencia al flujo de gas, se debe filtrar el biogás a fin de eliminar el ácido sulfhídrico contenido en el biogás, para esto se instalarán dos filtros biológicos tipo tanque que reducen los niveles de ácido sulfhídrico de manera considerable.

6.1.3.4. Quemado del Biogás

Se deberá instalar un quemador de alta eficiencia, del tipo cerrado, el cual tiene un sistema de control automático de temperatura a través de la inclusión de aire en la cámara de combustión, cuenta con un sistema de ignición automático que enciende un piloto para posteriormente realizar la combustión. Además, se instalará en el quemador un medidor de flujo de emisiones y un puerto de muestreo para analizar el contenido de metano en el biogás no quemado residual. Para controlar la operación del quemador y registrar la misma, se instalará un sistema de detección de flama, así como termómetros que indican la temperatura de combustión dentro de la cámara.

6.1.3.5. Monitoreo del Biogás

Se instalarán dos medidores de flujo másico el cual determina el flujo del biogás a través una compensación por temperatura del mismo, totaliza el flujo y adicionalmente muestra el flujo instantáneo. La ubicación de estos medidores es la salida del biodigestor y la entrada del quemador. Así mismo, se instalarán dos analizadores de gases continuos los cuales indican la fracción volumétrica contenida en el biogás del metano (CH4), oxigeno (O2) y bióxido de carbono (CO2) y ácido sulfhídrico (H2S). Los resultados del análisis de gas, son registrados a través del controlador lógico programable, la ubicación de estos analizadores, es antes de la entrada del biogás al quemador y a la salida del quemador para el análisis del metano residual en los gases emitidos por el quemador.

6.1.3.6. Utilización del Biogás

Como se ha mencionado anteriormente, el uso del biogás generado será como vector energético, lo cual es recomendable desde el punto de vista ambiental y económico. El poder calórico inferior (PCI) de un biogás "típico" es de 21.5 MJ/Nm3, cercano al del gas natural, que tiene un PCI de 37.5 MJ/Nm3. Por lo tanto, la pérdida de biogás, el no aprovecharlo o su simple ignición en un quemador debe ser la excepción cuando no haya una alternativa de uso más noble (GIZ, 2017).

Una vez el biogás ha tenido el tratamiento anteriormente descrito, es enviado a través de una tubería desde el STAR hasta el cuarto de control ubicado en la planta de tratamiento soportado por generadores de 750 KW, con motor de combustión interna alimentados por el biogás, para su posterior conexión con las líneas de transmisión eléctrica. A continuación, se relacionan los equipos que conforman el sistema de generación:

1) **Tablero FPC**: Se encarga de controlar el gobernador y el regulador de voltaje, para manejar la velocidad o la potencia activa compartida y el voltaje o la potencia reactiva compartida, este controlador también tiene funciones de protección, de sobre potencia, sobre corriente, sobre voltaje, sub voltaje, de potencia inversa sobre y sub frecuencia, etc. Y maneja los interruptores de los generadores, además de este controlador posee una terminal de dialogo HMI gráfica, y también un PLC, que maneja las protecciones mecánicas del motor, temperaturas de los cilindros, de rodamientos, presión del gas entre otras cosas, además contiene un convertidor de señal de tensiones, fuentes y concentradores de comunicación.

2) **Tableros GBCP1 y GBCP2**: Estos tableros contienen los interruptores totalizadores de los generadores. Y por lo tanto a estos tableros llegan las acometidas de potencia, y se sale para el transformador de generación; además en este tablero está el control de la ventilación y la refrigeración de los motores.

3) **Motogenerador:** Es un motor de combustión interna, que convierte la energía mecánica del motor de gas en energía eléctrica, puede generar 750 KW, el combustible usado es el biogás que para su buen funcionamiento se requiere que este posea las siguientes características:
   • La temperatura del biogás no debe estar por encima de los 40 °C
   • La presión del gas debe estar en un rango de 3KPa – 10 KPa, la tasa de variación debe ser menor o igual a 1 KPa/min.

• El volumen de metano en el biogás no debe ser menor a 45%, solo puede variar, la tasa de variación debe ser menor o igual a 2%/min
• El ácido sulfhídrico contenido en el biogás debe ser menor o igual a 200mg/Nm3
• Las impurezas deben tener un tamaño igual o menor a 5 µm, el contenido de impurezas en el gas debe ser menor o igual a 30 mg/Nm3 y el contenido de agua del biogás debe ser menor o igual a 40g/Nm3

6.1.3.7. Otras consideraciones

Si bien el objetivo general de la implementación del biodigestor anaerobio es la generación de energía eléctrica, en el proceso de generación del biogás; se pueden presentar otros usos que se pueden desarrollar en la PTAR del municipio, como los siguientes:

1) Los lodos estabilizados del biodigestor pueden ser aprovechados para la elaboración de compost orgánico, para lo cual existe la posibilidad de adecuar una pequeña compostera al lateral derecho del biodigestor.

2) Reutilización de aguas residuales tratadas para el riego de zonas verdes, que, conforme a lo manifestado por el prestador del servicio, existe la intención de convertir la laguna en un atractivo turístico y realizar un embellecimiento paisajístico, donde el mantenimiento de sus zonas verdes en óptimas condiciones contribuiría en gran medida a esta iniciativa. Cabe resaltar que, para esta alternativa se deberá dar cumplimiento a la normativa ambiental que regula la materia (Resolución 1207 del 2014).

6.2. Capítulo II. Estimación del Potencial Energético de energía eléctrica a partir del biogás originado en el aprovechamiento de las aguas residuales domesticas del municipio de Aracataca

Para la determinación de la tasa de energía eléctrica del biogás que se puede producir durante el tratamiento de las aguas residuales domestica del municipio de Aracataca, se realizó la revisión de artículos, bases de datos e información internacional y nacional relacionada con la estimación de biogás y su potencial energético. Para el desarrollo de los cálculos es necesario contar con información de base, principalmente con el análisis de las características fisicoquímicas del afluente de la Planta de Tratamiento, por lo cual la empresa AGUAS DE ARACATACA S.A. E.S.P. aportó a la realización del proyecto la caracterización correspondiente al periodo 2020. Estos análisis fueron realizados con el laboratorio NANCY FLOREZ GARCIA S.A.S., el cual se encuentra acreditado por el Instituto

de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, bajo la Resolución No. 0398 de 02 de mayo de 2019 "*Por la cual se renueva y se extiende la acreditación al LABORATORIO AMBIENTAL Y DE ALIMENTOS NANCY FLOREZ GARCÍA de la SOCIEDAD LABORATORIOS NANCY FLOREZ GARCIA SAS., para producir información cuantitativa, física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes y de carácter oficial, relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables.*" Los resultados para la caracterización de aguas de entrada al sistema se resumen en la siguiente tabla.

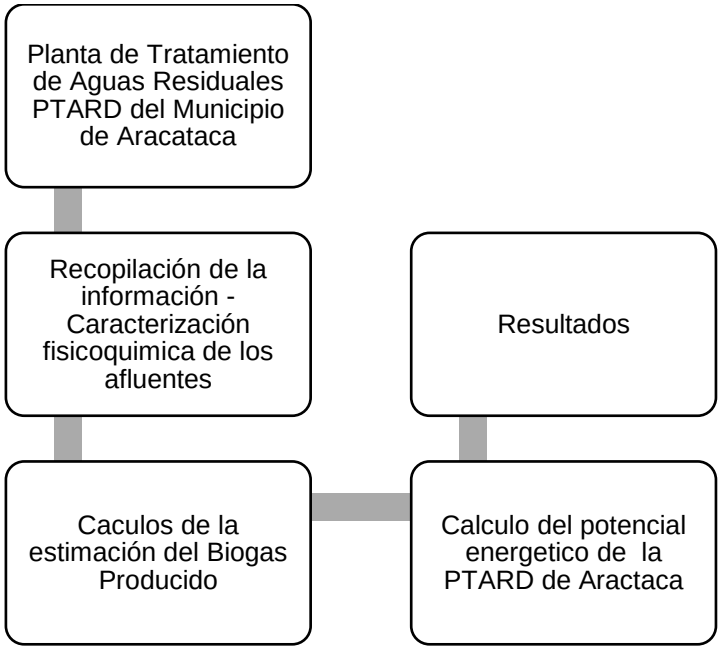
Tabla 14. Resultados de la Caracterización fisicoquímica del agua de entrada del sistema

Empresa:	AGUAS DE ARACATACA S.A. E.S.P.		
NIT	900862450		
Información de la Muestra:	Aguas residuales domesticas	Hora de Muestra:	12:15
Lugar de Muestreo:	Municipio de Aracataca	Fecha:	8/07/2020
Punto de Muestreo:	Entrada de la Laguna		
Coordenadas:	N 1663954	O 00986290	
Tipo de muestra:	Simple		
Análisis		**Método**	**Resultado**
Caudal (L/seg)		Vertedero	410
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5) mg O2/L		SM 5210 B / EPA 360.3 - Incubación 5 días	146
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg O2/L		SM 5220 C - Reflujo cerrado - Volumétrico	159
Potencial de Hidrogeno (pH)		SM 4500-H+ B - Electrométrico	7,19
Solidos suspendidos Totales mg/L		SM 2540 D - Gravimétrico	69,5
Temperatura °C		SM 2550 B - Electrométrico	31,5

Fuente: Elaboración Propia, 2021. Tomado de Caracterización de Aguas residuales PTARD Aguas de Aracataca S.A. E.S.P.

Para los caculos de la estimación de biogás, se siguieron dos métodos de cuantificación: cantidad de Demanda Química de Oxigeno (DQO) y cantidad de demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5). (Ramírez, Medrano, & Escobedo-Cazán, 2020).

Figura 17. Flujograma de metodología para la determinación del potencial energético del biogás generado en la PTARD de Aracataca.



Fuente: Elaboración Propia, 2021. modificado de (Ramírez, Medrano, & Escobedo-Cazán, 2020)

6.2.1. Método por cantidad de Demanda Química de Oxigeno (DQO)

Este cálculo se realiza con el factor teorice de la conversión de la materia orgánica a metano (m3 CH4/Kg DQO) y está basada en el equivalente de oxígeno necesitado para degradar el DQO que se convierte en metano y estar representada con la ecuación

Ecuación 1.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

De acuerdo a la ecuación, la DQO por mol de metano es: 2(32gO2/mol) = 64 gO2/mol CH4. El volumen de metano a condiciones estándar (0°C y 1 atm) es a 22,414 L. Por lo tanto, el metano que se produce a partir de la DQO, bajo condiciones anaerobias a 35°C es de:

$$\frac{22.4\ L/mol\ CH_4}{64\ g\ DQO/mol\ CH_4} = 0{,}35\ L\ CH_4/g\ DQO$$

Este valor ideal del rendimiento también se puede expresar en 0,35 m3 CH4/kg DQO. (IMTA, 2016)

Con los datos obtenidos de la caracterización del efluente donde la DQO registro un valor de 159 mg/L y un porcentaje de sedimentación de lodos del 51% (Berktay & Nas, 2007), se usan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.

$$DQO\ afluentes\ díario = DQO\ del\ afluente\ {}^{mg}/_{L} \times Caudal\ del\ operación\ en\ {}^{m^3}/_{día}$$

El resultado de la aplicación de la ecuación 2., se debe transformar a las unidades Kg/día

Reemplazando los valores se tiene que:

$$DQO\ afluentes\ diario = 0{,}159\ kg/m^3 \times 35424\ m^3/día = 5632{,}42\ Kg/día$$

Ecuación 3.

$$DQO\ Sedimentados = DQO\ afluentes\ diarios\ \times \%\ de\ sedimentación\ (0{,}51)$$

0,51 corresponde al factor de sedimentación asumido en la PTARD del 51%
Reemplazando los valores

$$DQO\ Sedimentados = 5632{,}42\ Kg/día\ \times 0{,}51 = 2872{,}53\ Kg/día$$

Ecuación 4.

$$Volumen\ de\ Biogas\ Producido\ = DQO\ sedimentado\ \times factor\ de\ producción\ Biogas\ (0{,}35\ {}^{m^3}/_{Kg\ DQO})$$

Al reemplazar los valores:

$$Volumen\ de\ Biogas\ Producido\ m^3CH_4/día\ = 2872{,}53\ Kg/día\ \times 0{,}35\ m^3CH_4/Kg\ DQO = 1005{,}4\ m^3CH_4/día$$

6.2.2. Método por cantidad de Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO_5)

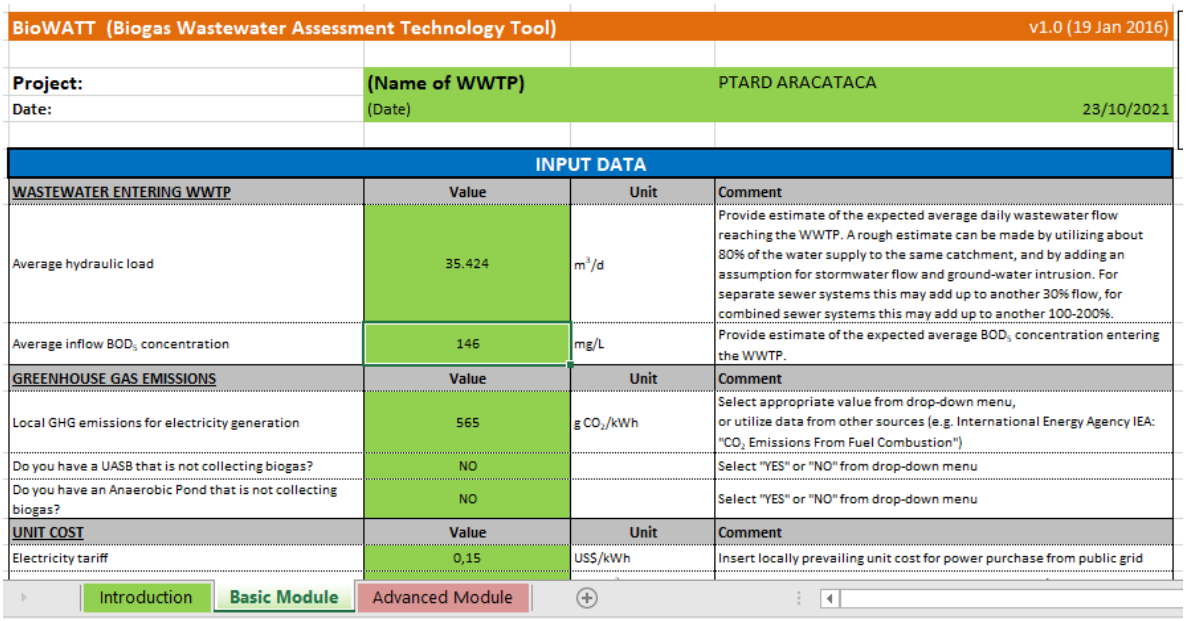
Para realizar esta estimación se utilizó la herramienta de tecnología de evaluación de aguas residuales de biogás, *Biogas Wastewater Assessment Technology Tool v1.0* (BioWATT) la cual proporciona una evaluación rápida y preliminar de proyectos de conversión de aguas residuales en energía. Esta herramienta Incluye entre otros:

1. La estimación de la producción de biogás para diversas tecnologías de conversión de aguas residuales en energía
2. El potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido
3. Ahorros de gases de efecto invernadero asociados con la electricidad generada con biogás.

Esta herramienta fue desarrollada por *Global Methane Initiative y Worl Bank Group en 2016* cuyo propósito es proporcionar una evaluación rápida y preliminar de proyectos de producción de energía a partir de aguas residuales basándose en solo dos datos provistos por el usuario (caudal y la concentración de DBO_5) (Ramírez, Medrano, & Escobedo-Cazán, 2020).

Los datos usados para esta estimación fueron tomados de los resultados de la caracterización del afluente en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas de Aracataca registrados en la Tabla 14.

Figura 18. Herramienta BioWATT con datos de la PTARD del Municipio de Aracataca



BioWATT (Biogas Wastewater Assessment Technology Tool) — v1.0 (19 Jan 2016)

Project:	(Name of WWTP)	PTARD ARACATACA
Date:	(Date)	23/10/2021

INPUT DATA

WASTEWATER ENTERING WWTP	Value	Unit	Comment
Average hydraulic load	35.424	m^3/d	Provide estimate of the expected average daily wastewater flow reaching the WWTP. A rough estimate can be made by utilizing about 80% of the water supply to the same catchment, and by adding an assumption for stormwater flow and ground-water intrusion. For separate sewer systems this may add up to another 30% flow, for combined sewer systems this may add up to another 100-200%.
Average inflow BOD_5 concentration	146	mg/L	Provide estimate of the expected average BOD_5 concentration entering the WWTP.
GREENHOUSE GAS EMISSIONS	**Value**	**Unit**	**Comment**
Local GHG emissions for electricity generation	565	g CO_2/kWh	Select appropriate value from drop-down menu, or utilize data from other sources (e.g. International Energy Agency IEA: "CO_2 Emissions From Fuel Combustion")
Do you have a UASB that is not collecting biogas?	NO		Select "YES" or "NO" from drop-down menu
Do you have an Anaerobic Pond that is not collecting biogas?	NO		Select "YES" or "NO" from drop-down menu
UNIT COST	**Value**	**Unit**	**Comment**
Electricity tariff	0,15	US$/kWh	Insert locally prevailing unit cost for power purchase from public grid

Introduction | Basic Module | Advanced Module

Fuente: Elaboración propia, 2021. Obtenido de Herramienta BioWATT (Anexo 9.2).

Con los datos correspondientes a la DBO5 y al caudal, se obtuvo como resultado un valor de 1657 m^3 CH_4/día.

6.2.3. Potencial energético del Biogás Producido en la PTARD de Aracataca

Al obtener a través de los dos métodos anteriores la cuantificación del biogás, se procede a determinar el potencial energético, el valor usado para el cálculo se obtendrá del promedio de los resultados obtenidos en la cuantificación del biogás (Ramírez, Medrano, & Escobedo-Cazán, 2020).

Tabla 15. Resultados de estimación de Biogás PTARD Aracataca.

Método	Volumen de Biogás Producido (m^3/día)
Cantidad de Demanda Química de Oxigeno (DQO)	1005,4
Cantidad de Demanda bioquímica de Oxigeno (DBO_5)	1657
Promedio	**1331,2**

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Considerando una concentración de 65% del metano en el biogás y un poder calórico de 9,97 kWh/m^3, el potencial energético se calculó de la siguiente forma (Ramírez, Medrano, & Escobedo-Cazán, 2020):

Ecuación 5.

$$Potencial\ energetico\ del\ Biogas\ Producido = Promedio\ biogas\ \times 0{,}65 \times 9{,}97\ kWh/m^3$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$Potencial\ energetico\ del\ Biogas\ Producido = 1331{,}2\ m^3CH_4/día\ \times 0{,}65 \times 9{,}97\ kWh/m^3CH_4 = \mathbf{8626{,}84\ kWh/día}$$

Como resultado final se obtuvo que la Planta de Tratamiento con los datos suministrado por la administración de Aguas del Magdalena posee una potencialidad de generar 8626,84 kWh/día.

6.3. Capítulo III Identificación y valoración de los impactos ambientales y socioeconómicos de la Implementación del sistema de biodigestor anaerobio, para la generación de biogás y energía eléctrica como modelo de economía Circular.

Con el fin de llevar a cabo la identificación y evaluación de los impactos ambientales y sociales potencialmente generados por la implementación de un biodigestor como una estrategia de economía circular, de manera preliminar se identificaron las actividades a desarrollar para la ejecución del proyecto, las cuales se describen a continuación:

Tabla 16. Actividades seleccionadas para la identificación y evaluación de impactos ambientales.

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
FASE DE CONSTRUCCIÓN: ADECUACIÓN DE LAGUNA A BIODIGESTOR Y OBRAS VARIAS	1. Instalación campamento flotante	Consiste en el establecimiento de campamentos temporales para el inicio de la fase de construcción y/o adaptación de la infraestructura existente.
	2. Señalización y demarcación	Instalación de las señalizaciones de seguridad, barreras y demás, elementos necesarios para en materia de seguridad en el desarrollo de obras civiles.
	3. Excavaciones para la adecuación de la laguna	Actividad para la adecuación de la laguna en su transición a biodigestor anaerobio, esta actividad incluye actividades de preparación de la laguna, tales como retiro de lodos, aguas residuales y todo lo que sea necesario según, lo indique la ingeniería de detalle para el establecimiento del biodigestor.

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
	4. Instalación de la geomembrana y encarpado	Esta actividad consiste en acción de instalación del geotextil que opera para la captura y almacenamiento del biogás
	5. Construcción de canales perimetrales para escorrentías	Es la actividad en la que se construyen los canales perimetrales para la captación de aguas de escorrentía, cuyas dimensiones de establecen en la ingeniería de detalle del proyecto.
	6. Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás	En esta actividad se consolida las obras de establecimiento del sistema de conducción del gas hacia bien sea la chimenea para su quema de una fase inicial, la instalación de medidores de presión, válvulas de control, entre otros instrumentos y todo el sistema de tratamiento del biogás, principalmente el secado o retiro de humedad y la eliminación de los compuestos de azufre.
	7. Adaptación del agua para el funcionamiento del biogás	Consiste en el llenado del biodigestor, con la inoculación de las bacterias necesarias para el proceso de digestión anaerobia
FASE DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR	8. Biodigestión - Generación de Biogás	Entrada en operación del biodigestor, así como los controles y mantenimientos del mismo.
	9. Extracción de lodos y aprovechamiento	Es la actividad que se desarrolla con el fin de retirar del biodigestor los lodos estabilizados que ya no poseen actividad bacteriana, que contribuye a la producción del biogás, así mismo se contemplan en esta actividad la estrategia de aprovechamiento que selecciones, priorizando la de bioabono o compostaje.
	10. Quema de excesos de biogás	Esta actividad se desarrolla en la fase inicial, antes de la instalación de sistema de tratamiento del Biogás y cogeneración de energía, así mismo en caso de ser necesario por excesos y o fallas en el proceso de generación de energía.
	11. Cogeneración de energía	Esta actividad consiste en la generación de energía a partir de la cogeneración con el uso de motores de combustión interna, así mismo, incluye la instalación y conexiones al sistema eléctrico de la Red Nacional en asocio con compañías privadas, pioneras en

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
		la generación y comercialización de energía eléctrica

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.3.1. Identificación de los impactos ambientales

Con el fin de hacer una identificación de los impactos de realiza una selección de componentes o factores ambientales, a partir de los medios Biótico, Abiótico y socioeconómico, así como una identificación de los potenciales impacto a generarse en las interacciones que se presenten entre las actividades del proyecto y los componentes ambientales. El método usado fue una matriz causa- efecto, como se estableció en la metodología. Los componentes e impactos ambientales considerados para la matriz fueron:

Tabla 17. Componentes e impactos ambientales usados para la identificación y valoración de impactos socioambientales del Proyecto.

MEDIO	COMPONENTE	IMPACTOS AMBIENTALES
ABIOTICO	Geomorfología	Alteración de la geoforma
	Suelo	Alteración de las características físicas y químicas del horizonte A del suelo
		Cambio del uso actual del suelo
	Paisaje	Alteración de la calidad visual
	Agua	Alteración de la calidad de agua superficial
		Alteración de la calidad de agua subterránea
		Cambio en la dinámica de aguas superficiales
	Aire	Cambio en la calidad del aire
		Cambio en los niveles de presión sonora y vibraciones
BIOTICO	Ecosistemas - Flora	Disminución de la de cobertura vegetal
		Alteración en las coberturas vegetales (estructura y composición florística)
	Ecosistemas - Fauna	Alteración (disminución y/o aumento) de poblaciones de fauna
		Alteración o fragmentación de hábitats
	Ecosistemas Acuáticos - Fauna	Procesos de eutrofización
SOCIECONOMICO	Dimensión Demográfica	Generación de empleo
	Dimensión económica	Cambios en la Economía local
		Cambios en las Actividades económicas tradicionales (agricultura y ganadería)
	Dimensión Espacial	Cambios en la Infraestructura Servicios públicos

MEDIO	COMPONENTE	IMPACTOS AMBIENTALES
	Dimensión Político administrativa	Generación de expectativas
		Generación de conflictos
		Cambios en la dinámica de las organizaciones sociales públicas y privadas
		Cambios en las costumbres y estilos de vida de la comunidad

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Los resultados de la matriz de identificación de impactos ambientales bajo los criterios anteriormente expuesto fueron los siguientes.

Tabla 18. Matriz causa efecto para la identificación de los impactos ambientales del Proyecto.

MEDIO	COMPONENTE	IMPACTOS AMBIENTALES	FASE DE CONSTRUCCIÓN:ADECUACIÓN DE LAGUNA A BIODIGESTOR Y OBRAS VARIAS							FASE DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR			
			Instalación campamento flotante	Señalización y demarcación	Excavaciones para la adecuación de la laguna	Instalación de la geomembrana y encamado	Construcción de canales perimetrales para escorrentías	Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás	Adaptación del agua para el funcionamiento del biogás	Biodigestión - Generación de Biogás	Extracción de lodos y aprovechamiento	Quema de excesos de biogás	Cogeneración de energía
ABIOTICO	Geomorfología	Alteración de la geoforma			-		-						
	Suelo	Alteración de las características físicas y químicas del horizonte A del suelo			-	-	-				+		
		Cambio del uso actual del suelo						-					
	Paisaje	Alteración de la calidad visual	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
	Agua	Alteración de la calidad de agua superficial							-	+	+		
		Alteración de la calidad de agua subterránea			-		-						
		Cambio en la dinámica de					-		-	+			

		aguas superficiales											
	Aire	Cambio en la calidad del aire			-				-	+		+	
		Cambio en los niveles de presión sonora y vibraciones			-			-					-
BIOTICO	Ecosistemas - Flora	Disminución de la de cobertura vegetal			-			-					-
		Alteración en las coberturas vegetales (estructura y composición florística)						-					
	Ecosistemas - Fauna	Alteración (disminución y/o aumento) de poblaciones de fauna	-		-								
		Alteración o fragmentación de hábitats						-					
	Ecosistemas Acuáticos - Fauna	Procesos de eutrofización							-				
SOCIECONOMICO	Dimensión Demográfica	Generación de empleo			+	+	+	+	+	+	+		+
	Dimensión económica	Cambios en la Economía local	+							+	+		
		Cambios en las Actividades económicas tradicionales (agricultura y ganadería)								+	+		
	Dimensión Espacial	Cambios en la Infraestructura Servicios públicos											+
	Dimensión Político administrativa	Generación de expectativas								+			+
		Generación de conflictos		-					-			-	
		Cambios en la dinámica de las organizaciones								-			+

		sociales públicas y privadas											
		Cambios en las costumbres y estilos de vida de la comunidad											+

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.3.2. Evaluación del impacto Socioambiental

Se utiliza la metodología propuesta por el autor Vicente Conesa Fernández Vitora, la cual es empleada para evaluar e identificar los impactos generados en cada una de las actividades del proyecto y nos permite cuantificar su perjuicio o beneficio. El procedimiento utilizado para la evaluación de impactos socioambientales que generará el proyecto, está compuesto por los siguientes pasos (Conesa, 2010):

- Calificación de los impactos socioambientales a través de la metodología de Conesa Fernández.
- Análisis y resultados.

A continuación, se exponen los diversos parámetros, con los que se evaluaron los impactos socioambientales:

- **Por La Variación de la calidad Ambiental (N)**

Impacto Positivo: Admitido como tal, tanto por el personal participante como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costos, beneficios genéricos y de los aspectos externos de la actuación contemplada y por la conservación o poca afectación de los valores naturales, estéticos, sociales y económicos.

Impacto Negativo: El impacto se traduce en pérdida de valor natural, estético, cultural, paisajístico, de productividad ecológica o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, erosión o colmatación y demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológica y geográfica, el carácter y la personalidad de una zona determinada.

- **Por la intensidad – grado de destrucción**

Califica la dimensión o tamaño del cambio ambiental producido por una actividad o proceso constructivo u operativo, que se expresa de la siguiente manera:

Impacto Bajo: Aquel cuyo efecto expresa una alteración mínima del elemento socioambiental considerado.

Impacto Medio: Aquel cuyo efecto se manifiesta como una alteración parcial al medio ambiente o de algunos de sus elementos.

Impacto Alto: Aquel cuyo efecto se manifiesta como una modificación del Medio Ambiente, de los recursos naturales, o de sus procesos fundamentales de funcionamiento, que produzca o pueda producir en el futuro repercusiones apreciables en los mismos. Expresa una destrucción casi total del factor ambiental o socioeconómico, considerado en el caso en que se produzca el impacto.

Impacto total: Aquel cuyo grado de intervención en el factor afectado imposibilita retornar las condiciones iniciales previas a la acción, por medios naturales.

- **Por la Extensión (EX).**

La extensión es el atributo que refleja la fracción del medio afectada por la acción del proyecto. Se refiere al área sobre la cual se manifiesta el impacto en relación con el entorno de la actividad (área de influencia) (% del área afectada respecto del área de influencia del proyecto. También se puede relativizar respecto de volumen o cualquier otra unidad que refleje la parte del medio afectada), y se evalúa de acuerdo a la siguiente escala:

Impacto Puntual: Cuando la acción impactante produce un impacto muy localizado, dentro del área de intervención del proyecto (donde se desarrollan las obras).

Impacto Parcial: Aquel cuyo impacto supone una incidencia apreciable dentro del área de intervención del proyecto.

Impacto Extenso: Aquel cuyo impacto supone una incidencia apreciable por fuera del área de intervención, y se extiende sobre el área de influencia del proyecto.

Impacto Total: Su cambio se manifiesta de manera generalizada en toda el área de influencia, sin una ubicación precisa.

Impacto de Ubicación Crítica: Aquel en que la situación en que se produce el impacto sea crítica. Normalmente se da en impactos puntuales. Cuando el efecto se produce en un lugar crítico, se le atribuirá un valor de cuatro unidades por encima del que le correspondía en función de la extensión en que se manifiesta.

- **Por el momento en que se manifiesta (MO)**

Corresponde al plazo de manifestación del impacto, el tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto, sobre el medio considerado. Y se calificará de la siguiente manera:

Impacto Latente (corto, medio y largo plazo): La alteración se manifiesta al cabo de cierto tiempo desde el inicio de la actividad que lo provoca (tanto de manera inmediata, como a largo plazo). Se tendrá como referencia el tiempo estimado de los trabajos de construcción y puesta en marcha del proyecto.

Impacto Crítico: Si el impacto es crítico, se le atribuirá un valor de cuatro unidades por encima del que le correspondía en función del momento en que se manifiesta.

- **Por su persistencia (PE)**

Tiempo que supuestamente permanecerá el efecto del impacto desde su aparición, y a partir del cual el elemento afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por los medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras.

Impacto fugaz: Aquel cuya recuperación es inmediata tras el cese de la actividad y no precisa de medidas preventivas, correctoras o protectoras. Es decir, cuando cesa la actividad, cesa el impacto.

Impacto temporal: Aquel cuyo impacto supone alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de permanencia menor a la duración de los trabajos de construcción y puesta en marcha del proyecto, un (1) año desde el momento de su aparición.

Impacto Permanente: El impacto supone una alteración, indefinida en el tiempo, de los factores medioambientales predominantes en la estructura o en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en un lugar. Es decir, aquel impacto que permanece en el tiempo por un lapso mayor a un (1) año.

- **Reversibilidad**

Se refiere a la posibilidad de reconstrucción del factor afectado, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, por medios naturales, una vez aquel deje de actuar sobre el medio, lo cual se evalúa mediante los siguientes criterios y valores:
Impacto Reversible: Aquel en el que la alteración puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a corto o mediano plazo, debido al funcionamiento de los procesos naturales de la sucesión ecológica y de los mecanismos de auto depuración del medio.

Corto Plazo: Si el elemento retorna a sus condiciones iniciales en menos de un año.

Mediano Plazo: Si se demora entre 1 a 5 años en recuperar sus condiciones.

Irreversible: Impacto cuya alteración supone la imposibilidad o dificultad extrema de retornar por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce. Si tiene una duración superior a 5 años.

- **Recuperabilidad**

Se refiriere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctivas).

El impacto Recuperable es aquel en el que la alteración puede eliminarse por la acción humana, estableciendo las oportunas medidas correctoras, y así mismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable. Las escalas de recuperabilidad son:

Recuperable de manera inmediata: Una vez que se desarrolle la medida, el elemento retorna a sus condiciones iniciales.

Recuperable a mediano plazo: Si el elemento recupera su estado inicial en menos de (2) años.

Mitigable: Es aquel en el que la alteración puede mitigarse de una manera evidente, mediante el establecimiento de medidas correctoras. Las condiciones iniciales son recuperadas parcialmente.

Irrecuperable: Aquel en el que la alteración del medio o pérdida es imposible de reparar, por la acción antrópica.

- **Acumulación (Ac)**

Este atributo da idea del *incremento progresivo* de la manifestación del efecto cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
Impacto simple: La alteración se manifiesta sobre un solo componente ambiental, o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos impactos, ni en la de su acumulación, ni en la de su sinergia.

Impacto Acumulativo: Aquel cambio que al prolongarse en el tiempo la acción del agente inductor, incrementa progresivamente su gravedad al carecer el medio de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar a la del incremento de la acción causante del tiempo.

- **Sinergia (SI)**

Este atributo contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples. La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría de esperar cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente, no simultánea.

- **Por la relación Causa – efecto (EF)**

Este atributo se refiere a la *relación causa-efecto*, o sea, a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.
Impacto Directo: Aquel cuya alteración tiene una incidencia inmediata en algún factor ambiental.

Impacto Indirecto o secundario: cuando la manifestación no es consecuencia directa de la acción, sino que tiene lugar a partir de un efecto primario, actuando este como una acción de segundo orden.

- **Por su periodicidad (PR)**

Se refiere a la regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular) o constante en el tiempo (efecto continuo)

Impacto Discontinuo, Irregular: Aquel cuyas acciones que lo producen actúan de manera intermitente, irregular o esporádica en el tiempo. Se manifiesta a través de alteraciones no constantes en su permanencia.

Impacto Continuo: Aquel cuyas acciones que lo producen permanecen constantes en el tiempo. Impacto que se manifiesta a través de alteraciones regulares en su permanencia, es decir que se manifiesta con una alteración constante en el tiempo.

Impacto Periódico: Su cambio se manifiesta con un modo de acción intermitente y continua en el tiempo.

- **Por la Necesidad de aplicar medidas correctoras – Importancia (I)**

Impacto Ambiental crítico: Alteración cuya magnitud es superior al umbral aceptable. Con este se produce una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas correctoras o protectoras. Se trata de un impacto irrecuperable.

Impacto Ambiental Severo: Cambio en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la adecuación de medidas correctoras o protectoras y en el que, aún con esas medidas, la recuperación precisa de un período dilatado. Sólo los impactos Recuperables, posibilitan la introducción de medidas correctoras.

Impacto Ambiental Moderado: Alteración cuya recuperación no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas y en el que el retorno al estado inicial del medio ambiente no requiere un largo espacio de tiempo.

Los atributos mencionados anteriormente permiten evaluar los indicadores detalladamente, haciendo que éstos sean representativos, relevantes, excluyentes, cuantificables y de fácil identificación.

- **Importancia del Impacto**

A través de la Tabla 7. Se representa el valor asignado a la calificación del impacto socioambiental.

- **Calificación de los impactos**

De acuerdo con los valores asignados a cada criterio, la importancia del impacto puede variar entre 13 y 100 unidades, sobre los cuales se determina la importancia

(I) de los impactos con base en el valor obtenido en la escala de importancia, que se presenta a continuación:

Si I genera valores mayores a 76, el impacto se califica como CRÍTICO, son aquellos impactos que va a generar el proyecto, la probabilidad de ocurrencia es alta, son irreversibles y permanentes, pueden ser directos o indirectos y el área de afectación es mayor al sitio donde se realiza, por lo tanto, requieren de medidas de compensación y en algunas ocasiones lo mejor sería evitarlos, se representa en la matriz de resultados con el color rojo.

Si I genera valores entre 51 y 75, el impacto se califica como SEVERO, son impactos irreversibles y permanentes, pueden ser directos o indirectos, pero la afectación es puntual, es decir, en el sitio donde se dará la intervención. Requieren ser compensados en la mayoría de los casos, se representa en la matriz de resultados con el color naranja.

Si I tiene valores entre 26 y 50, el impacto se califica como MODERADO y se espera que con medidas preventivas pueda evitarse o mitigarse, se representa en la matriz de resultados con el color amarillo.

Si I toma valores entre menores a 25, el impacto se califica como IRRELEVANTE, solo se dará en casos accidentales y de forma temporal, se representa en la matriz de resultados con el color verde.

Tabla 19. Matriz de evaluación de impacto socioambiental

MEDIO	COMPONENTE	IMPACTOS AMBIENTALES	FASE DE CONSTRUCCIÓN: ADECUACIÓN DE LAGUNA A BIODIGESTOR Y OBRAS VARIAS							FASE DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR				TOTAL
			Instalación campamento flotante	Señalización y demarcación	Excavaciones para la adecuación de la laguna	Instalación de la geomembrana y encarpado	Construcción de canales perimetrales para escorrentías	Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás	Adaptación del agua para el funcionamiento del biogás	Biodigestión - Generación de Biogás	Extracción de lodos y aprovechamiento	Quema de excesos de biogás	Cogeneración de energía	
ABIOTICO	Geomorfología	Alteración de la geoforma			M		I							-45
	Suelo	Alteración de las características físicas y químicas del horizonte A del suelo			M	M	I				M			-36
		Cambio del uso actual del suelo						I						-23
	Paisaje	Alteración de la calidad visual	I	I	M	I	I	M		M	I	M	M	-244
	Agua	Alteración de la calidad de agua superficial							I	M	I			31
		Alteración de la calidad de agua subterránea			I		I							-32
		Cambio en la dinámica de aguas superficiales					I		I	I				-11
	Aire	Cambio en la calidad del aire			I				I	M		M		26
		Cambio en los niveles de presión sonora y vibraciones			I			I					M	-69
BIOTICO	Ecosistemas - Flora	Disminución de la de cobertura vegetal			I			I					I	-52
		Alteración en las coberturas vegetales (estructura y composición florística)						I						-15
	Ecosistemas - Fauna	Alteración (disminución y/o aumento) de poblaciones de fauna	I		I									-30
		Alteración o fragmentación de hábitats						I						-18

MEDIO	COMPONENTE	IMPACTOS AMBIENTALES	FASE DE CONSTRUCCIÓN: ADECUACIÓN DE LAGUNA A BIODIGESTOR Y OBRAS VARIAS							FASE DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR				TOTAL
			Instalación campamento flotante	Señalización y demarcación	Excavaciones para la adecuación de la laguna	Instalación de la geomembrana y encarpado	Construcción de canales perimetrales para escorrentías	Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás	Adaptación del agua para el funcionamiento del biogás	Biodigestión - Generación de Biogás	Extracción de lodos y aprovechamiento	Quema de excesos de biogás	Cogeneración de energía	
	Ecosistemas Acuáticos - Fauna	Procesos de eutrofización							I					-16
SOCIECONOMICO	Dimensión Demográfica	Generación de empleo			M	M	I	M	I	M	M		M	197
	Dimensión económica	Cambios en la Economía local	I							I	I			56
		Cambios en las Actividades económicas tradicionales (agricultura y ganadería)								I	I			32
	Dimensión Espacial	Cambios en la Infraestructura Servicios públicos											M	32
	Dimensión Político administrativa	Generación de expectativas								M			I	45
		Generación de conflictos		I					I			I		-47
		Cambios en la dinámica de las organizaciones sociales públicas y privadas								I			M	14
		Cambios en las costumbres y estilos de vida de la comunidad											I	18

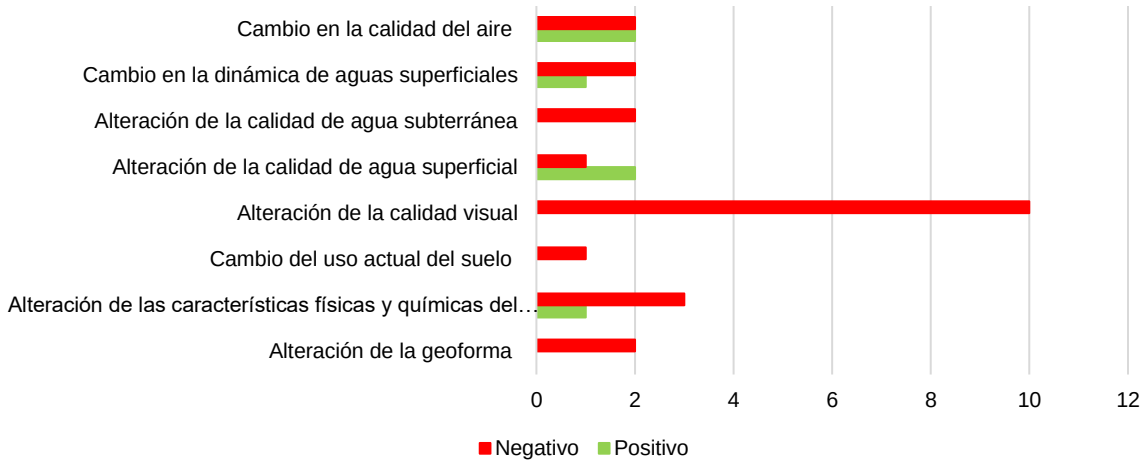
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.3.3. Análisis de resultados

De acuerdo con la ponderación de la matriz de la identificación de impactos, se identificaron 22 impactos socioambientales y 12 actividades, para los cuales se presentaron 62 interacciones de las cuales 24 son de Naturaleza positiva y 38 son de naturaleza negativa.

Se evidencia que para el medio abiótico, se identificaron 8 impactos, de los cuales con las 12 actividades implican 32 interacciones, de la siguiente manera: Alteración de la geoforma (2 interacciones); alteración de las características físicas y químicas del horizonte A del suelo (4 interacción); cambio del uso actual del suelo (1 interacción); modificación de la calidad visual (10 interacción); Alteración de la calidad de agua superficial (3 interacción Alteración de la calidad de agua subterránea (2 interacciones); Cambio en la dinámica de aguas superficiales (3 interacciones); Cambio en la calidad del aire (4 interacciones) y Cambio en los niveles de presión sonora y vibraciones (3 interacciones)

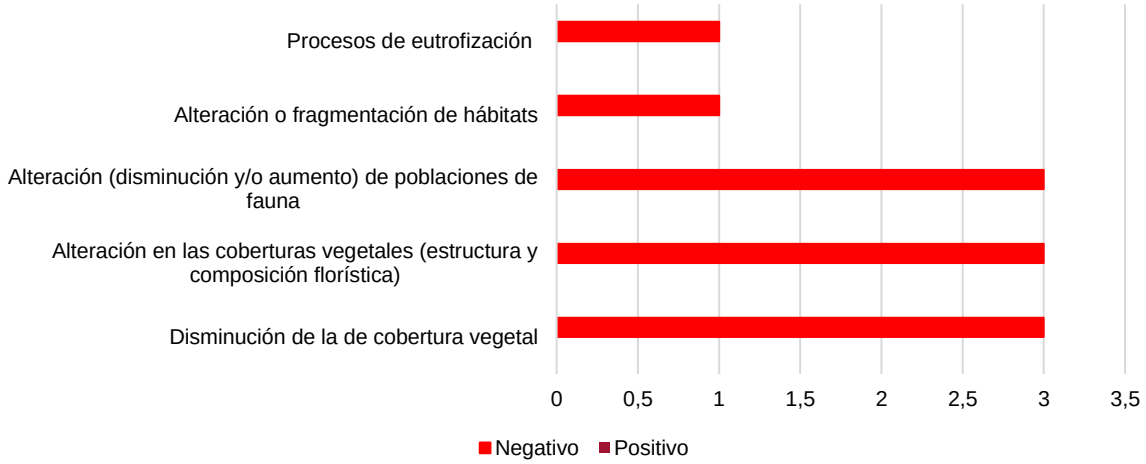
Gráfico 1. Impactos positivos y negativos identificados en el componente abiótico



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Para el medio biótico, las 8 interacciones identificadas, corresponden a 5 impactos, como lo son: Disminución de la cobertura vegetal (2 interacción); Alteración de las coberturas vegetales (1 interacciones); Alteración (disminución y/o aumento) de poblaciones de fauna terrestre (2 interacciones); Alteración o fragmentación de hábitats (1 interacciones) y Procesos de eutrofización (1 interacción).

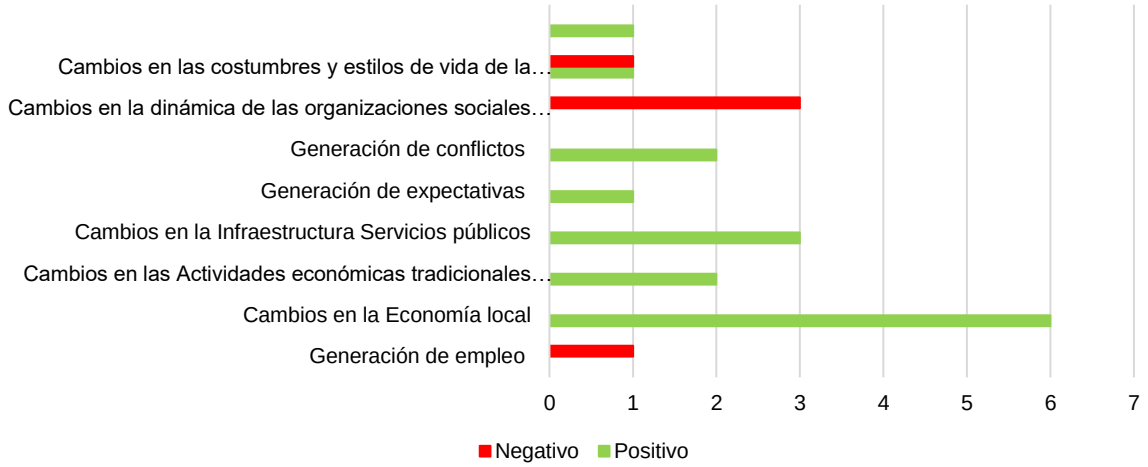
Gráfico 2. Impactos positivos y negativos identificados en el componente biótico.



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

El medio socioeconómico presenta un total de 22 interacciones, los cuales se distribuyen en 8 impactos: Generación de empleo (8 interacciones); Cambios en la Economía local (3 interacciones); Cambios en las Actividades económicas tradicionales (agricultura y ganadería) (2 interacción); Cambios en la Infraestructura Servicios públicos (1. interacciones); Generación de expectativas (2 interacción); Cambios en la dinámica de las organizaciones sociales públicas y privadas (2 interacción) y Cambios en las costumbres y estilos de vida de la comunidad (1 interacción).

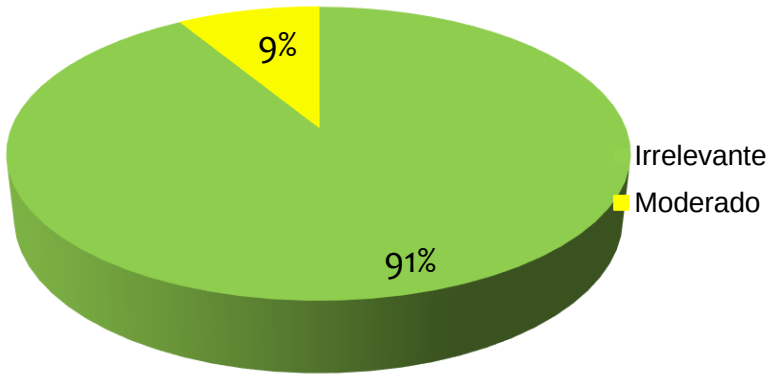
Gráfico 3. Impactos positivos y negativos identificados en el componente socioeconómico



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

En relación a la importancia de lis impactos de obtuvo que del total de las de las 62 interacciones, el 91% corresponden a impacto irrelevantes y el 9% a moderados como se muestra en el siguiente gráfico, no generándose impactos catalogados como severos o críticos en la ejecución del proyecto.

Importancia de los Impactos con Proyecto

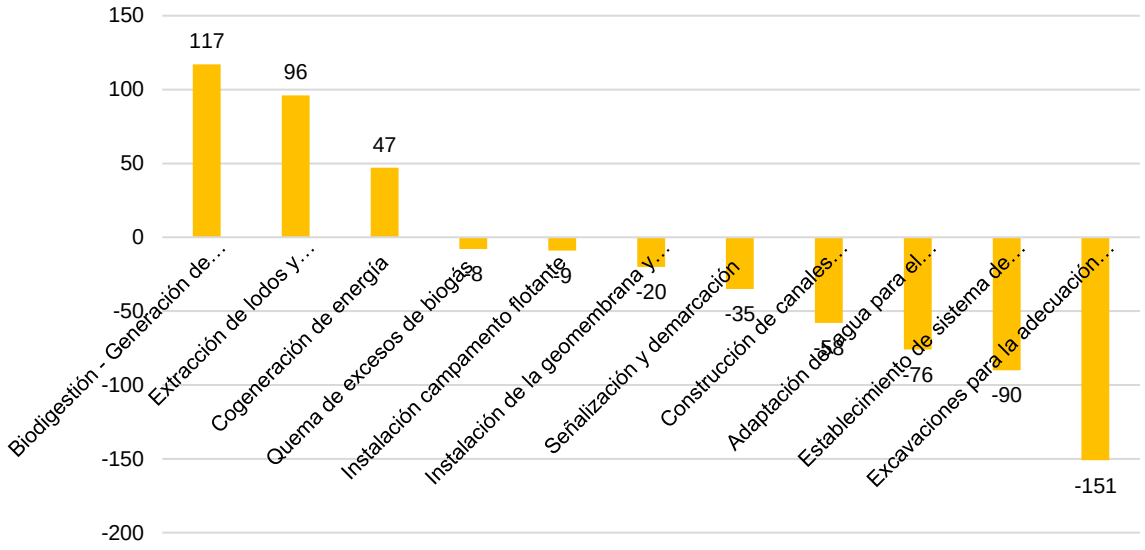


Fuente: Elaboración Propia, 2021.

- Análisis de importancia por actividad

El análisis de importancia por actividad, busca establecer cuál de las actividades del proyecto presenta mayor peso respecto a su interrelación con los impactos, la cual se obtiene de la sumatoria de las diferentes interacciones entre impacto-actividad.

Gráfico 4. Actividades más impactantes del Proyecto



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla 20. Jerarquización de los impactos

ACTIVIDADES	CALIFICACIÓN TOTAL	TOTAL IMPACTO POSITIVO	TOTAL IMPACTO NEGATIVO	PROMEDIO POSITIVO	PROMEDIO NEGATIVO
Biodigestión - Generación de Biogás	117	135	-43	19	-22
Extracción de lodos y aprovechamiento	96	118	-22	24	-22
Cogeneración de energía	47	126	-79	32	-26
Quema de excesos de biogás	-8	33	-41	33	-21
Instalación campamento flotante	-9	23	-32	23	-16
Instalación de la geomembrana y encarpado	-20	25	-45	25	-23
Señalización y demarcación	-35	0	-35	0	-18
Construcción de canales perimetrales para escorrentías	-58	21	-79	21	-16
Adaptación del agua para el funcionamiento del biogás	-76	14	-90	14	-18

ACTIVIDADES	CALIFICACIÓN TOTAL	TOTAL IMPACTO POSITIVO	TOTAL IMPACTO NEGATIVO	PROMEDIO POSITIVO	PROMEDIO NEGATIVO
Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás	-90	25	-115	25	-19
Excavaciones para la adecuación de la laguna	-151	26	-177	26	-22

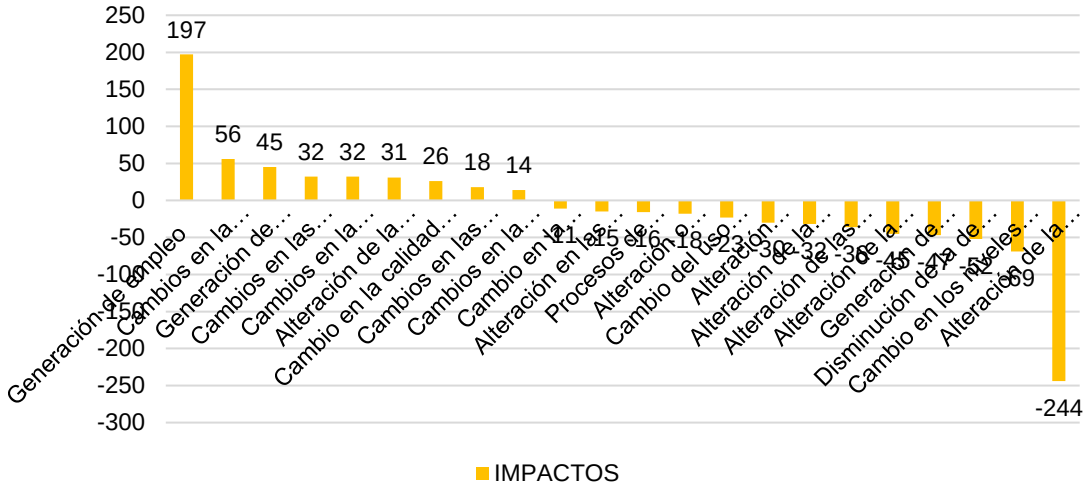
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Con relación a los resultados obtenidos en el análisis por actividades, se debe prestar especial atención a la actividad de excavaciones para la adecuación de la laguna, ya que presenta una calificación negativa más alta en las actividades, seguida de la actividad de Establecimiento de sistema de conducción, quema y tratamiento del biogás. Por otro lado, también es importante potenciar los impactos positivos que para este análisis son las correspondientes a Biodigestión - Generación de Biogás, Extracción de lodos y aprovechamiento y Cogeneración de energía.

- **Análisis por importancia de impactos**

Análisis por impactos con mayor valoración, permite identificar los impactos más relevantes que requerirán medidas de manejo para su control, minimización y compensación, que permitan atenuar las consecuencias de su manifestación en el caso de los negativos y en el caso de los positivos su potenciación.

Gráfico 5. Impactos con mayor valoración del Proyecto.



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla 21. Resultado de valoración por impactos.

IMPACTOS	TOTAL	TOTAL IMPACTOS POSITIVO	TOTAL IMPACTOS NEGATIVOS	PROMEDIO NEGATIVO	PROMEDIO POSITIVO
Generación de empleo	197	2	-16	-16	**0**
Cambios en la Economía local	56	0	-32	-16	**0**
Generación de expectativas	45	45	0	**0**	**0**
Cambios en las Actividades económicas tradicionales (agricultura y ganadería)	32	30	-66	-22	30
Cambios en la Infraestructura Servicios públicos	32	0	-45	-23	**0**
Alteración de la calidad de agua superficial	31	0	-47	-16	**0**
Cambio en la calidad del aire	26	18	0	**0**	18
Cambios en las costumbres y estilos de vida de la comunidad	18	0	-244	-24	**0**
Cambios en la dinámica de las organizaciones sociales públicas y privadas	14	0	-69	-23	**0**
Cambio en la dinámica de aguas superficiales	-11	59	-33	-17	30
Alteración en las coberturas vegetales (estructura y composición florística)	-15	0	-15	-5	**0**
Procesos de eutrofización	-16	0	-23	-23	**0**
Alteración o fragmentación de hábitats	-18	0	-18	-18	**0**
Cambio del uso actual del suelo	-23	32	0	**0**	**0**
Alteración (disminución y/o aumento) de poblaciones de fauna	-30	0	-16	-16	**0**
Alteración de la calidad de agua subterránea	-32	55	-24	-24	**0**
Alteración de las características físicas y químicas del horizonte A del suelo	-36	33	0	**0**	**0**
Alteración de la geoforma	-45	147	0	**0**	25
Generación de conflictos	-47	0	-52	-17	**0**
Disminución de la de cobertura vegetal	-52	20	-31	-16	20
Cambio en los niveles de presión sonora y vibraciones	-69	27	-13	-13	27
Alteración de la calidad visual	-244	32	0	**0**	11

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Los resultados permiten establecer que los impactos de naturaleza negativa que requerirán medidas de manejo son: La alteración de la calidad visual, los cambios de niveles de presión sonora y vibraciones, la disminución de la cobertura vegetal, la generación de conflictos entre otros. Los impactos con mayor ponderación de naturaleza positiva que deben ser potenciados y/o manejados son

la generación de empleo, los cambios de la economía local, la generación de expectativas, entre otros.

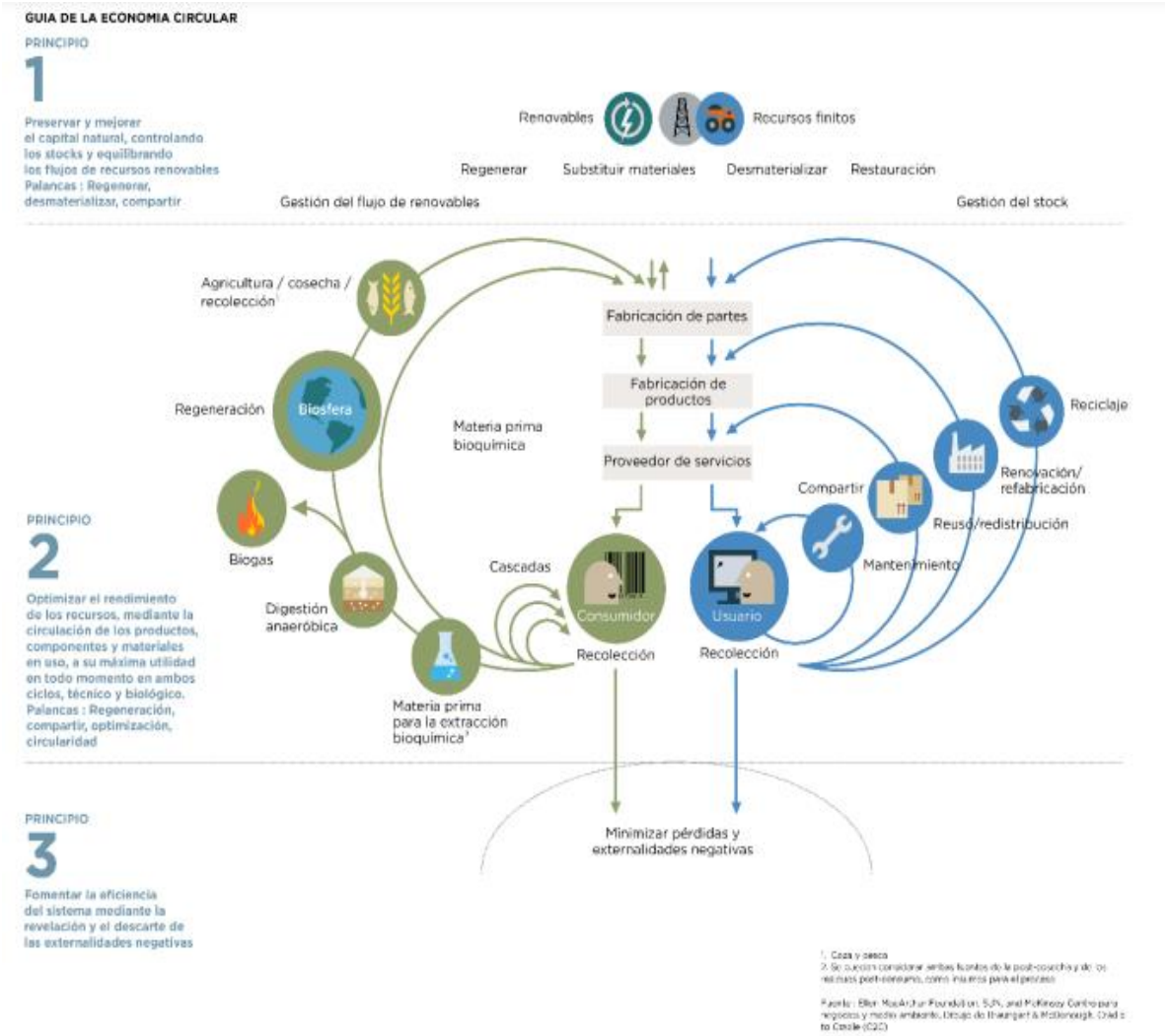
6.4. Capítulo IV - Análisis de viabilidad para la implementación del modelo de economía circular

6.4.1. Compatibilidad con el concepto de Economía Circular

Como se manifestó en los capítulos anteriores, el almacenamiento de las aguas residuales domesticas que se presenta en la planta de tratamiento del municipio de Aracataca operada por la empresa Aguas de Aracataca, posee un gran potencial de generación de energía eléctrica para el territorio, aunado con la evaluación de impactos ambientales que permite conceptuar que es viable implementar este tipo de proyectos en el municipio. Ahora bien, resulta interesante analizar si el mismo se puede configurar en un modelo de economía circular, donde interactúen todos los actores del territorio, y la relación estado-sociedad cobre importancia para el desarrollo territorial del municipio de Aracataca.

Por definición, la economía circular es reparadora y regenerativa, pretende conseguir que los productos, los componentes y los recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento. Este concepto distingue entre ciclos técnicos (parte color azul derecha Figura 17) y ciclos biológicos (parte color verde izquierda Figura 18), basándose en tres principios clave que fueron mencionados con anterioridad. Como se aprecia en la Figura 19 aparece el “Biogás” en el ciclo biológico, recurso renovable aplicable a la eficiencia energética (Cordero, 2019).

Figura 19. Diagrama sistémico flujo continuo de materiales técnicos y biológicos de la Economía Circular



Fuente: (Cordero, 2019). (p. 3)

Ahora bien, la generación de energía eléctrica a partir del biogás originado en el aprovechamiento de las aguas residuales domesticas del municipio de Aracataca, encaja en gran medida en las definiciones y aplicaciones del concepto de economía circular, bajo las siguientes tres perspectivas:

6.4.1.1. Ciclo Integral del Agua

En la naturaleza desde que una gota de agua de lluvia cae del cielo hasta que vuelve a los ríos o al mar, pasa por un ciclo biológico que comúnmente se denomina ciclo del agua. Como ciclo técnico, el ciclo integral del agua “potable”, representado en la Figura 18, consta de dos grandes fases, el abastecimiento (aducción y distribución) y el saneamiento (alcantarillado y depuración), que se corresponden con las actuaciones necesarias para llevar el agua potable a los consumidores, y con la recolección y tratamiento del agua residual. A este ciclo se le añade una tercera fase que es la reutilización de estas aguas residuales tras un adecuado tratamiento para garantizar sus características sanitarias, y que pueda ser utilizada en el riego de parques y jardines, limpieza de calles, riego de zonas deportivas e, incluso, para su uso industrial (Cordero, 2019).

Figura 20. Ciclo Integral del Agua

Fuente: (Cordero, 2019). (p. 5)

Para el caso puntual del presente proyecto de investigación, es pertinente detenerse en la segunda fase de saneamiento (alcantarillado y depuración), donde el municipio de Aracataca con un complejo sistema de instalaciones, compuesto por: redes de saneamiento y alcantarillado (colectores), estaciones de bombeo de

aguas residuales y planta de tratamiento de aguas residuales, cobrando protagonismo estas últimas en la fase tercera de reutilización. Las aguas regeneradas son aguas residuales depuradas y sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario, para adecuar su calidad al uso al que se destinan como es su reutilización en usos de consumo no humano (riego de zonas verdes, parques y jardines públicos, zonas deportivas, baldeo de calles y determinados usos industriales). Adicionalmente, como se ha manifestado con anterioridad, estas infraestructuras se acompañan de unas instalaciones o plantas para la generación de energía.

6.4.1.2. Desarrollo Sostenible

Los Principios y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del Pacto Mundial de Naciones Unidas constituyen valores esenciales que gozan de consenso universal en relación con estas materias relacionadas con la sostenibilidad, constituyendo marcos transversales en temática y fines perseguidos. La Agenda 2030 sitúa a las empresas, según su sector y modelo de negocio, como agentes clave junto con los estados y la sociedad civil, debiendo actuar causando impactos positivos y no limitarse a no cometer impactos negativos (“no harm”) en sus grupos de interés y en la sociedad en su conjunto. Algunos ODS relacionados prioritariamente con el ciclo del agua, la economía circular y la eficiencia energética se muestran en la siguiente figura (Cordero, 2019).

ODS 1.- POBREZA:

- Fomentar la resiliencia de los pobres y las personas que se encuentran en situaciones vulnerables y reducir su exposición y vulnerabilidad a los fenómenos extremos relacionados con el clima y otras crisis y desastres económicos, sociales y ambientales, al hacer uso de energías limpias y mejorar las condiciones del municipio en materia de servicio eléctrico.

ODS 6.- AGUA:

- Mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad, a través del tratamiento de aguas residuales y las tecnologías de reciclaje y reutilización.

- Aumentar sustancialmente la utilización y aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, incluyendo el acopio y almacenamiento de

agua y la desalinización, poniendo en práctica su gestión integrada a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza de territorios, asegurando la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua.

ODS 7.- ENERGÍA:

- Aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable en el conjunto de fuentes de energía y la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.

- Facilitar el acceso a la investigación en las fuentes de energías renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas de energía no contaminante y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructuras energéticas y tecnologías.

ODS 11.- CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES:

- Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo

ODS 12.- PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES:

- Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, disminuyendo de manera sustancial la generación de desechos mediante políticas de prevención, reducción, reciclaje y reutilización.

- Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir de manera significativa su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de reducir al mínimo sus efectos adversos en la salud humana y el medioambiente.

- Fortalecer la capacidad científica y tecnológica a fin de avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

ODS 13.- CLIMA:

- Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son utilizados principalmente con la finalidad de reducir los impactos negativos en la calidad del medio ambiente, originados por los GEI generados durante los procesos del tratamiento, con lo cual

se pueden obtener los siguientes beneficios: reutilización de los subproductos como los nutrientes y el agua tratada, así como la obtención de energía, la cual es la técnica más conveniente para minimizar los impactos del CH4 en el calentamiento global.

6.4.1.3. Eficiencia Energética

Se puede definir la eficiencia energética como el uso eficiente de la energía. Cualquier elemento que use energía, ya sea una persona, una instalación, un proceso, un producto o un servicio, se dice que es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una misma actividad o trabajo. Si añadimos el compromiso con el medio ambiente, se trataría de abastecerse con la mayor cantidad posible de energías renovables como forma de cuidar el planeta. Un objetivo plausible para cualquier persona física o jurídica seria la producción de una cantidad de energía igual o superior a la que consume y hacerlo, además, a partir de fuentes renovables como la generación de energía a través del biogás (Cordero, 2019). Esta es una medida que está en línea con las tendencias de la transición energética y su apuesta por la eficiencia energética y el desarrollo de iniciativas para la producción de energía limpia, donde es vital aprovechar procesos que tengan sinergias con la gestión del ciclo integral del agua.

En ese sentido, el biogás se obtiene en la fase de saneamiento por la biodegradación de desperdicios orgánicos que se obtienen durante el proceso de digestión de fangos, siendo un modo útil de tratar residuos biodegradables, ya que produce este combustible valioso, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico en la regeneración de la biosfera y en la agricultura. Este gas, adecuadamente depurado, se utiliza para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, y también para producir calor en hornos, estufas, secadores, calderas, calefacción u otros sistemas debidamente adaptados para el secado térmico de lodos y/o fangos, aprovechando energéticamente estos subproductos de los procesos, lo cual aplica en gran medida al principio 1 de la Economía Circular (Cordero, 2019).

Por lo anterior, se puede observar que la generación de biogás se encuentra incluido dentro del Principio No 2 de la Guía de Economía Circular referente a *Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos*; lo que significa que es ampliamente compatible para la configuración de un modelo de economía circular en el municipio de Aracataca, para lo cual adicionalmente se realiza el siguiente abordaje desde el aprovechamiento de aguas residuales domésticas municipales para la generación de energía eléctrica.

Tabla 22 Análisis de los principios claves de la Economía Circular

PRINCIPIO	OBSERVACIÓN
Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables	Al aplicar las técnicas de captura y almacenamiento de biogás en la laguna de tratamiento de aguas residuales del municipio de Aracataca, se contribuyen con la generación de energía renovables que preservan el capital natural de los recursos naturales sin generar afectaciones o agotamiento de reservas, en el entendido, que hace parte del ciclo natural del ser humano, la generación de residuos líquidos. Del mismo modo, la aplicación de esta técnica contribuye al mejoramiento de la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales, generando un vertimiento final con mejor calidad fisicoquímica y microbiología, teniendo en cuenta los porcentajes de remoción y eficiencia del biodigestor anaerobio.
Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos	Como se ha mencionado, la producción de biogás optimiza los rendimientos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Aracataca, y genera utilidades y beneficios adicionales por el aprovechamiento de la materia prima (que en este caso corresponde a las aguas residuales domésticas).
Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos	El aprovechamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Aracataca minimiza los impactos ambientales producto de los gases de efecto invernadero, eliminando este factor externo negativo. No se presenta pérdidas ni generación de residuos, en el entendido que se está reutilizando en su totalidad.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.4.2. Establecimiento del Modelo de Economía Circular

Muchos países se están viendo en la necesidad de poder adoptar nuevas estrategias que les permita hacer un uso posterior a las aguas residuales, tanto domesticas como industriales, y han evidenciado que la reutilización de estas es una de las alternativas más económicas y eficientes. Actualmente, el uso del nuevo concepto de economía circular se basa en el uso eficaz de los recursos naturales, pretendiendo de tal forma desarrollar dos aspectos primordiales tal como un crecimiento inteligente que a su vez sea integrador y sostenible tanto económica, social y ambientalmente. El concepto tomado de la unión europea lo enfoca a un cambio, fortalecimiento de la economía basada en una sociedad del reciclado cuya finalidad es la reducción de la producción de residuos e incluirlos nuevamente en la cadena de producción como recurso. De esta forma, se consigue que el comportamiento de producción no sea de forma lineal, sino que por el contrario se cierre el ciclo de vida de los productos, servicio, agua, energía y de materiales. Esto

permite que se puedan convertir los residuos en materias primas, y mantenerlas en la cadena de producción el mayor tiempo posible (Melgarejo, 2015)

En la figura 21 se ilustra cómo es el funcionamiento de la economía lineal donde se basa principalmente en una extracción y captación del recurso para luego ser transformado en el producto, bien o servicio, y finalmente, siguiendo con el uso que le da un individuo para ser posteriormente desechado. La economía lineal tiene fundamento en dos aspectos esenciales, el primero es el impulso de un crecimiento económico de manera permanente que tiene en cuenta el impacto y el deterioro medio ambiental, y el segundo aspecto hace referencia a un consumo constante tanto de recursos de aquellos que adquieren el producto, bien o servicio (Newcombe, 2009). Ahora bien, la economía circular gira entorno a reducir el consumo de materias prima, así como reducir al mínimo la generación de residuos y poder reutilizar, reacondicionar o reparar aquel producto, bien o servicio que ya ha sido usado. Los beneficios que trae consigo la implementación de una economía circular se fundamenta en:

- Reducir los costos de compra de recursos y los gastos de disposición del producto final.
- Genera nuevas oportunidades de crecimiento económico que va acompañado de innovación y competitividad.
- Contribuye a que se extienda la vida de los recursos no renovables y renovables.
- Contrarrestar el daño contra el cambio climático.

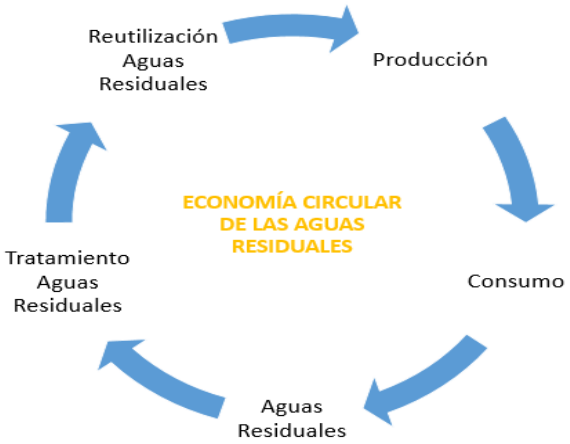
Figura 21. Economía Circular vs Economía Lineal

Fuente: (Cordero, 2019). (p. 2)

La implementación del concepto de economía circular que en este caso es el recurso hídrico, se concreta en una reutilización continua del agua, en donde la regeneración de las aguas residuales permite mitigar el consumo neto del mismo, reutilizándola en diferentes escenarios, como en riego y generación de energía eléctrica. Todas estas posibles aplicaciones, permiten hacer una reducción notable del impacto ambiental que se puede estar generando en estas zonas al suelo y los acuíferos que están interconectados con la cuenca del Río Aracataca. Según informe realizado por Global de Riesgos del Foro Económico Mundial (GRFEM,2015), estiman que la escasez de agua representada en un déficit del 40% a nivel mundial para el año 2030, siendo este el futuro si no se toman medidas inmediatas que ayuden a mitigar la gestión desenfrenada del agua. Sumado al consumo indiscriminado de agua se encuentra los vertimientos de las mismas aguas, pero contaminadas producto de los tratamientos inadecuados los cuales generan una degradación directa no solo de la calidad del agua si no de los suelos. (Índice de Desempeño Ambiental, 2017) (Urrea, 2019).

Al día de hoy, Colombia es un país que ha tomado conciencia del gran impacto que se ha causado durante décadas al medio ambiente y es de esta necesidad que se ha comenzado a adoptar el concepto de economía circular adaptada al tratamiento de aguas residuales. Por lo cual, es necesario hacer una breve explicación de la integración de los dos conceptos anteriormente nombrados. En la figura 20 se observa cómo es la dinámica de la reutilización de las aguas residuales en la economía circular (Urrea, 2019).

Figura 22. Reutilización de aguas residuales en la economía circular

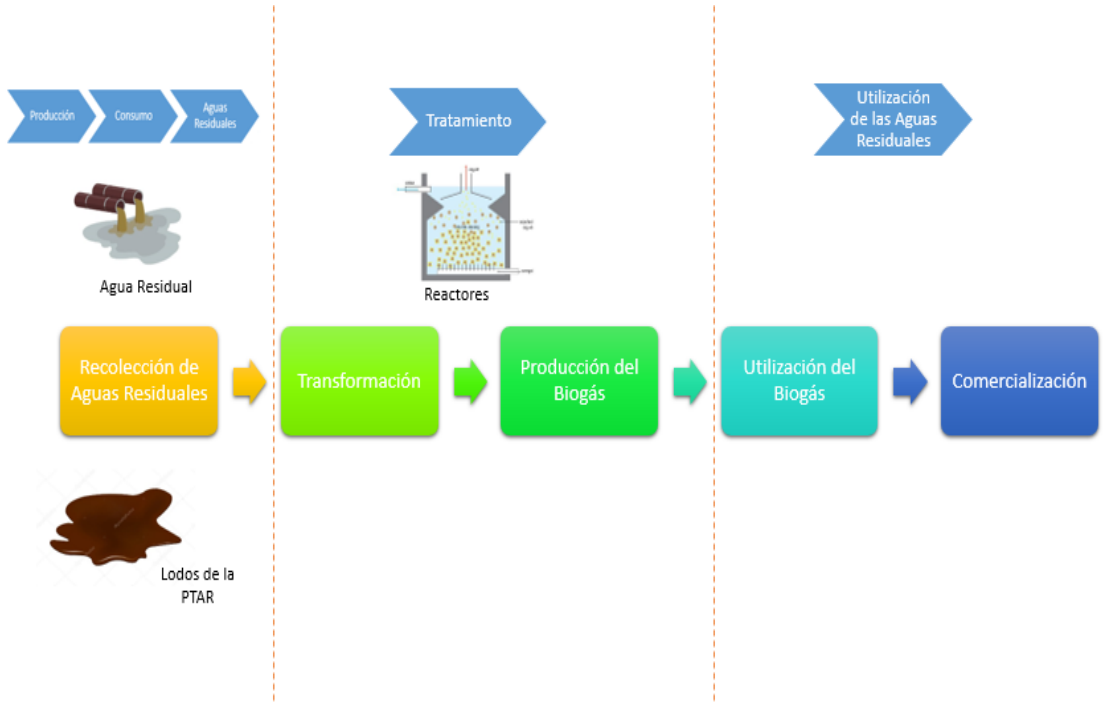


Fuente: Elaboración Propia, 2021. Adaptado de (Urrea, 2019).

En primer lugar, se encuentra la etapa de extracción del recurso hídrico con su proceso de potabilización, seguido por el consumo por parte de los habitantes e industrias, después de este se obtiene las aguas residuales las cuales se conducen por medio de una red de alcantarillado a una planta especializada que realiza la regeneración cumpliendo con los estándares de calidad que exige la normatividad de vertimientos aplicable y como etapa final, se hace uso del agua tratada, dependiendo de su destino. Este ciclo consecutivo hace las veces de regeneración hidrológica, haciendo que sea tan eficiente y sostenible como se pueda. Por tal, se puede afirmar que la economía circular del agua tiene como objetivo principal convertir el agua ya usada en una nueva fuente del recurso (Urrea, 2019).

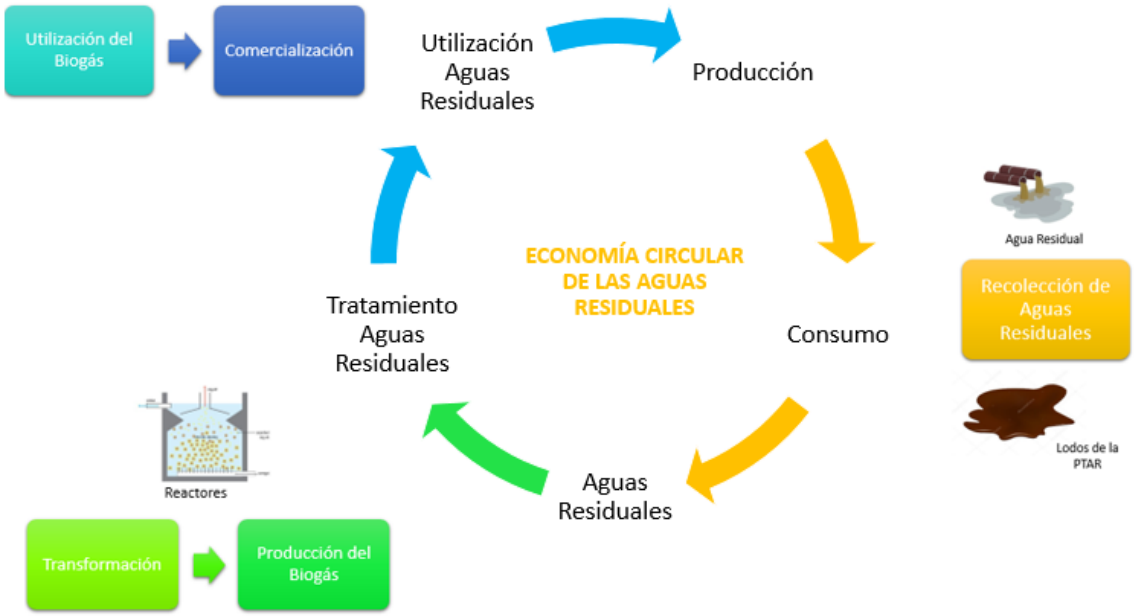
Ahora bien, teniendo en cuenta que las aguas residuales se pretenden utilizar para la generación eléctrica a partir del biogás, es preciso hacer una modificación del modelo de economía circular adaptado al tratamiento de aguas residuales, que sea aplicable al municipio de Aracataca, el cual surge de una mezcla del sistema de aprovechamiento y conversión de aguas residuales domésticas en energías renovables con el esquema de economía circular, quedando finalmente compuesto de la siguiente forma:

Figura 23. Sistema de aprovechamiento para la Generación de Biogás analizado con las etapas de la economía circular de aguas residuales



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Figura 24. Modelo de economía circular del biogás



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Finalmente, abordando los aspectos económicos desde la aplicación de economía circular a la reutilización del agua residual es una relación win to win (ganar para ganar), es preciso aclarar que el ciclo de la gestión de agua residual tiene una serie de componentes que inicia desde el punto de extracción pasando por una distribución , una posterior recolección cuando el agua ya ha sido utilizada (por medio de una red de alcantarillado) y que posteriormente se direcciona a un sitio para que se dé un proceso de tratamiento. Durante este proceso también se logra hacer la recuperación de nutrientes, producción de biogás y la generación de energía que hoy en día es una idea innovadora para un mundo que agoniza por la escasez de recurso y el uso excesivo (Urrea, 2019). La discusión comienza a presentarse cuando un territorio comienza a determinar los beneficios potenciales que trae el tratamiento de aguas residuales o la inversión de dicho capital en otra infraestructura, donde se evalúan diferentes alternativas que permitan tener un agua regenerada de alta calidad pero que proporcione el máximo rendimiento y beneficio. Es fundamental partir del principio que la reutilización del agua es visto como un bien económico, tal como se reconoce en la Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible de 1992: “El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos a los que se destina y debería reconocerse como un bien económico”.

6.4.3. Análisis de las dimensiones del desarrollo territorial

Inicialmente es preciso, enlistar los potenciales beneficios que recibiría el municipio de Aracataca en el Departamento del Magdalena, por la construcción de un biodigestor que permita la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de aguas residuales, para posteriormente abordar los beneficios de las principales dimensiones del desarrollo territorial sostenible.

Tabla 23. Potenciales beneficios de la construcción del Biodigestor.

ACTIVIDAD POTENCIAL	DESCRIPCIÓN DEL BENEFICIO
Mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del municipio	Satisfacción de necesidades básicas Reducción de problemáticas sanitarias y ambientales Reducción de olores Mejora de la calidad del aire y del agua Reducción de la potencial contaminación del agua y suelo. Reducción de la proliferación de moscas y otros vectores Reducción de enfermedades por condiciones de insalubridad.
Generación de Biogás	Potencial aprovechamiento del combustible. Mejoramiento de la prestación del servicio de energía eléctrica del municipio
Generación de Fertilizantes	Potencial aprovechamiento para cultivos
Potencial proyecto (Mecanismo de Desarrollo Limpio) MDL	Generación de bonos de carbono convención Marco sobre cambio climático de Naciones Unidas (Protocolo de Kyoto)
Reutilización de aguas Tratadas	Riego de zonas verdes aledañas a la laguna.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.4.3.1. Dimensión Económica

Tabla 24. Análisis de la dimensión económica

BENEFICIO POTENCIAL IDENTIFICADO	APORTE A LA DIMENSIÓN ECONOMICA	OPORTUNIDAD DEL TERRITORIO
Generación de Biogás	Generación y comercialización de energía eléctrica eficiente y de bajo costo	Oportunidad de Generar encadenamiento productivo a través del desarrollo de Alianzas Publico Privadas (APP) para la formulación e implementación de un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de la transformación de biogás. Se plantea una propuesta al Grupo empresarial DAABON, quien tiene

		implementado un proyecto MDL con una planta con capacidad de generar energía de 2.250 KWh.
Generación de lodos	Producción y comercialización de Fertilizantes de compuestos NPK	Desarrollo de una Alianza Público Privada con el sector agroindustrial (cultivo y beneficio de Banano, Palma africana, y mango principalmente) para el aprovechamiento de los lodos (Fertilizante orgánico) rico en nutrientes principales, Nitrógeno, Fosforo y Potasio (NPK)
Reutilización de aguas residuales tratadas	Suministro de aguas residuales tratadas para riego	Desarrollo de una Alianza Público Privada con el sector agroindustrial (cultivo y beneficio de Banano, Palma africana, y mango principalmente) para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas para llevar a cabo el fertirriego, práctica que consiste en la irrigación de los cultivos con aguas residuales tratadas por la alta concentración de nutrientes, necesarios para los cultivos, principalmente nitrógeno y potasio (N, K).
Generación de bonos de carbono	Comercialización de Bonos de Carbono y Venta de Certificados de emisiones reducidas	- APP con el sector Privado Buscar la experiencia del Grupo empresarial DAABON, el cual cuenta con un caso éxito de un Mecanismo de Desarrollo Limpio, Avalado ante la Organizaciones de las Naciones Unidas y produce Certificado de Emisiones Reducidas (CERs) - Alianza con la academia con el fin de formular el proyecto con los requisitos exigibles por la ONU para un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.4.3.2. Dimensión Ambiental

Tabla 25. Análisis de la dimensión ambiental

BENEFICIO IDENTIFICADO	DESCRIPCIÓN
Mejoramiento en el manejo de las Aguas residuales	El sistema de tratamiento a través de biodigestores anaerobios es altamente eficiente, consiguiendo porcentajes de remoción de la materia orgánica, superiores al 90%.
Reducción de las emisiones de los gases efecto invernadero	Debido a la hermeticidad del digestor, los gases tipo efecto invernadero producidos por la descomposición de la materia orgánica, principalmente el gas metano es capturado para su posterior aprovechamiento. Así mismo, se realiza una disminución de los malos olores generados por la descomposición de la materia orgánica H2S (Sulfuro de hidrogeno) olor característico a huevo podrido.
Producción de energías limpias	La energía producida a partir de la generación de gas metano, es una energía renovable y limpia.
Producción de fertilizante orgánico	los Lodos producidos por el biodigestor son una fuente importante de nutrientes como el nitrógeno, el fosforo y el potasio, esenciales para el desarrollo de los cultivos y la potencialización de la producción, no requiere ningún tipo de tratamiento adicional, ya que el inoloro y no atrae vectores como moscas.
Uso eficiente del agua	Al tener la posibilidad de reutilizar las aguas residuales para el riesgo de los cultivos, reduce la presión sobre el recurso, así mismo es una fuente importante en épocas secas.
Reducción de la potencial contaminación del suelo y agua	Reducción de los Vertimiento de aguas residuales tratadas a cuerpos de aguas superficiales y suelo para su disposición final.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.4.3.3. Dimensión Social

Tabla 26. Análisis de la dimensión social

BENEFICIO IDENTIFICADO	DESCRIPCIÓN
Identificación de Intereses y necesidades comunes y la priorización de las mismas	Aumento de la capacidad de reconocimiento y valorización de oportunidades distintas de ocupación de las comunidades; actividades alternativas, vinculadas con habilidades y saberes generacionales y con nuevas posibilidades en cuanto al propio hábitat.
Fortalecimiento y posicionamiento de actores.	Se genere un interés de las comunidades por la apropiación del conocimiento referente a la generación de biogás, permitiendo el desarrollo de actividades de

	fortalecimiento de capacidades de los distintos actores del municipio. Además, se establecen las bases para la generación de iniciativas de emprendimiento y de instituciones y organizaciones locales como forma de participar en el modelo de economía circular.
Mejoramiento de la calidad de vida y autoestima lo que conlleva a una mayor estabilidad de la población rural	Al mejorar la prestación del servicio de energía eléctrica y manejo de las aguas residuales articulado con los proyectos de expansión de las coberturas de alcantarillado del municipio, se propende por el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

6.4.4. Propuesta de Iniciativa Clúster

Una vez analizado el modelo de economía circular que se puede implementar en el municipio de Aracataca, y conforme al dialogo con los actores que participaron en las visitas de campo, se pudo identificar que existe la posibilidad de realizar un encadenamiento productivo en la región, a través del establecimiento de una iniciativa de clúster, que se presenta como propuesta producto de los resultados de la investigación, en el entendido, que a partir de la generación de biogás existe un potencial competitivo que puede ofrecer el municipio. Es así, como para el impulso de la estrategia de desarrollo local en articulación con la planificación territorial del municipio de Aracataca, se presenta la siguiente iniciativa denominada CLÚSTER DEL BIOGÁS, tendiente a convertirse en un atractivo territorial de municipios aledaños como el de Ciénaga, Zona Bananera, Aracataca y Fundación.

OBJETIVO:
Identificar los encadenamientos productivos en la generación de biogás o procesos de mecanismo de desarrollo limpio a través de la metodología clúster, que permita determinar oportunidades estratégicas de las actividades potenciales y competitivas de la región y en las cuales el ente territorial debe orientar sus esfuerzos para el fortalecimiento de las empresas y promover el desarrollo regional.

IMPORTANCIA DE LA INICIATIVA:
El CLUSTER DEL BIOGÁS facilita que el sector privado se conecte y encuentre complementariedades y sinergias con el ente territorial, universidades, la academia, gobiernos y otros empresarios, para mejorar la estrategia de sus negocios y el entorno del clima de inversión. Estas iniciativas buscan incidir en la productividad de los territorios y en la creación de mejores condiciones de competitividad para cada sector económico que las define, a su vez permiten:

- ✓ Compartir y trabajar por una visión de futuro.
- ✓ Crear y desarrollar proyectos conjuntos con actores públicos y privados.
- ✓ Profundizar el conocimiento del negocio.

- ✓ Participar en espacios de networking, talleres y ruedas de negocios.
- ✓ Desarrollar iniciativas de valor compartido que generen rentabilidad para las empresas y el ente territorial, y beneficio social y ambiental.

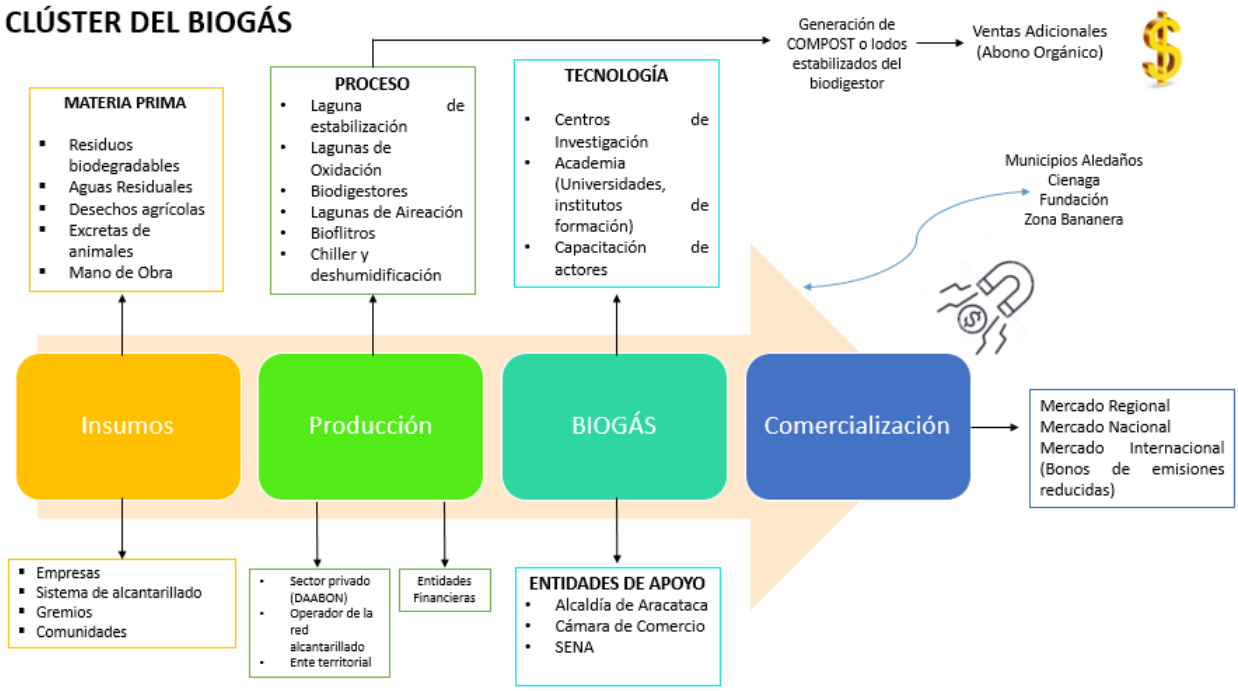
Figura 25. Importancia del Clúster

Fuente: Cámara de Comercio de Santa Marta

DESCRIPCIÓN:

La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de valor además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. Es así, que, con la implementación de un plan maestro tendiente a aumentar la cobertura de alcantarillado del municipio de Aracataca, se genera un efecto secundario que si no es tratado de la manera adecuada, generaría un impacto negativo en el territorio; dicho efecto hace alusión al manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales generadas por el municipio, convirtiéndose en una estrategia apropiada que permita generar crecimiento económico, con ingresos adicionales a través de la venta de biogás, impulsando el posicionamiento económico de Aracataca y convirtiéndose en un territorio atractivo para alianzas entre el sector público y privado, intermunicipales o regionales.

Figura 26. Clúster del Biogás



Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Como se puede identificar uno de los principales insumos de la estrategia de crecimiento económico, es la materia prima que en gran medida se generaría en el sistema de recolección y tratamiento de las aguas residuales, por lo que se resalta la necesidad de invertir y generar cofinanciación del Plan Maestro de Alcantarillado de Aracataca. Así mismo, el sector privado, gremios y las comunidades son susceptibles de generar insumos como desechos agrícolas, excretas de animales, convirtiéndose en una gran oportunidad para estos actores en confiar en la iniciativa e involucrarse en clúster, resaltando que, en concordancia con la estrategia del plan maestro, que la mano de obra en el proceso sería local y la comunidad está sensibilizada en el manejo adecuado de sus residuos sólidos y líquidos.

Ahora bien, en el proceso de producción, es importante el impulso de una alianza público-privada que permite la construcción de una planta generadora de energía a partir de Biogás, con aliados estratégicos como el grupo DAABON que cuenta con la experticia en este tipo de procesos, aunado al apoyo efectivo de las entidades financieras para la respectiva financiación de la iniciativa. Cabe resaltar

que, en este proceso se generan lodos estabilizados o compost, que también puede ser comercializado a bajo costo como abono orgánico al sector agrícola y ganadero, generando un valor agregado y beneficio para la región.

Así mismo, para la optimización del clúster, es primordial los desarrollos tecnológicos donde se debe contar con el apoyo efectivo de la academia, centros de formación y programas de formación y fortalecimiento del recurso humano local; aunado con el apoyo efectivo de entidades de apoyo como la Alcaldía, SENA y la Cámara de Comercio.

Así finalmente, se procede con la comercialización del biogás al sector privado para la generación de energía en sus procesos industriales, los cuales se beneficiarían con una disminución en los costos de energía. Además, el producto puede ser comercializado a nivel regional y nacional, a medida que se fortalezca los procesos en infraestructura, capacidad operativa, tecnología e innovación; y a nivel internacional la venta de bonos de emisiones reducidas derivados de la implementación de mecanismos de desarrollo limpio. Por otro lado, el clúster incluye una estrategia de atracción de los municipios aledaños, donde pueden participar de diversas formas: 1) Contribuyendo en la cofinanciación de la iniciativa con sus respectivas ganancias 2) Proveedores de materia prima, una vez se aumente la escala de producción 3) Potenciales clientes, en el entendido que existe la posibilidad de inversión en obras de infraestructura de conducción del biogás hasta las respectivas plantas de producción de energía de los municipios.

7. Reflexiones Finales

El municipio de Aracataca ubicado en el Departamento del Magdalena, cuenta con un sistema de tratamiento de sus aguas residuales domesticas adecuado para la instalación de un biodigestor anaerobio como mecanismo de captura, almacenamiento y tratamiento de biogás para la generación eléctrica, con su respectiva infraestructura de conducción y derivación. No obstante, se debe profundizar en la estimación de costos-beneficios que traería la implementación de esta tecnología en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR del municipio, estableciéndose así las bases teóricas para facilitar el desarrollo de futuras investigaciones al respecto.

Con los resultados obtenidos al calcular la tasa de generación energética, se pudo identificar que las actuales condiciones del sistema de tratamiento de aguas residuales, posee un potencial energético para suplir las necesidades energéticas de la PTAR, con excedente de energías que pueden ser comercializados o conectados como fuente de energía alterna a la red eléctrica actual del municipio.

Esto puede significar que el municipio disminuirá significativamente las fallas de fluido electico en la operación del sistema, disminuyendo así las contingencias por rebosamientos de manholes o fallas en el sistema de alcantarillado asociadas a causas energéticas, con lo que se contribuye positivamente con la problemática en materia energética identificada en el municipio.

No obstante, la producción energética calculado solamente alcanzaría a suplir el 18% de la demanda energética, pero esto no puede ser catalogado como un resultado negativo, en el entendido que la operación actual solamente corresponde a una cobertura del 33% del servicio de alcantarillo; lo que significaría un gran reto para el municipio y que está asociado a sus apuestas en materia de desarrollo territorial. Lo anterior, teniendo en cuenta que a medida que el municipio amplié su cobertura de alcantarillado, la producción energética asociada a esta ampliación por el aprovechamiento de las aguas residuales mediante biogás, aumentará proporcionalmente hasta alcanzar porcentajes que representen ganancias para el territorio, y con esto poder disminuir los costos que actualmente los habitantes deben asumir por el servicio de energía.

Ahora bien, también se pudo identificar que, en cuanto a la tasa de generación energética calculada con el fin de asegurar una factibilidad mucho más confiable, se hace necesario:

- Validar la remoción de la laguna del sistema a partir de la carga de DQO removida.
- Definir el Tiempo de retención hidráulico TRH más adecuado y el modo de operación para maximizar la producción de Biogás en el sistema.
- Elaborar un balance hidráulico y de cargas de DQO en las diferentes operaciones de la PTAR.

Por otro lado, al realizar una simulación de los posibles impactos ambientales generados por las actividades a desarrollar si se quiere implementar el proyecto de construcción de un biodigestor como una estrategia de economía circular, se evidencia que los impactos más relevantes corresponden a los impactos asociados en gran medida al componente socioeconómico en materia de generación de empleo, cambios en la economía local, y en el componente ambiental asociados al mejoramiento de la calidad de las aguas superficiales, aunque se presentan impactos negativos como cambios de niveles de presión sonora y vibraciones, la disminución de la cobertura vegetal y la generación de conflictos que deben contar con medidas de manejo ambiental adecuadas para la prevención y mitigación del impacto. No obstante, se reitera que esta fue una primera aproximación metodológica que deberá ser profundizada con estudios detallados que estimen los

costos-beneficios que representa el proyecto para el ente territorial, pero resaltando que se generaron resultados interesantes que permiten confiar en la apuesta de implementación del esquema de economía de circular mediante el biogás generado en el aprovechamiento de las aguas residuales.

Finalmente, se pudo establecer una compatibilidad de la propuesta de captura y almacenamiento de biogás para la generación eléctrica en el municipio de Aracataca, con los principios y conceptos de economía circular, del mismo modo que con los Objetivos de Desarrollo Sostenible; y de esta forma, con el análisis de la literatura asociada se pudieron establecer dos aportes valiosos de la investigación que podrán ser adoptados, ajustados y/o mejorados por el municipio, los cuales hacen referencia a la propuesta de esquema de modelo de economía circular del biogás y a los fundamentos teóricos para el establecimiento de una iniciativa del clúster del biogás.

8. Referencias

Aguilar, J. (2017). *DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN SUMINISTRO DE BIOGÁS RESIDENCIAL EN EL MUNICIPIO DE CHALCO.* Valle de Chalco, México: Universidad Autonóma del Estado de México.

Amosse, R., & Nedelec, R. (2010). Utilisation du biogaz issu de la digestion des boues d'épuration des eaux résiduaires urbaines. Retour d'expérience et projets du Siaap. *Techniques Sciences Méthodes*, 57-65. Obtenido de https://astee-tsm.fr/numeros/tsm-3-2010/amosse/?fromSearch

Andreoli, C., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2010). *Lodos de esgoto: tratamento e disposicao fnal.* Bello Horizonte: Unidad Federal de Minas Gerais.

Berktay, A., & Nas, B. (2007). *Biogas production and utilization potencial of wastewater treatment sludge, Energy Sources, Parte A: Recovery, Utilization and Enviromental effects.* doi:doi: https://doi.org/10.1080/00908310600712489

Berktay, A., & Nas, B. (2007). Biogas Production and Utilization Potential of Wastewater Treatment Sludge. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 179-188. doi:https://doi.org/10.1080/00908310600712489

Bodik, I., Sedlacek, S., Kubaská, M., & Hutnam, M. (2011). Biogas Production in Municipal Wastewater Treatment Plants –Current Status in EU with a Focus on the Slovak Republic. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 25*(3). Obtenido de https://hrcak.srce.hr/71950

BP. (2017). *Statistical Review of World Energy .* Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-

economics/statisticalreview-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf.

Bravo, A., & Abelardes, Y. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN GRANDES EMPRESAS COLOMBIANAS.* Cali, Colombia: FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD ICESI.

Briseño, L. (2017). *Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para a generación de energía.* Santiago de Querétaro, Qro., México,: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en electroquímica.

C.I. TEQUENDAMA S.A.S. (2020). Obtenido de http://portal.daabon.com.co/oldaabon/rsc/docs/sostenibilidad/pma_extractora.pdf

Carillo, G., & Ponce, I. (Octubre de 2019). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/349349827

CONAMA. (2019). Agua y Economía Circular. Anexo II: Fichas de proyectos de innovación en materia de agua y economía circular. *Congreso Nacional de Medio Ambiente.* Madrid. Obtenido de http://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/2019/09/Agua-y-Economi%CC%81a-Circular-Anexo-II.pdf

Conesa, V. (2010). Guía metodológica para la evaluación del Impacto Ambiental. España: Mundi-Prensa Libros.

Cordero, J. (2019). ECONOMÍA CIRCULAR: EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. *Encuentros multidisciplinarios* , 11.

Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 107-125.

Danish Energy Agency. (2019). Obtenido de https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications_reports_papers/guia_de_usuario_esp.pdf

DNP. (Julio de 2018). *Diagnóstico de la Calidad del Servicio de energía electrica en Colombia 2017.* Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017_version_06072018_1.pdf

El Artículo, c. (12 de Febrero de 2020). Comunidad de Aracataca pide soluciones a los problemas en servicio de energía. *El Artículo, Noticias E Investigación*, págs. https://elarticulo.co/comunidad-de-aracataca-pide-soluciones-a-los-problemas-en-servicio-de-energia/.

EL TIEMPO. (20 de mayo de 1997). Electromag no cumple a cabalidad: La Contraloría. *EL TIEMPO*, pág. 1. Obtenido de https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-571388

EllenMacarthurFoundation. (2017). *ECONOMÍA CIRCULAR.* Recuperado a partir de https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail.

EMF, E. M. (2014). *Rethink the Future: Hacia una economía circular, resumen ejecutivo.*

EPA-WERF. (2012). *Evaluation of Combined Heat and Power Technologies for Wastewater Facilities.* Georgia, Usa: Environmental Protection Agency and Water Environment Research Foundation.

Fair, G., Geyer, J., & Okun, D. (1966). *Water and Wastewater Engineering. 2 Volúmenes.* New York: John Wiley and Sons.

FAO. (2011). *Manual de Biogás.* Obtenido de http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf

García Arbelaez, C., Vallejo, G., Higgings, M., & Escobar, E. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático.* Cali, Colombia: 1 ed. WWF-Colombia.

GIZ, C. A. (2017). *GUÍA TÉCNICA PARA EL MANEJO Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.* Ciudad de México, México.

González, G., & Ponce, I. (2019). *Economía circular, bioeconomía y biorrefinerías.* Ciduad de México: División de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco y de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Guerrero, F. (2019). Obtenido de http://www.redescar.org/sites/default/files/2019-12/17.Economia%20Circular-Agua-Daabon.pdf

Haroum, M., Tisser, K., Altawil, A., & Osman, G. (28 de Abril de 2020). Potentiality of municipal sludge for biological gas production at Soba Station South of Khartoum (Sudan). *World Journal of Biology and Biotechnology, 5*(2), 1-5. Obtenido de https://sciplatform.com/index.php

Herguedas, A., Taranco, C., García, E., & Paniagua, P. (2012). *BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD.* Palencia: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

IMTA. (2016). *"Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE).* INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA . Obtenido de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1775/TC-1606.3.pdf?sequence=1&isAllowed=y

International Energy Agency, I. (2015). Obtenido de http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015.pdf

IPCC, G. I. (2014). *Afirmaciones principales del Resumen para responsables de políticas.* Recuperado de https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf.

Kiselev, A., Magaril, E., Magaril, R., Panepinto, D., Ravina, M., & Zanetti, M. (8 de Mayo de 2019). Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions. *Resources*, 19. doi:doi:10.3390/resources8020091

MADS. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC).* Obtenido de https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf

Martínez, A., & Porcelli, A. (2018). *Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional.* Lima: Revista Lex de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas de la Universidad Alas Peruanas.

Masera, O. (2010). *La Bionergía en México: Estudios de Caso No 1 .* Ciudad de México: Revista Red Mexicana de Bioenergía.

Mateus, A. C. (Diciembre de 2016). Crisis energética en Colombia. *TIA, Tecnología, Investigación y Academia, 4*(2), 74-81. Obtenido de file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/10411-Texto%20del%20art%C3%ADculo-54530-1-10-20170213.pdf

Melgarejo, J. (2015). La reutilización de agua en el marco de la economía circular.

Metcalf & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery.* New York, Usa: McGraw-Hill Companies.

Ministerio de Ambiente. (2015). *Negocios Verdes.* Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/index.php/negocios-verdes-y-sostenibles/herramientas-para-la-competitividad-y-promocion-de-los-negocios-verdes/plan-nacional-de-negocios-verdes.

Ministerio de Minas y Energías. (Junio de 2020). *La Transición energetica de Colombia.* Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24226685/MemoriasCongresoMME-2020.pdf

Moreno, A. (2018). *ECONOMÍA CIRCULAR: CRECIMIENTO INTELIGENTE, SOSTENIBLE.* Bogotá D. C.: UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES - PROGRAMA DE INGENIERÍA COMERCIAL .

Moreno, A. (2018). *ECONOMÍA CIRCULAR: CRECIMIENTO INTELIGENTE, SOSTENIBLE E INTEGRADOR.* Bogotá, Colombia: Unviersidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.

Newcombe, R. (2009). Economic evaluation for water recycling in urban areas of California. *University Of California*.

Nolasco, D. (2010). Obtenido de https://publications.iadb.org/es/desarrollo-de-proyectos-mdl-en-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales

Orbe, A. (2016). *GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS: EL CASO DE LOJA.* Ecuador: Faculltad Latinoamericana de Ciencias Sociales.

Quitián, M. (2018). *Estudio técnico ambiental comparativo del tratamiento de aguas residuales domésticas para su descarga mediante emisarios en medio acuático marítimo y continental. Caso Cartagena y Barranquilla.* Bogotá: Universidad de la Salle.

Rakascan, N., Drazic, G., Popovic, V., Milovanovic, j., Zivanovic, L., Acimic, M., . . . Ikanovic, J. (2021). Effect of digestate from anaerobic digestion on Sorghum bicolor L. Production and circular economy. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici , 49*, 13. doi:10.15835/nbha49112270

Ramírez, T., Medrano, O., & Ecobedo, L. (Junio de 2020). Generación deenergía en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). El caso de la PTAR, zona noreste, Villahermosa, Mexico. *ENERLAC, IV*(1), 12-30. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/343240196

Ramírez, T., Medrano, O., & Escobedo-Cazán, L. (1 de Junio de 2020). Generacióndel energía en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). El caso de la PTAR zona noreste, Villahermosa, Mexico. *Revista de Energía de Latinoamerica y el Caribe ENERLAC, IV*(1), 12-30. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/343240196

Rozo, G. (2019). *Estado del Arte de la Economía Circular en Colombia.* Bogotá, Colombia: Facultad de Ciencias Administrativas, Económicas y afines de la Universidad Cooperativa de Colombia.

SUI. (2021). *Consolidado Energía por Empresa Departamento y Municipio*. Recuperado el 10 de Octubre de 2021, de http://www.sui.gov.co/: http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_096

Superservicios, S. d. (2018). *EVALUACIÓN INTEGRAL DE PRESTADORES AGUAS DE ARACATACA S.A. E.S.P.* Bogotá.

TECNALIA. (2018). *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia. Producto 3. Transición a una Economía Circular en Colombia para el sector de la manufactura y de la construcción.* Recuperado a partir de https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Circular/MATECProducto 3.pdf.

UAM, U. A. (2009). *Métodos de investigación educactiva.* Madrid: Magisterio Educación Especial.

Unidad de Planeación Minero Energética, U. (2015). *Balance Energético Colombiano 2015.* Obtenido de http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/

UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. (Diciembre de 2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050.* Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

Urrea, M. (2019). *Reutilización de agua depurada de la PTAR El Salitre, Bogotá, Colombia. Un ejemplo de economía circular.* Bogotá, Colombia:

Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción - Universidad Politecnica de Cataluña.

Vence, J. (2016). *CRISIS EN LA COSTA CERIBE DEL SERVICIO DE ENERGIA ELECTRICA PRESTANDO POR LA EMPRESA ELECTRICARIBE.* Valledupar, Cesar: Universidad Santo Tomás.

Von Sperling, M. (2005). *Principios del tratamiento de aguas residuárias.* Bello Horizonte.

World Economic, F. (2014). *World Economic, Forum: Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up Across Global Supply, Chains.* Geneva, Switzerland: World Economic,.

9. Anexos

9.1. Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica de la laguna aerobia

9.2. Matriz de Cálculo Biogas Wastewater Assessment Tecnhology Tool (BioWATT) elaborada por Global Methane Initiative y World Bank Group en 2016,

9.3. Matrices de impacto ambiental